



بررسی تجربی جریان هوا در پایین دست سیم‌های چند رشته‌ای

محمد علی اردکانی^{۱*}، عیسی ابروانی^۲

۱- دانشیار پژوهشکده مکانیک، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران
* تهران، صندوق پستی ۱۱۵-۳۳۱۶۵، ardekani@irost.org

چکیده- به منظور جلوگیری از سقوط افراد شناور و یا مدل به داخل تونل باد عمودی، در قسمت خروجی نازل، توری محافظ نصب می‌شود. از آنجا که جریان هوا دارای بیشترین سرعت در این قسمت از تونل باد می‌باشد، لذا افت فشار ایجاد شده ناشی از توری محافظ بسیار بالا و قابل ملاحظه است. از طرف دیگر به دلیل این که توری محافظ به طور متناوب در معرض نیروهای دینامیکی ناشی از سقوط افراد شناور و یا مدل قرار دارد، لذا باید به منظور جلوگیری از وقوع پدیده خستگی از سیم‌های چند رشته‌ای در ساخت آن استفاده شود. در این تحقیق با استفاده از روش اختلاف مومنتم ضریب نیروی پسا برای سیم چند رشته‌ای و مفتول اندازه‌گیری و مقایسه شده است. برای این منظور از دستگاه جریان‌سنج سیم داغ با پراب یک بعدی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که در اعداد رینولدز حدود 2×10^3 ، ضریب نیروی پسای سیم چند رشته‌ای ۱۶٪ از مفتول بزرگتر است که این مقدار با افزایش عدد رینولدز کاهش می‌یابد. به طوری که برای عدد رینولدز 10^4 ضریب نیروی پسای سیم چند رشته‌ای و مفتول تقریباً برابر می‌باشد.
کلیدواژه‌گان: توزیع سرعت، شدت اغتشاش‌ها، ضریب نیروی پسا.

Experimental investigation of airflow at downstream of multi strand cables

M. A. Ardekani^{1*}, E. Irvani²

1- Assoc. Prof., Dept. of Mech. Eng., Iranian Research Org. for Science and Tech. (IROST), Tehran, Iran
2- MSc. Student, Islamic Azad Univ., South Tehran Branch, Tehran, Iran
* P.O.B. 33165-115, Tehran, Iran. ardekani@irost.org

Abstract- In a vertical wind tunnel, in order to prevent persons or an experimental model from falling, a protective screen should be installed at the end of the nozzle section. Since the air has the maximum velocity at this section, the pressure drop due to the protective screen will be significantly high. On the other hand, as the protective screen is alternatively exposed to dynamic forces due to free fall of the floating persons or the model, the screen wires will experience fatigue. To prevent this, multi strand cables should be used in the manufacturing of these protective screens. In this research work, using the momentum difference method, drag coefficient for the multi strand cables and circular rods has been measured and compared. For this purpose, a hot wire anemometer (HWA) with a one-dimensional probe has been used. Results show that at Reynolds number in proximity of 2×10^3 , the drag coefficient for the multi strand cable exceeds that of a circular rod by 16% and that this amount decreases with further increase in Reynolds number. The trend is such that for Reynolds number of 10^4 , the drag coefficients of the multi strand cable and circular rod are almost equal.

Keywords: Velocity Distribution, Turbulence Intensity, Drag Coefficient.

۱- مقدمه

یکی از انواع تونل بادهای مادون صوت، تونل باد عمودی می‌باشد. این تونل باد برای آزمایش اسپین هواپیما، چرخ‌بال‌ها و همچنین شبیه‌سازی عملیات سقوط آزاد چتربازان کاربرد دارد. با توجه به این که تونل باد فوق عمودی است، برای جلوگیری از سقوط افراد شناور و یا مدل، در دهانه خروجی نازل، از توری محافظ استفاده می‌شود. با توجه به این که در محوطه پرواز سرعت جریان هوا و در نتیجه فشار دینامیکی بیشترین مقدار خود را داراست، از این رو افت فشار بسیار زیادی در این قسمت از تونل باد ایجاد می‌شود که می‌تواند حدود ۲۰٪ تا ۳۰٪ افت فشار کل تونل باد باشد. بنابراین باید سعی کرد تا این افت فشار را کاهش داد. کاربرد دیگر توری، استفاده از آن در اتاق آرامش تونل باد است. این نوع توری توری متداول بوده و هدف استفاده از آن کاهش شدت اغتشاش‌های محوری جریان هوا می‌باشد [۱]. مش (تعداد سوراخ در یک اینچ) توری‌های متداول حدود ۱۶ تا ۲۴ می‌باشد. ولی مش توری محافظ حدود ۵/۰ و یا کمتر از آن است. بدیهی است با کاهش عدد مش توری، افت فشار ناشی از توری کاهش می‌یابد. لذا برای توری محافظ که عدد مش آن کوچک می‌باشد، افت فشار بستگی شدیدی به نوع سیم توری دارد. شکل سیم نیز تأثیر زیادی می‌تواند در کاهش نیروی پسا و در نتیجه کاهش افت فشار توری داشته باشد. بهترین شکل برای سیم توری، شکلی است که ضریب پسای آن کم باشد. این شکل به صورت ایرفویل می‌باشد. ولی با توجه به کاربرد آن در توری، احتمال تغییر در زاویه حمله و در نتیجه افزایش نیروی پسای آن، بسیار بالا می‌باشد. از این رو استفاده از سیم‌هایی به شکل ایرفویل یا بیضی در توری محافظ مناسب نیست. بنابراین نیاز است که از سیم‌هایی با مقاطع متقارن در توری استفاده شود، که تنها مقطع متقارن دایره می‌باشد. از سوی دیگر، همان طور که بیان شد، هدف استفاده از توری محافظ، جلوگیری از سقوط افراد و یا مدل به داخل تونل باد است. از این رو نیروهای مختلف و متناوبی به توری وارد می‌شود. بنابراین سیم توری باید به گونه‌ای باشد که مقاومت لازم در برابر خستگی و نیروهای متناوبی که بر آن اعمال می‌شود را داشته باشد. به منظور جلوگیری از پارگی سریع سیم توری و همچنین افزایش ضریب ایمنی آن، مناسب است که توری محافظ از سیم‌های

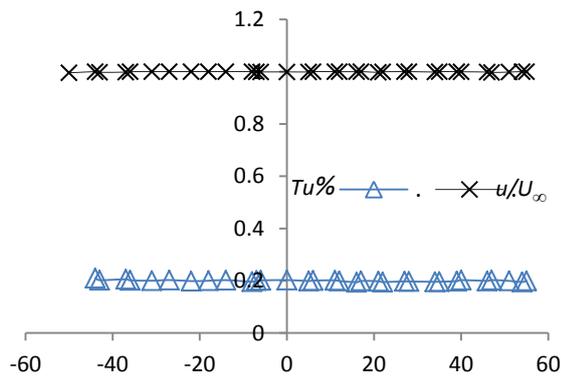
چند رشته‌ای ساخته شود. برای بررسی افت فشار توری محافظ و تجزیه و تحلیل آن مناسب است که ضریب نیروی پسا و همچنین جریان پایین دست سیم چند رشته‌ای اندازه‌گیری و بررسی شود.

یکی از روش‌های اندازه‌گیری نیروی پسا، استفاده از روش اختلاف مومنتم است. در رابطه با روش اختلاف مومنتم، تحقیقات متعددی انجام گرفته است. ون دم [۲]، با استفاده از معادلات پیوستگی و بقاء مومنتم خطی برای حجم کنترلی که جسم را در برگرفته، و با در نظر گرفتن مقدار تنش‌های رینولدز، ضریب نیروی پسا را مشخص نمود. گلدشتاین [۳]، فشار استاتیکی در ناحیه دنباله را مشخص کرد. برای استفاده از معادله ارایه شده توسط گلدشتاین نیاز به اندازه‌گیری سرعت جریان هوا در ناحیه دنباله و همچنین اغتشاش‌ها به صورت سه بعدی می‌باشد. با افزایش فاصله از مدل، شدت اغتشاش‌های جریان هوا کاهش یافته و اغتشاش‌ها را می‌توان همگن فرض نمود. در این حالت با استفاده از جریان‌سنج با پراب یک بعدی [۴]، می‌توان نیروی پسا را اندازه‌گیری کرد.

در این مقاله ضریب نیروی پسا، توزیع سرعت جریان هوا و شدت اغتشاش‌های آن پایین دست سیم چند رشته‌ای و مفتول، در اعداد رینولدز مختلف اندازه‌گیری شده، و نتایج حاصل مقایسه و ارائه می‌شود.

۲- روش آزمایش

تمام آزمایش‌ها با استفاده از تونل باد مدار بسته، در سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران انجام پذیرفته است. شکل ۱ تونل باد فوق را نشان می‌دهد که از نوع مدار بسته می‌باشد. این تونل باد دارای مقطع اتاق آزمون به ابعاد (۶۰cm×۶۰cm) و طول ۲ متر است. تونل باد فوق دارای فن به قطر ۱۰۵ سانتی‌متر بوده که از نوع جریان محوری می‌باشد. کنترل سرعت جریان هوا با استفاده از کنترل دور فن در بازه ۴m/s الی ۲۸m/s قابل تنظیم است. برای به دست آوردن جریان مناسب، در اتاق آرامش این تونل باد، تعداد ۴ عدد توری قرار گرفته که یک عدد آن قبل از لانه زنبوری و سه عدد آن بعد از لانه زنبوری قرار دارد. شکل ۲ تغییرات سرعت بی‌بعد شده جریان هوا و شدت اغتشاش‌های آن را در مرکز تونل باد، یا محل قرارگیری مفتول نشان می‌دهد. سرعت جریان هوا بر مبنای سرعت در فاصله ۵۰ سانتی‌متری بالادست مرکز اتاق



شکل ۲ تغییرات سرعت بی بعد شده جریان هوا و شدت اغتشاش‌های آن در امتداد اتاق آزمون، $U_0=10/5$ (m/s)

جدول ۱ مشخصات سیم‌های چند رشته‌ای و مفتول‌های مورد آزمایش در سرعت‌های مختلف جریان هوا

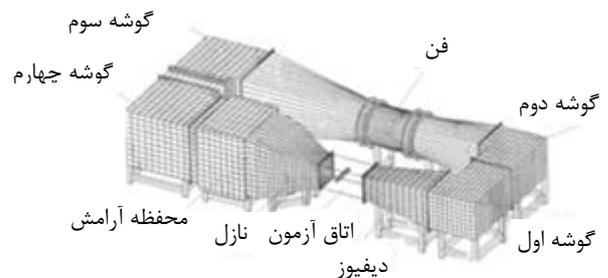
ردیف	نوع	قطر (mm)	سرعت جریان هوا (m/s)	عدد رینولدز	ضریب نیروی پسا مطابق شکل ۳
۱	سیم	۳	۱۰	۱۵۷۰	-
۲	سیم	۳	۱۵	۲۳۵۶	-
۳	سیم	۳	۲۰	۳۱۴۰	-
۴	مفتول	۳	۱۰	۱۵۷۰	۰/۹۶
۵	مفتول	۳	۱۵	۲۳۵۶	۰/۹۷
۶	مفتول	۳	۲۰	۳۱۴۰	۰/۹۸
۷	سیم	۱۰	۱۰	۵۲۳۵	-
۸	سیم	۱۰	۱۵	۷۸۵۳	-
۹	سیم	۱۰	۲۰	۱۰۴۷۰	-
۱۰	مفتول	۱۰	۱۰	۵۲۳۵	۱/۰۵
۱۱	مفتول	۱۰	۱۵	۷۸۵۳	۱/۱۲
۱۲	مفتول	۱۰	۲۰	۱۰۴۷۰	۱/۲

۳- اندازه‌گیری نیروی پسا به روش اختلاف مومنتم

وندم [۲]، با اعمال معادلات پیوستگی و بقاء مومنتم خطی به حجم کنترلی که جسم را در بر گرفته و با در نظر گرفتن مقدار تنش‌های رینولدز ضریب نیروی پسا را مطابق معادله (۱) ارائه کرد:

$$C_d = \int \left[\frac{P_{s,e} - P_{s,w}}{q_\infty} \right] d \left(\frac{y}{L} \right) + 2 \int \frac{U}{U_\infty} \left(1 - \frac{U}{U_\infty} \right) d \left(\frac{y}{L} \right) + \frac{1}{q_\infty} \int \tau_{xx} \cdot d \left(\frac{y}{L} \right) \quad (1)$$

آزمون U_0 بی‌بعد شده است. مطابق شکل ۲، تغییرات سرعت و یا به عبارت دیگر گرادیان فشار در این منطقه ناچیز می‌باشد. برای اندازه‌گیری پروفیل سرعت جریان هوا و شدت اغتشاش‌های آن در پایین دست سیم‌های چند رشته‌ای و مفتول، از دستگاه جریان‌سنج سیم داغ، ساخت شرکت فرا سنجش صبا استفاده شده است. پراب مورد استفاده از نوع یک بعدی بوده و سنسور آن از جنس تنگستن ۵ میکرونی است. دستگاه جریان‌سنج به همراه پراب دارای فرکانس قطع ۱۶ کیلوهرتز می‌باشد. داده‌های اندازه‌گیری شده توسط جریان‌سنج سیم داغ از طریق کارت A/D (آنالوگ به دیجیتال) به رایانه ارسال و توسط نرم‌افزار فلونت تجزیه و تحلیل می‌شود. برای جابجایی پراب از مکانیزم انتقال‌دهنده استفاده شده است که دقت این مکانیزم ۰/۰۵ میلی‌متر در سه جهت است. حرکت این مکانیزم انتقال‌دهنده توسط رایانه و نرم‌افزار کنترل می‌شود. سیم‌های مورد استفاده در این آزمایش، از نوع چند رشته‌ای به قطر ۳ و ۱۰ میلی‌متر بوده و آزمایش‌ها در اعداد رینولدز مختلف انجام شده است. جدول ۱ مشخصات سیم‌های چند رشته‌ای و مفتول‌های مورد آزمایش را در سرعت‌های مختلف جریان هوا، نشان می‌دهد. همچنین ضریب نیروی پسای مفتول‌های فوق، طبق منحنی ارائه شده توسط شلیختینگ [۵] در شکل ۳ ارائه شده است. شکل ۴ تصویر سیم چند رشته‌ای را نشان می‌دهد. قطر این سیم ۳ میلی‌متر بوده که از ۷ رشته سیم به قطر ۱ میلی‌متر تشکیل شده است. لذا زبری یا ناصافی سطح آن حدود ۱۶٪ قطر سیم چند رشته‌ای است. توزیع سرعت جریان هوا و شدت اغتشاش‌های آن در فواصل بی‌بعد (X/D) ، ۲، ۵، ۷، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ در پایین دست سیم چند رشته‌ای و مفتول برای اعداد رینولدز ۱۵۷۰، ۲۳۵۶، ۳۱۴۰، ۵۲۳۵، ۷۸۵۳، ۱۰۴۷۰ اندازه‌گیری شده است.



شکل ۱ تونل باد مدار بسته

$$C_d = \int \left(\frac{p_{s,e} - p_{s,w}}{q_\infty} \right) d\left(\frac{y}{L}\right) + 2 \int \frac{U}{U_\infty} \left(1 - \frac{U}{U_\infty} \right) d\left(\frac{y}{L}\right) - 2 \int \frac{\overline{u'^2}}{U_\infty^2} d\left(\frac{y}{L}\right) \quad (3)$$

معادله (۳) به معادله ون دم مشهور است. این معادله را می‌توان در هر نقطه‌ای در پایین دست مدل که مقادیر جریان هوا را بتوان در آنجا به‌طور دقیق اندازه‌گیری نمود، کاربرد داد. با توجه به معادله (۳)، می‌توان آن را به سه انتگرال تقسیم کرد که انتگرال اول آن، عبارت اختلاف فشار، انتگرال دوم عبارت اختلاف مومنتم و انتگرال سوم عبارت تنش‌های رینولدز است. از آنجا که اندازه‌گیری دقیق فشار استاتیکی در ناحیه دنباله جسم دشوار است، گلدشتاین [۳] فشار استاتیکی در ناحیه دنباله را مطابق معادله (۴)، بصورت شدت اغتشاش‌های سه بعدی در نظر گرفت و ضریب نیروی پسا را مطابق معادله (۵) ارائه کرد.

$$p_{s,e} = p_{s,w} + q' \quad , \quad q' = \frac{1}{2} \rho (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (4)$$

$$C_d = 2 \int_w \frac{U}{U_\infty} \left(1 - \frac{U}{U_\infty} \right) d\left(\frac{y}{L}\right) + \int_w \left(\frac{\overline{v'^2} + \overline{w'^2} - \overline{u'^2}}{U_\infty^2} \right) d\left(\frac{y}{L}\right) \quad (5)$$

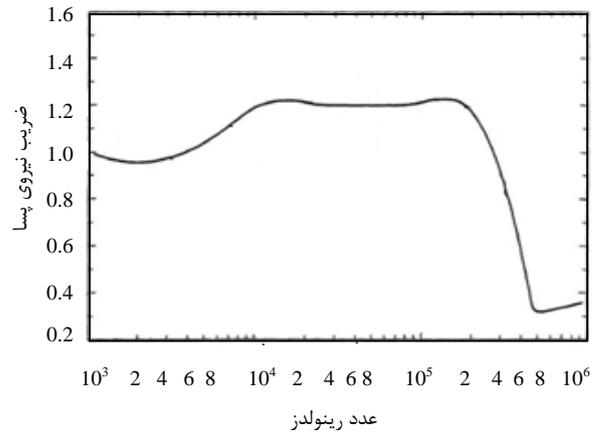
W' و V' نوسانات عرضی سرعت جریان هوا می‌باشند. معادله (۵) به معادله اصلاح شده ون دم مشهور است. با فرض شدت اغتشاش‌های همگن و یا به عبارت دیگر $U' = V' = W'$ ، معادله (۵) ساده شده و به صورت معادله (۶) بیان می‌شود:

$$C_d = 2 \int_w \frac{U}{U_\infty} \left(1 - \frac{U}{U_\infty} \right) d\left(\frac{y}{L}\right) + \int_w \left(\frac{\overline{u'^2}}{U_\infty^2} \right) d\left(\frac{y}{L}\right) \quad (6)$$

در این حالت می‌توان با استفاده از جریان سنج سیم داغ با پراب یک بعدی و فقط با اندازه‌گیری شدت اغتشاش‌ها در جهت جریان، ضریب نیروی پسا را به دست آورد.

۴- نتایج و بحث

همان طور که در مقدمه بیان شد، برای اندازه‌گیری ضریب نیروی پسا، مطابق معادلات (۱) و (۲)، لازم است که توزیع



شکل ۳ منحنی ضریب نیروی پسا بر حسب عدد رینولدز برای استوانه [۵]

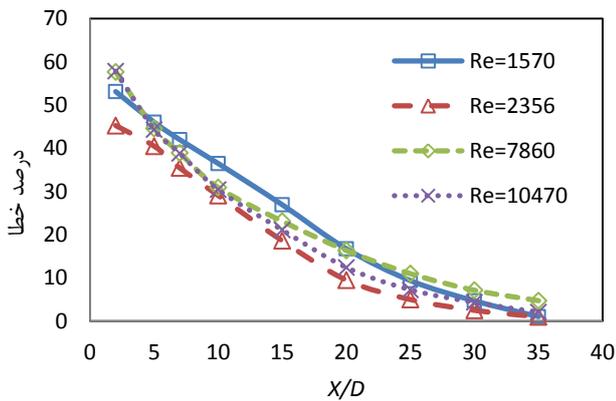


شکل ۴ نمونه سیم چند رشته‌ای استفاده شده در آزمایش

$p_{s,e}$ فشار استاتیکی در ناحیه خارج از دنباله یا بالادست مدل، $p_{s,w}$ فشار استاتیکی در ناحیه دنباله مدل، U سرعت محلی، U_∞ سرعت جریان آزاد، q فشار دینامیکی جریان آزاد، y فاصله قائم در راستای عمود بر دنباله، τ_{xx} تنش برشی و L نیز طول مشخصه مدل است که برای استوانه قطر آن در نظر گرفته می‌شود. مقدار τ_r را می‌توان به صورت مجموع تنش‌های لزجی و تنش‌های رینولدز مطابق معادله (۲) بیان کرد.

$$\tau_{xx} = \mu \left(2 \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} \right) - \rho \overline{u'^2} - 2 \overline{U \rho' u'} - \overline{\rho' u'^2} \quad (2)$$

که در آن ρ' نوسانات چگالی و u' نوسان سرعت جریان هوا در جهت جریان آزاد می‌باشد. مقدار مؤلفه تنش لزجی در معادله (۲) در جریان‌های با اعداد رینولدز بالا، بسیار کمتر از مؤلفه‌های تنش‌های رینولدز خواهد بود. همچنین برای جریان‌های تراکم ناپذیر، نوسانات چگالی را می‌توان ناچیز در نظر گرفت. از این رو معادله (۱) را می‌توان به صورت رابطه (۳) بازنویسی کرد.



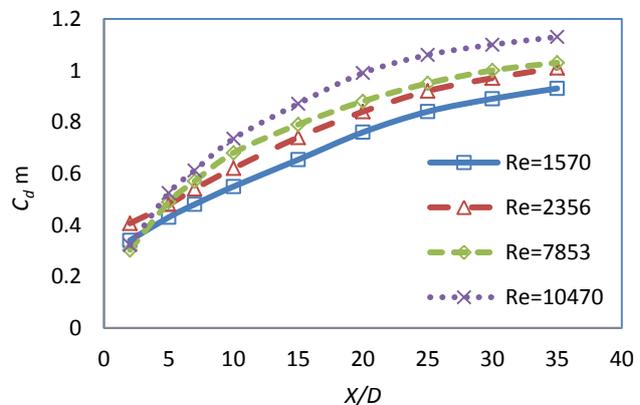
شکل ۶ توزیع خطا در اندازه‌گیری ضریب نیروی پسای مفتول بر حسب فاصله بی‌بعد شده در پایین دست برای اعداد رینولدز مختلف

شکل ۷، توزیع سرعت بی‌بعد شده جریان هوا در پایین دست مدل‌ها، برای عدد رینولدز ۱۵۷۰ و فاصله $X/D=30$ را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۷، سرعت جریان هوا در ناحیه دنباله سیم چند رشته‌ای، دارای نقصان بیشتری نسبت به مفتول می‌باشد. همچنین پهنای ناحیه دنباله سیم چند رشته‌ای از مفتول بزرگتر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ضریب نیروی پسای ناشی از اختلاف مومنتم (عبارت اول در معادله (۲))، برای سیم چند رشته‌ای از مفتول بزرگتر است. برای بررسی بهتر این موضوع، توزیع ضریب نیروی پسای ناشی از اختلاف مومنتم برای سیم چند رشته‌ای و مفتول بر حسب فاصله بی‌بعد شده در پایین دست، برای عدد رینولدز ۱۵۷۰، در شکل ۸، نشان داده شده است. مطابق شکل فوق، ضریب نیروی پسای ناشی از اختلاف مومنتم برای هر دو مدل با افزایش فاصله در پایین دست، افزایش یافته و در فاصله $X/D=35$ ، به مقدار واقعی نزدیک می‌شود. در این فاصله ضریب نیروی پسای سیم چند رشته‌ای حدود ۱۵٪ از مفتول بزرگتر است. (شایان ذکر است که سهم ضریب نیروی پسای ناشی از اختلاف مومنتم برای مفتول حدود ۹۶٪ و برای سیم چند رشته‌ای حدود ۹۷٪ از کل ضریب نیروی پسای می‌باشد).

توزیع شدت اغتشاش‌های جریان هوا برای عدد رینولدز ۱۵۷۰ و فاصله $X/D=30$ ، برای سیم چند رشته‌ای و مفتول در شکل ۹ نشان داده شده است. مطابق شکل ۹، شدت اغتشاش‌های سیم چند رشته‌ای از مفتول بیشتر است، در نتیجه ضریب نیروی پسای ناشی از تنش‌های رینولدز (عبارت دوم در

سرعت جریان هوا و شدت اغتشاش‌های آن در ناحیه دنباله جسم مورد نظر، اندازه‌گیری شود. با توجه به اینکه شدت اغتشاش‌های جریان هوا در فواصل نزدیک به مدل‌ها (سیم چند رشته‌ای و مفتول) بالا می‌باشد، لذا در این فواصل ($X/D < 20$) اغتشاش‌های جریان سه بعدی بوده و فرض همگن بودن آنها صحیح نیست [۶]. بنابراین استفاده از جریان‌سنج سیم داغ با پراب یک بعدی و یا استفاده از معادله (۲)، در این نواحی صحیح نبوده و با خطای زیادی همراه است. به منظور به دست آوردن فاصله مناسب پایین دست مفتول، برای اندازه‌گیری ضریب نیروی پسای با استفاده از جریان‌سنج سیم داغ و پراب یک بعدی، تغییرات ضریب نیروی پسای مفتول بر حسب فاصله بی‌بعد شده در پایین دست، برای اعداد مختلف رینولدز در شکل ۵، نشان داده شده است. خطای اندازه‌گیری ضریب نیروی پسای، برای اعداد مختلف رینولدز بر حسب فاصله بی‌بعد شده، در شکل ۶ نشان داده شده است. مطابق شکل ۶، به علت بالا بودن شدت اغتشاش‌های جریان هوا و همگن نبودن آن در فاصله $X/D=2$ ، خطای اندازه‌گیری حدود ۶۰٪ می‌باشد. با افزایش فاصله در پایین دست، به تدریج از میزان خطا کاسته شده، به طوری که در فاصله $X/D=30$ ، این خطا به حدود ۱٪ تا ۵٪ می‌رسد. بنابراین با توجه به شکل‌های ۵ و ۶، می‌توان نتیجه گرفت که به منظور داده‌برداری صحیح لازم است تا اندازه‌گیری‌ها در فواصل $X/D > 30$ انجام شود. در نتیجه می‌توان از جریان‌سنج سیم داغ با پراب یک بعدی در این فواصل استفاده کرد.

در این تحقیق اگرچه آزمایش‌ها در اعداد رینولدز مختلفی انجام شده است، اما نتایج مربوط به اعداد رینولدز ۱۵۷۰، ۳۱۴۰، ۱۰۴۷۰ در این مقاله ارائه شده است.



شکل ۵ توزیع ضریب نیروی پسای مفتول بر حسب فاصله بی‌بعد شده در پایین دست برای اعداد رینولدز مختلف

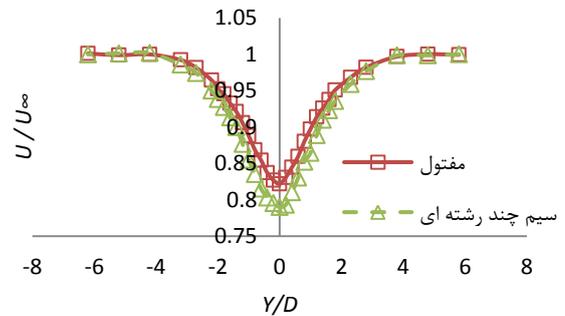


شکل ۱۰ توزیع حداکثر شدت اغتشاش جریان هوا برحسب فاصله بی بعد (X/D) برای عدد رینولدز ۱۵۷۰

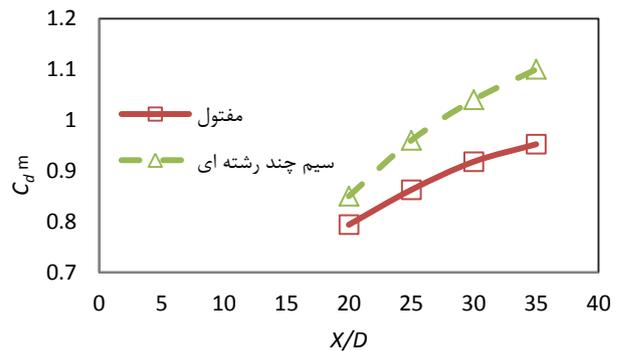
مطابق شکل ۱۰، حداکثر شدت اغتشاش‌ها در $X/D=20$ حدود ۱۰٪ تا ۱۲٪ بوده و با افزایش فاصله در پایین دست، به تدریج کاهش می‌یابد. به طوری که در $X/D=35$ به حدود ۸٪ تقلیل می‌یابد. مطابق تحقیقات انجام شده [۶]، هنگامی که شدت اغتشاش‌های جریان هوا به اندازه کافی کم باشد، می‌توان اغتشاش‌های جریان را با دقت خوبی همگن فرض کرد. شکل ۱۱، توزیع ضریب نیروی پسا ناشی از تنش‌های رینولدز برحسب فاصله بی بعد X/D برای عدد رینولدز ۱۵۷۰ را نشان می‌دهد. همان طور که بیان شد، به دلیل بزرگتر بودن مقدار شدت اغتشاش‌های جریان هوا برای سیم چند رشته‌ای نسبت به مفتول، ضریب نیروی پسای ناشی از تنش‌های رینولدز نیز مقدار بیشتری دارد ولی مقدار فوق نسبت به ضریب نیروی پسا ناشی از اختلاف مومنتم ناچیز می‌باشد. مطابق شکل ۱۱، در فاصله $X/D=35$ سهم ضریب نیروی پسا ناشی از تنش‌های رینولدز برای مفتول حدود ۳٪ و برای سیم چند رشته‌ای حدود ۳/۵٪ از کل ضریب پسا می‌باشد. شکل ۱۲، توزیع سرعت جریان هوا پایین دست سیم چند رشته‌ای و مفتول را برای عدد رینولدز ۳۱۴۰ و در فاصله $X/D=30$ نشان می‌دهد.

مطابق شکل ۱۲، نقصان سرعت جریان هوا برای سیم چند رشته‌ای از مفتول بیشتر است، همچنین پهنای ناحیه دنباله آن نیز بزرگتر می‌باشد. شکل ۱۳، توزیع ضریب نیروی پسای مفتول و سیم چند رشته‌ای (مجموع ضریب نیروی پسای ناشی از تنش رینولدز و اختلاف مومنتم) را برای عدد رینولدز ۱۵۷۰ بر حسب فواصل مختلف در پایین دست نشان می‌دهد.

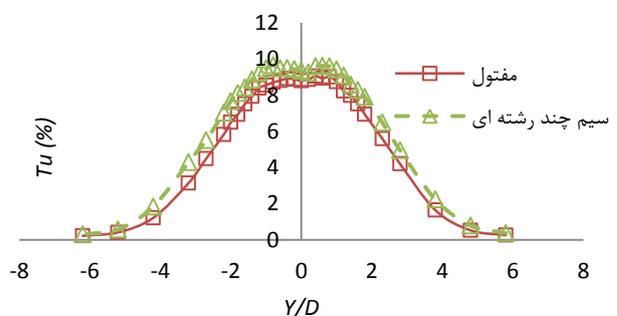
معادله (۲)، برای سیم چند رشته‌ای مقدار بزرگتری نسبت به مفتول خواهد بود. برای بررسی بیشتر، توزیع حداکثر شدت اغتشاش‌های جریان هوا برای عدد رینولدز ۱۵۷۰ برحسب فاصله بی بعد $X/D > 20$ ، در شکل ۱۰ نشان داده می‌شود.



شکل ۷ توزیع سرعت بی بعد شده برای مدل‌های مورد آزمایش در فاصله $X/D=30$ برای عدد رینولدز ۱۵۷۰



شکل ۸ توزیع ضریب نیروی پسا ناشی از اختلاف مومنتم بر حسب فاصله بی بعد شده در پایین دست مدل‌های مورد آزمایش برای عدد رینولدز ۱۵۷۰

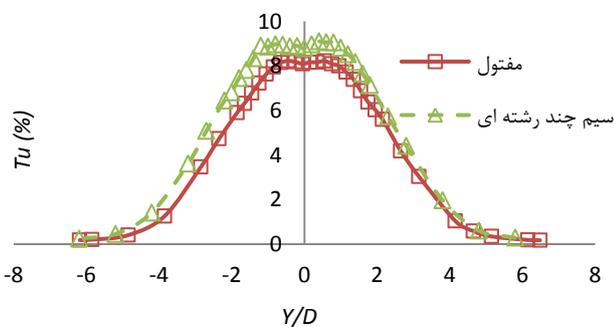


شکل ۹ توزیع شدت اغتشاش جریان هوا برای مدل‌های مورد آزمایش در فاصله $X/D=30$ برای عدد رینولدز ۱۵۷۰

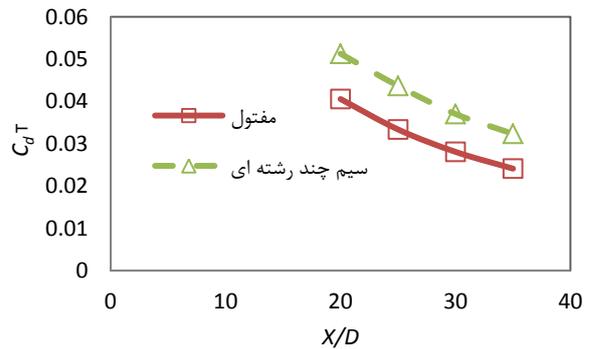
۱ انطباق خوبی دارد و خطای آن حدود ۲٪ می‌باشد. در نتیجه صحت داده‌های اندازه‌گیری شده در این فاصله مشخص می‌شود. با مقایسه داده‌های مربوط به سیم چند رشته‌ای و مفتول در شکل ۱۳، می‌توان تشخیص داد که ضریب نیروی پسای سیم چند رشته‌ای حدود ۱۶٪ بالاتر از مفتول است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ضریب نیروی پسا ناشی از اختلاف مومنتم برای سیم چند رشته‌ای از مفتول بزرگتر است. توزیع شدت اغتشاش‌های جریان هوا در فاصله $X/D=30$ برای عدد رینولدز ۳۱۴۰، در شکل ۱۴ نشان داده شده است. مطابق این شکل، در این حالت نیز شدت اغتشاش‌های جریان هوا برای سیم چند رشته‌ای از مفتول بیشتر است، اما مقدار آن نسبت به حالتی که عدد رینولدز ۱۵۷۰ می‌باشد، کمتر است.

مطابق روند ارائه شده در شکل‌های ۸ و ۱۱، مقادیر ضریب نیروی پسا ناشی از اختلاف مومنتم و تنش‌های رینولدز، برای حالتی که عدد رینولدز ۳۱۴۰ می‌باشد، محاسبه شده است. این مقادیر در فاصله $X/D=35$ به ترتیب برای سیم چند رشته‌ای ۱/۱۱ و ۰/۳۲ و برای مفتول ۰/۹۴ و ۰/۰۲ می‌باشد. شکل ۱۵، توزیع سرعت بی‌بعد شده جریان هوا، برای سیم چند رشته‌ای و مفتول، برای عدد رینولدز ۱۰۴۷۰ در $X/D=30$ را نشان می‌دهد. در این حالت نیز توزیع سرعت جریان هوا برای سیم چند رشته‌ای نسبت به مفتول دارای نقصان بیشتری است، اما پهنای ناحیه دنباله برای دو مدل تقریباً برابر است. در نتیجه ضریب نیروی پسای ناشی از اختلاف مومنتم برای سیم چند رشته‌ای با کمی اختلاف از مفتول بزرگتر است.

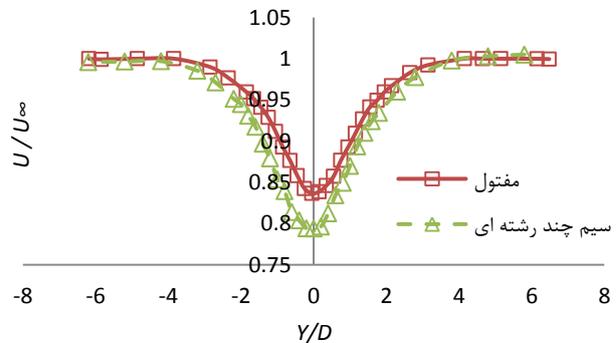
شکل ۱۶، توزیع شدت اغتشاش‌های جریان هوا در فاصله $X/D=30$ و عدد رینولدز ۱۰۴۷۰، برای سیم چند رشته‌ای و مفتول را نشان می‌دهد.



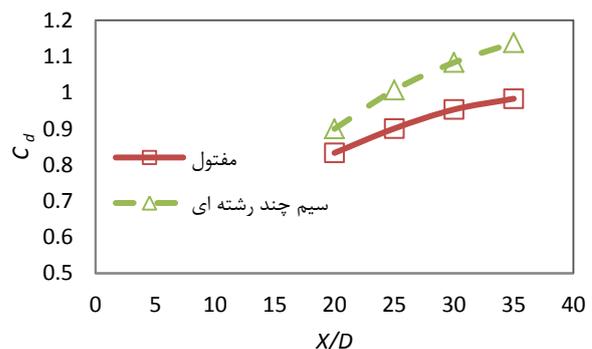
شکل ۱۴ توزیع شدت اغتشاش جریان هوا برای مدل‌های مورد آزمایش در فاصله $X/D=30$ برای عدد رینولدز ۳۱۴۰



شکل ۱۱ توزیع ضریب نیروی پسا ناشی از تنش‌های رینولدز برای مدل‌های مورد آزمایش برای عدد رینولدز ۱۵۷۰



شکل ۱۲ توزیع سرعت بی‌بعد شده جریان هوا برای مدل‌های مورد آزمایش در فاصله $X/D=30$ برای عدد رینولدز ۳۱۴۰

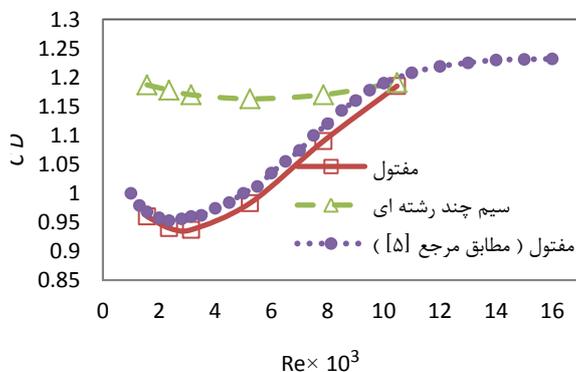


شکل ۱۳ توزیع ضریب نیروی پسا بر حسب فاصله بی‌بعد شده در پایین دست مدل‌های مورد آزمایش برای عدد رینولدز ۱۵۷۰

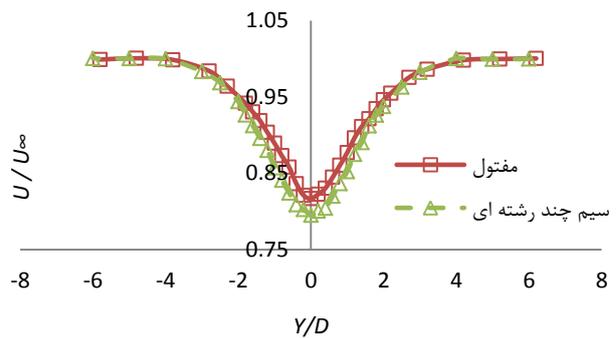
همان طور که در شکل ۱۳ دیده می‌شود، با افزایش فاصله در پایین دست، مقادیر ضریب نیروی پسا به اعداد حقیقی نزدیک می‌شوند. به طوری که در $X/D=35$ ضریب نیروی پسای مفتول به مقدار ۰/۹۸ رسیده که با نتایج حاصل از جدول

نزدیک به اعداد به دست آمده از مرجع [۵] بوده و تغییراتی مشابه با آن را دارند. همچنین مطابق شکل ۱۷، مقادیر ضریب نیروی پسا برای سیم چند رشته‌ای از مفتول بزرگتر بوده و برای اعداد رینولدز بین ۲۰۰۰ تا ۱۰^۴ تقریباً ثابت می‌باشد. در اعداد رینولدز حدود ۲۰۰۰، ضریب نیروی پسای سیم چند رشته‌ای تقریباً ۲۳٪ از مفتول بیشتر است که این اختلاف با افزایش عدد رینولدز کاهش می‌یابد، به طوری که در اعداد رینولدز بزرگتر از ۱۰^۴، ضریب نیروی پسای سیم چند رشته‌ای و مفتول بسیار نزدیک به هم هستند. با توجه به مرجع [۷]، با افزایش شدت اغتشاش‌های جریان آزاد، عدد رینولدز بحرانی (عدد رینولدزی که در آن جریان دچار گذار از حالت آرام به مغشوش می‌شود)، کاهش می‌یابد. همچنین زبری روی استوانه نیز سبب کاهش عدد رینولدز بحرانی می‌شود.

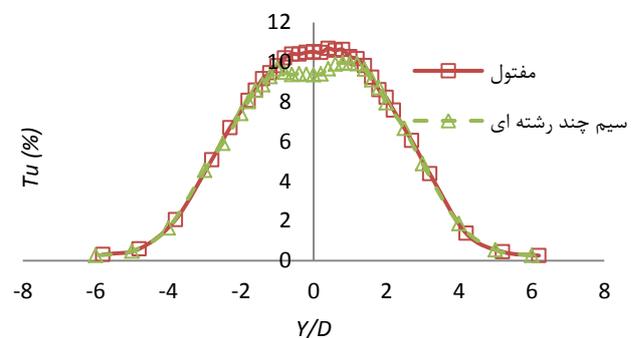
مطابق شکل ۱۸ نقصان سرعت جریان هوا در عدد رینولدز ۱۰۴۷۰ در مقایسه با عدد رینولدز ۱۵۷۰ مقدار کمی بیشتر است. همچنین پهنای ناحیه دنباله آن نیز نسبت به عدد رینولدز ۱۵۷۰ کمی بزرگتر است. با توجه به شکل ۳ و مرجع [۵]، جدایش جریان برای استوانه در اعداد رینولدز بین ۲۰۰۰ تا ۱۰^۴ به صورت آرام بوده و زاویه جدایش حدود ۸۰ درجه می‌باشد. مقدار ضریب نیروی پسا بستگی به زاویه جدایش جریان از سطح دارد به طوری که برای اعداد رینولدز بزرگتر از ۱۰^۴ زاویه جدایش جریان، مقدار بزرگتری نسبت به اعداد رینولدز بین ۲۰۰۰ تا ۱۰^۴ دارد. با توجه به زبر بودن سطح سیم چند رشته‌ای نسبت به مفتول می‌توان توجیه کرد که ضریب نیروی پسا برای سیم چند رشته‌ای، معادل ضریب نیروی پسای مفتول در اعداد رینولدز بزرگتر است.



شکل ۱۷ توزیع ضریب نیروی پسا بر حسب عدد رینولدز برای مدل‌های مورد آزمایش



شکل ۱۵ توزیع سرعت بی‌بعد شده جریان هوا برای مدل‌های مورد آزمایش در فاصله $X/D=30$ و عدد رینولدز ۱۰۴۷۰



شکل ۱۶ توزیع شدت اغتشاش جریان هوا برای مدل‌های مورد آزمایش در فاصله $X/D=30$ و عدد رینولدز ۱۰۴۷۰

مطابق شکل ۱۶ در این حالت، به جز در مرکز ناحیه دنباله که شدت اغتشاش‌های جریان برای مفتول از سیم چند رشته‌ای بیشتر است، در سایر نقاط شدت اغتشاش‌ها تقریباً برابر هستند. در این حالت نیز ضرایب نیروی پسا ناشی اختلاف مومنتم و تنش‌های رینولدز برای سیم چند رشته‌ای ۱/۱۶ و ۰/۰۳۹ و برای مفتول ۱/۱۷ و ۰/۰۲۳ محاسبه شده‌اند.

تغییرات ضریب نیروی پسای محاسبه شده بر حسب عدد رینولدز، برای سیم چند رشته‌ای و مفتول در شکل ۱۷ نشان داده شده است. همچنین تغییرات ضریب نیروی پسا برای مفتول بر حسب عدد رینولدز مطابق مرجع [۵]، نیز برای مقایسه بهتر در شکل فوق نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۷، ضریب نیروی پسا در عدد رینولدز ۱۰^۳، حدود ۱ بوده و با افزایش عدد رینولدز تا حدود ۲۵۰۰ مقدار کمی کاهش یافته و سپس سیر صعودی به خود گرفته و در عدد رینولدز ۱۰^۴ به مقدار ۱/۲ می‌رسد. سپس تا عدد رینولدز ۲×۱۰^۵ حدود ۱/۲ ثابت می‌ماند (شکل ۳). داده‌های مربوط به مفتول دارای مقادیر

به منظور شناور ماندن افراد در محوطه پرواز تونل باد عمودی، برای انجام عملیات سقوط آزاد، لازم است که سرعت جریان هوا در این قسمت از تونل باد بین ۴۰ تا ۶۵ متر بر ثانیه باشد. بنابراین (چنان چه از سیم چند رشته‌ای به قطر ۲/۵ میلی‌متر در ساخت توری محافظ استفاده شود، عدد رینولدز حدود ۵۸۰۰ تا ۹۵۰۰ خواهد بود). مطابق شکل ۱۷ ضریب نیروی پسای سیم چند رشته‌ای در سرعت ۴۰ m/s حدود ۱۵٪ و برای سرعت ۶۵ m/s حدود ۳٪ بیشتر از مفتول می‌باشد که باید در طراحی تونل باد عمودی در نظر گرفته شود.

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به بحث‌های صورت گرفته و آزمایش‌های انجام شده می‌توان نتایج زیر را ارائه کرد:

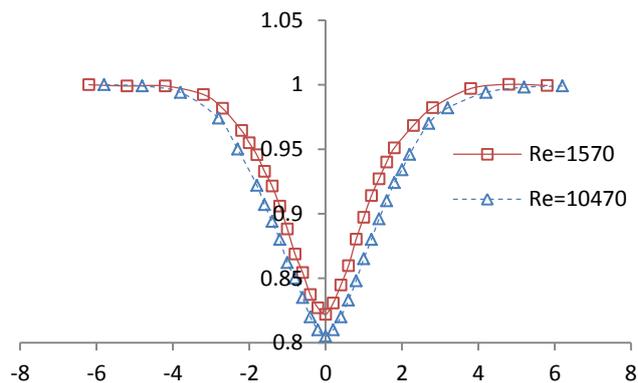
۱- برای اندازه‌گیری ضریب نیروی پسای مفتول و یا سیم چند رشته‌ای با قطرهای کوچک، استفاده از روش‌های بالانس نیرو و یا توزیع فشار روی سطح مدل، بسیار دشوار بوده و در مواردی امکان‌پذیر نیست. بنابراین مناسب است که در این موارد از روش اختلاف مومنتم استفاده شده و با استفاده از دستگاه جریان‌سنج سیم داغ، توزیع سرعت جریان هوا و شدت اغتشاش‌های آن در پایین دست مدل اندازه‌گیری شود.

۲- در فواصل $X/D > 30$ ، شدت اغتشاش‌های جریان هوا کمتر از ۱۰٪ بوده و می‌توان اغتشاش‌های جریان را با دقت قابل قبولی همگن در نظر گرفته و از جریان‌سنج با پراب یک بعدی برای اندازه‌گیری ضریب نیروی پسا استفاده کرد. شایان ذکر است که خطای اندازه‌گیری در این حالت به کمتر از ۴٪ کاهش می‌یابد. همچنین در این فاصله، ضریب نیروی پسا ناشی از اختلاف مومنتم و تنش‌های رینولدز به ترتیب حدود ۹۷٪ و ۳٪ از کل ضریب نیروی پسا را به خود اختصاص می‌دهند.

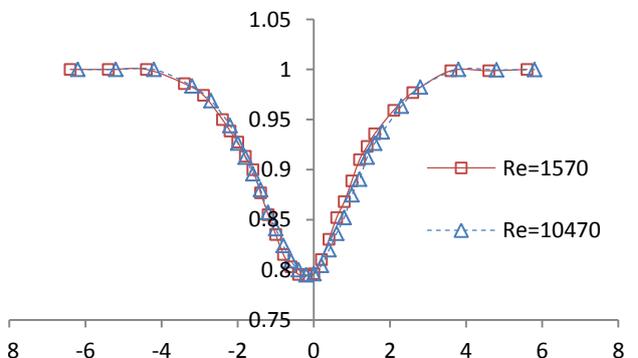
۳- سیم چند رشته‌ای دارای ۱۶٪ زبری بوده و در نتیجه رینولدز مؤثر آن به عدد رینولدز بالاتری منتقل می‌شود. لذا ضریب نیروی پسای سیم چند رشته‌ای برای اعداد رینولدز 10^3 تا 10^4 از مفتول بیشتر است. در اعداد رینولدز بالاتر از 10^4 ، مقدار ضریب نیروی پسای سیم چند رشته‌ای و مفتول تقریباً ثابت و برابر ۱/۲ می‌باشند.

۴- از آنجا که محدوده سرعت جریان هوا در محوطه پرواز تونل باد عمودی جهت شبیه‌سازی سقوط آزاد بین ۴۰ تا ۶۵

برای بررسی بیشتر، توزیع سرعت جریان هوا در فاصله $X/D=30$ برای مفتول و در اعداد رینولدز ۱۵۷۰ و ۱۰۴۷۰ در شکل ۱۸ نشان داده شده است. شکل ۱۹ نیز توزیع سرعت جریان هوا برای سیم چند رشته‌ای در فاصله $X/D=30$ برای اعداد رینولدز ۱۵۷۰ و ۱۰۴۷۰ را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱۹، پهنای ناحیه دنباله و نقصان سرعت جریان هوا برای سیم چند رشته‌ای در اعداد رینولدز ۱۵۷۰ و ۱۰۴۷۰ مشابه یکدیگر می‌باشند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ضریب نیروی پسای سیم چند رشته‌ای برای اعداد رینولدز ۱۵۷۰ تا ۱۰۴۷۰ تقریباً ثابت می‌ماند. با توجه به بحث‌های صورت گرفته مشخص می‌شود که ضریب نیروی پسای سیم چند رشته‌ای در عدد رینولدز ۱۵۷۰ حدود ۱۶٪ از مفتول بزرگتر می‌باشد. در اعداد رینولدز حدود ۱۰۴۷۰، ضریب نیروی پسای سیم چند رشته‌ای مشابه با مفتول است.



شکل ۱۸ توزیع سرعت جریان هوا در فاصله $X/D=30$ برای مفتول در اعداد رینولدز ۱۵۷۰ و ۱۰۴۷۰



شکل ۱۹ توزیع سرعت جریان هوا در فاصله $X/D=30$ برای سیم چند رشته‌ای در اعداد رینولدز ۱۵۷۰ و ۱۰۴۷۰

- [3] Goldstein, S., "A Note on the Measurement of Total Head and Static Pressure in a Turbulent Stream", *Proceedings of the Royal Society of London*, Series A, Vol. 155, 1936, pp. 570-575.
- [4] M.A. Ardakani, *Hotwire Anemometer*, khajeh nasir toosi university of technology publications, Tehran, 2006. (In Persian)
- [5] Schlichting H. *Boundary-Layertheory*, 8nd Edition, McGraw-Hill, Series in Mechanical Engineering. New York, 2004.
- [6] Antonia, R. A. and Rajagopalan, S., "Determination of Drag of a Circular Cylinder", *AIAA Journal*, Vol. 28, No. 10, 1990, pp. 1833-1834.
- [7] Zdravkovich M.M., "Conceptual Overview of Laminar and Turbulent Flows Past Smooth and Rough Circular Cylinders", *International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications*, Kyoto, Japan, 1990.

متر بر ثانیه است، لذا چنانچه از سیم چند رشته‌ای به قطر ۲/۵ میلی‌متر در ساخت توری محافظ استفاده شود، عدد رینولدز بین ۵۸۰۰ تا ۹۵۰۰ خواهد بود. هنگامی که عدد رینولدز ۵۸۰۰ می‌باشد، ضریب نیروی پسا سیم چند رشته‌ای حدود ۱۵٪ بیشتر از مفتول می‌باشد. ولی هنگامی که عدد رینولدز ۹۵۰۰ می‌باشد، این اختلاف کاهش یافته و حدود ۲٪ خواهد بود.

۶- مراجع

- [1] Rae, W. and Pope, A., *Low-Speed Wind Tunnel Testing*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc. New York., 1984.
- [2] Van Dam, C. P., "Recent Experience with Different Methods of Drag Prediction", *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 35, pp. 751-798, 1999.