

بررسی تجربی دنباله با شدت اغتشاش‌های بالا برای اندازه‌گیری نیروی پسا

محمدعلی اردکانی*

دانشیار، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، پژوهشکده مهندسی مکانیک

عیسی ابروانی

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

چکیده

یکی از روش‌های اندازه‌گیری نیروی پسا، اندازه‌گیری اختلاف ممنتوم در بالادست و پایین دست مدل می‌باشد. در این روش با استفاده از توزیع سرعت و شدت اغتشاش‌های جریان سیال در پایین دست مدل، می‌توان نیروی پسا را اندازه‌گیری کرد. هنگامی که شدت اغتشاش‌های جریان سیال در پایین دست مدل بالا باشد، اغتشاش‌ها همگن نبوده و اندازه‌گیری ضریب نیروی پسا با استفاده از جریان‌سنج سیم‌داغ با پراب یک بعدی صحیح نخواهد بود. در این تحقیق تجربی، شدت اغتشاش‌های جریان هوا پایین دست مدل (مفتول)، بررسی شده و حداقل فاصله‌ای که در آن اغتشاش‌های جریان را بتوان با دقت قابل قبولی همگن در نظر گرفت معین شده است. شدت اغتشاش‌های جریان پایین دست مفتول با افزایش فاصله (X/D) کاهش می‌یابد. به طوریکه حداکثر شدت اغتشاش‌ها در فاصله ۲۵ برابر قطر پایین دست مفتول، به حدود ۱۰٪ کاهش یافته و خطای اندازه‌گیری ضریب نیروی پسا در این فاصله حدود ۸٪ می‌باشد. در فاصله ۳۵ برابر قطر پایین دست مفتول، حداکثر شدت اغتشاش‌ها به حدود ۷٪ کاهش یافته و خطای اندازه‌گیری ضریب نیروی پسا حدود ۵٪ می‌باشد. در این تحقیق، توزیع سرعت و شدت اغتشاش‌های جریان هوا در پایین دست مفتول در اعداد رینولدز ۱۵۷۰ تا ۱۰۴۷۰ با استفاده از جریان‌سنج سیم داغ بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی: توزیع سرعت، شدت اغتشاش‌ها، ضریب نیروی پسا، تنش‌های رینولدز، جریان‌سنج سیم‌داغ.

Experimental Investigation of the High Turbulence Wake, for Measurement of Drag Force

M. A. Ardekani

Associate Professor, Iranian Research Organization For Science & Technology, Mechanical Engineering Research Inst

E. Irvani

M.Sc. Studen, Islamic Azad University, South Branch of Tehran

Abstract

Momentum difference method can be used for measuring drag force. In this method, using velocity and turbulence intensity distributions at the model downstream, drag coefficient is determined. If the turbulence intensity downstream of the model is high, turbulence will not be uniform (homogenous) and measurements by one-dimensional hot-wire probe will be associated with error. In this experimental investigation, turbulence intensity downstream of a rod has been studied and the minimum distance at which the flow turbulence can be considered with acceptable uniformity (homogeneity), has been determined. Turbulence intensity at the rod downstream, decreases with increase in X/D ratio, so that the maximum turbulence intensity at a distance of 25 times the downstream diameter reduces to 10% and error in measurement of drag coefficient at this distance is about 8%. at the distance of 35 times the downstream diameter, the maximum turbulence intensity reduces to about 7% and the measurement error is about 5%. In this study, a hot wire anemometer has been used to investigate velocity distribution and air flow turbulence intensity at the rod downstream at Reynolds numbers of 1570 to 10470.

Keywords: Velocity Profile, Turbulence Intensity, Drag Coefficient, Reynolds stress, Hot-Wire Anemometer.

۱- مقدمه

نیروها و گشتاورهای اعمالی از طرف جریان هوا بر روی جسم، از پارامترهای مهم اندازه‌گیری در آیرودینامیک است. به‌طور کلی، نیروهای اعمالی از طرف جریان هوا به مدل، به سه روش اندازه‌گیری و بررسی می‌شوند که عبارتند از ۱- اندازه‌گیری ممنتوم در ناحیه دیناله جسم، ۲- اندازه‌گیری توزیع فشار بر روی سطح مدل، ۳- اندازه‌گیری مستقیم نیروها و گشتاورها با استفاده از بالانس‌ها. هرکدام از روش‌های فوق دارای مزایا و معایب خاص خود می‌باشد و در موارد مختلفی می‌توانند به کار روند. در روش اندازه‌گیری ممنتوم، با اندازه‌گیری جریان هوا پایین‌دست مدل، می‌توان نیروی پسا را اندازه‌گیری نمود. مزیت استفاده از روش اندازه‌گیری ممنتوم، این است که در این روش، می‌توان به بررسی کمی و کیفی جریان هوا در ناحیه دیناله پشت مدل، نظیر توزیع سرعت، شدت اغتشاش‌ها و... پرداخت که در دو روش دیگر این امکان وجود ندارد [۱] و [۲]. همچنین استفاده از روش‌های بالانس و اندازه‌گیری توزیع فشار، برای برخی از مدل‌ها و بخصوص مدل‌های با ابعاد کوچک، مشکل می‌باشد.

در رابطه با روش اختلاف ممنتوم، تحقیقات متعددی انجام گرفته است. ون‌دم [۳]، با اعمال معادلات پیوستگی و بقاء ممنتوم خطی به حجم کنترلی که جسم را در بر گرفته و با در نظر گرفتن مقدار تنش‌های رینولدز ضریب نیروی پسا را مطابق معادله زیر ارائه کرد:

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

$p_{s,e}$ فشار استاتیکی در ناحیه خارج از دیناله یا بالادست مدل، $p_{s,w}$ فشار استاتیکی در ناحیه دیناله مدل، U سرعت محلی، U_∞ سرعت جریان آزاد، q_∞ فشار دینامیکی جریان آزاد، y فاصله قائم در راستای عمود بر دیناله، τ_{xx} تنش برشی و L نیز طول مشخصه مدل می‌باشد که برای استوانه قطر آن در نظر گرفته می‌شود. مقدار τ_{xx} را می‌توان بصورت مجموع تنش‌های لزجی و تنش‌های رینولدز مطابق معادله زیر بیان نمود:

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

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 تراکم‌ناپذیر، نوسانات چگالی را می‌توان ناچیز در نظر گرفت. از این رو معادله (۱) را می‌توان به صورت زیر باز نویسی کرد:

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

معادله (۳) به معادله ون‌دم مشهور است. این معادله را در هر نقطه‌ای در پایین‌دست مدل که مقادیر جریان هوا را بتوان در آنجا به‌طور دقیق اندازه‌گیری نمود، کاربرد دارد. با توجه به معادله (۳)، می‌توان آن را به سه انتگرال تقسیم نمود که انتگرال اول آن، عبارت اختلاف فشار، انتگرال دوم عبارت اختلاف ممنتوم و انتگرال سوم عبارت تنش‌های رینولدز می‌باشد. از آنجا که اندازه‌گیری دقیق فشار استاتیکی در ناحیه دیناله جسم دشوار است، گلدشتاین [۴] فشار استاتیکی در ناحیه دیناله را مطابق معادله (۴)، به‌صورت شدت اغتشاش‌های سه بعدی در نظر گرفت و ضریب نیروی پسا را مطابق معادله (۵) ارائه نمود:

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

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

w' ، v' نوسانات عرضی سرعت جریان هوا می‌باشند. معادله (۵) به معادله اصلاح شده ون‌دم مشهور است. با فرض شدت اغتشاش‌های همگن و یا به عبارت دیگر $u' = v' = w'$ ، معادله (۵) ساده شده و می‌توان با استفاده از جریان‌سنج سیم-داغ با پراب یک بعدی و فقط با اندازه‌گیری شدت اغتشاش‌ها در جهت جریان، ضریب نیروی پسا را به‌دست آورد. لو و براگ [۵]، با استفاده از روش اختلاف ممنتوم، ضریب پسای استوانه که ناحیه دیناله آن بسیار مغشوش و سه بعدی است را با استفاده از معادله اصلاح شده ون‌دم بررسی نمودند. آنها با استفاده از لوله پیتوت، و جریان‌سنج سیم‌داغ، فشار دینامیکی و مولفه‌های نوسانی سرعت جریان را اندازه‌گیری کرده، و نیروی پسای استوانه را به‌دست‌آوردند. در فاصله‌های نزدیک استوانه سهم عبارت تنش رینولدز بالا بوده و با افزایش فاصله در پایین دست این مقدار کاهش یافته است. آنتونیا و راجاگوپالان [۶]، ضریب نیروی پسای استوانه را در عدد رینولدز ۵۶۰۰ و تا فاصله ۶۰ برابر قطر در پایین دست آن، با استفاده از جریان‌سنج سیم‌داغ با پراب دو بعدی اندازه‌گیری نمودند. در فاصله $X/D=5$ ، عبارت تنش‌های رینولدز تقریباً سهمی حدود ۲۲٪ از کل ضریب پسا را دارد و این مقدار با افزایش فاصله از استوانه کاهش می‌یابد، بطوری که در $X/D=20$ این عبارت تنها حدود ۵٪ از مقدار کل ضریب پسا را به خود اختصاص داده است

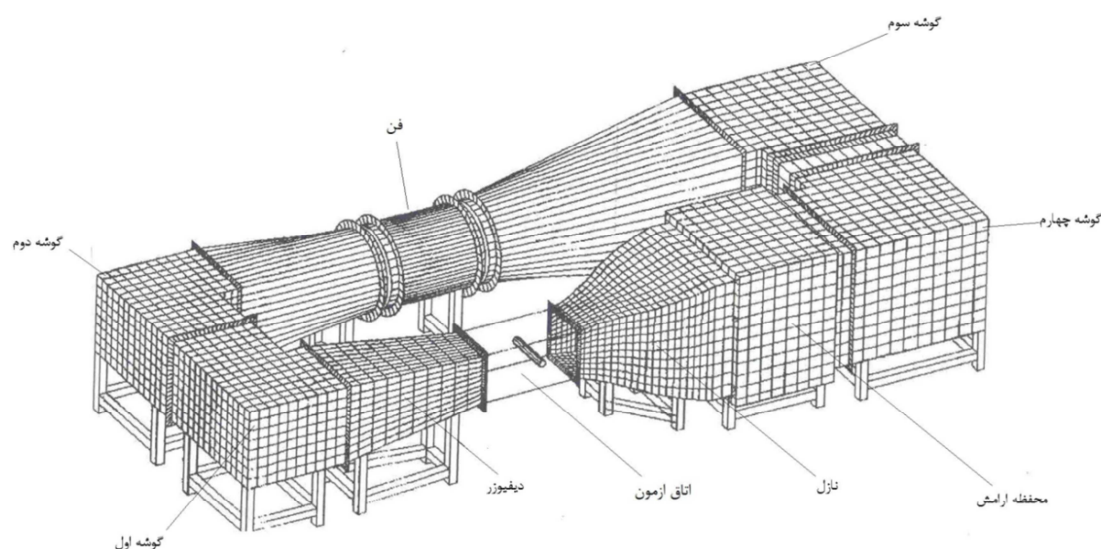
با توجه به بحث‌ها و تحقیقات انجام گرفته، در صورتی که بخواهیم با استفاده از روش اختلاف ممنتوم، ضریب نیروی پسا را برای جریانهایی که اغتشاش آنها زیاد و غیرهمگن است، اندازه‌گیری کنیم، باید در فواصل مناسب در پایین دست، اندازه‌گیری‌های لازم انجام شود. در صورتیکه نیاز باشد در فاصله نزدیکتر نیروی پسا اندازه‌گیری شود، لازم است علاوه بر

(۱) تونل باد 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. این تونل باد دارای فن به قطر ۱۰۵ سانتی متر 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 شده است. به منظور 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 بی بعد 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 $X=50$ سانتی متری در بالادست مرکز اتاق آزمون (U_0) بی بعد شده است.

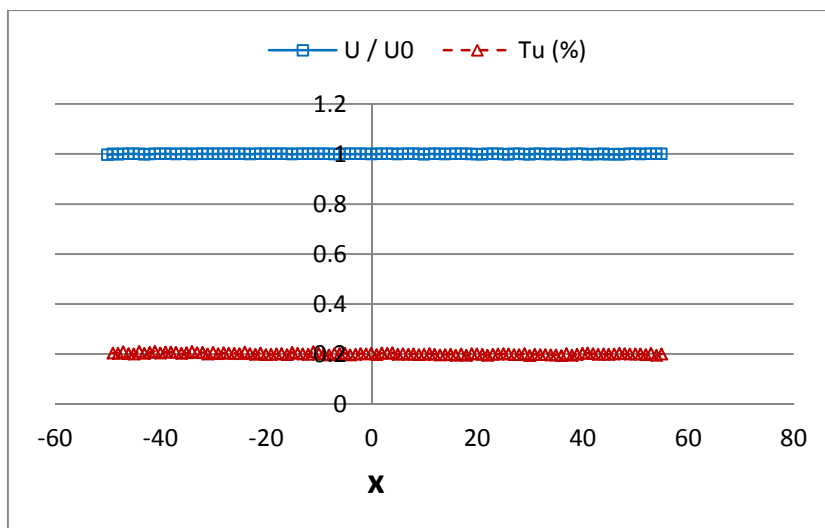
اندازه‌گیری سرعت جریان هوا، تنش‌های رینولدز نیز اندازه‌گیری شوند. بنابراین شناخت تنش‌های رینولدز و مقدار آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در صورتیکه اغتشاش‌های جریان هوا در ناحیه پایین دست مدل همگن شود، می‌توان تنها با استفاده از جریان سنج سیم داغ با پراب یک بعدی [۷]، ضریب نیروی پسا را اندازه‌گیری نمود. در این مقاله جریان پایین دست مفتول در اعداد رینولدز مختلف بررسی شده و با استفاده از نتایج آن می‌توان تشخیص داد در چه فاصله‌ای مجاز هستیم با استفاده از جریان سنج سیم داغ با پراب یک بعدی، ضریب نیروی پسا را اندازه‌گیری کنیم. همچنین در این مقاله توزیع سرعت جریان هوا و شدت اغتشاش‌های آن در پایین دست مفتول در اعداد رینولدز مختلف اندازه‌گیری و ارائه شده است.

۲- روش آزمایش

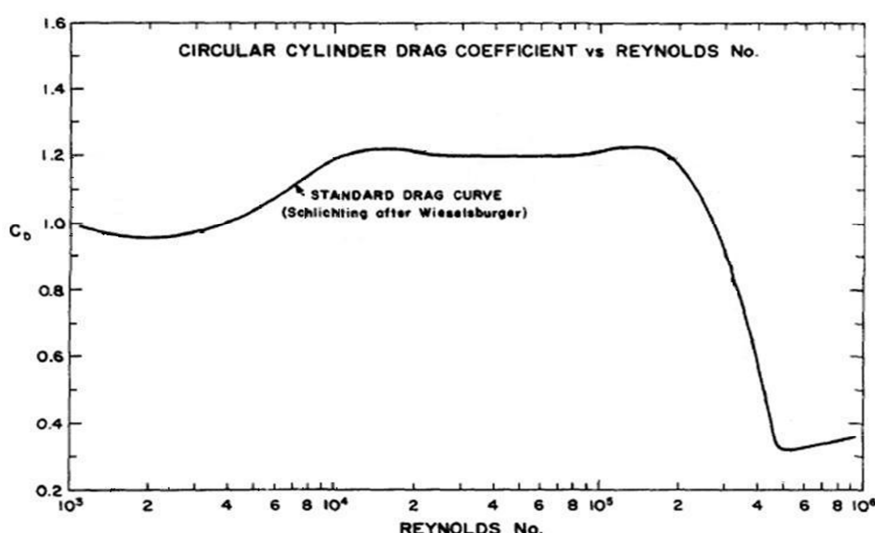
کلیه آزمایش‌ها با استفاده از تونل باد مدار بسته در سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران انجام پذیرفته است. شکل



شکل ۱- تونل باد مدار بسته



شکل ۲- تغییرات سرعت جریان هوا و شدت اغتشاش‌های آن در امتداد اتاق آزمون، $10/5 \text{ m/s}$



شکل ۳- منحنی ضریب نیروی پسا بر حسب عدد رینولدز برای استوانه [۸]

همانگونه که در شکل (۲) نشان داده شده است، تغییرات سرعت و یا به عبارت دیگر گرادین فشار در این منطقه ناچیز می‌باشد. به منظور اندازه‌گیری پروفیل سرعت جریان هوا و شدت اغتشاش‌ها در پایین دست مفتول، از دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ ساخت شرکت فراسنجش 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 سیم‌داغ از طریق کارت A/D (آنالوگ به دیجیتال) به رایانه ارسال و توسط نرم افزار Flow Ware تجزیه و تحلیل می‌شود. برای جابجایی پراب از مکانیزم انتقال‌دهنده استفاده شده است که دقت این مکانیزم ۰/۱ میلی‌متر در سه جهت می‌باشد. حرکت این مکانیزم

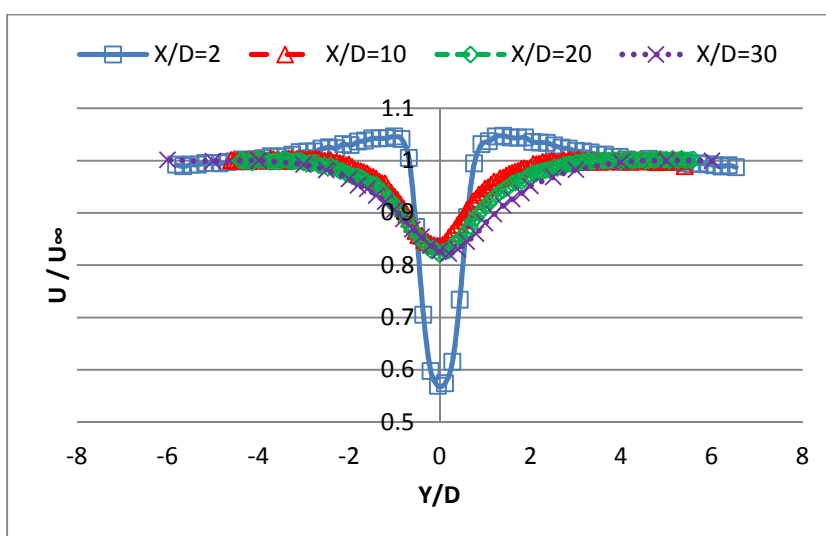
جدول ۱- مشخصات مفتول‌های مورد آزمایش و سرعت جریان هوا

ردیف	قطر (mm)	سرعت جریان هوا (m/s)	عدد رینولدز	ضریب نیروی پسا مطابق منحنی شلیختینگ
۱	۳	۱۰	۱۵۷۰	۰/۹۶
۲	۳	۱۵	۲۳۶۰	۰/۹۸
۳	۳	۲۰	۳۱۴۰	۰/۹۹
۴	۱۰	۱۰	۵۲۳۵	۱/۰۵
۵	۱۰	۱۵	۷۸۵۳	۱/۱۲
۶	۱۰	۲۰	۱۰۴۷۰	۱/۲

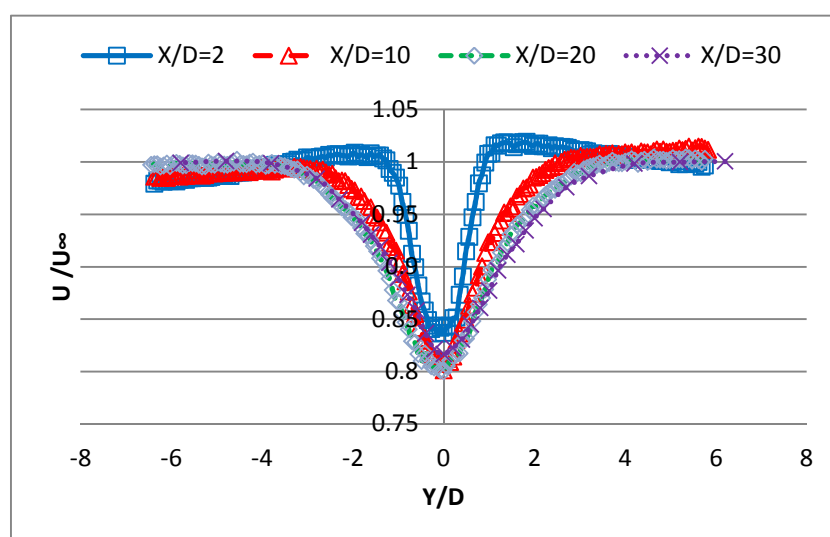
۳- بررسی نتایج آزمایش

همانگونه که بیان شد، آزمایش‌ها در اعداد رینولدز مختلف انجام شده است. حداقل عدد رینولدز برابر ۱۵۷۰ و حداکثر ۱۰۴۷۰ می‌باشد. ضریب نیروی پسا در عدد رینولدز ۱۵۷۰ برابر ۰٫۹۶ و برای عدد رینولدز ۱۰۴۷۰ برابر ۱٫۲ می‌باشد. اگرچه داده‌های زیادی به دست آمده است، ولی داده‌های مربوط به این دو عدد رینولدز به صورت تفصیلی ارائه می‌شود.

انتقال‌دهنده توسط رایانه و نرم‌افزار کنترل می‌شود. همچنین از لوله استاتیکی پیتوت به همراه مبدل الکترونیکی فشار، به منظور اندازه‌گیری فشار کل جریان هوا استفاده شده است. سیم‌های مورد استفاده در این آزمایش، از نوع مفتول به قطر ۳ و ۱۰ میلی‌متر بوده و آزمایش‌ها در اعداد رینولدز مختلف انجام شده است. جدول (۱) مشخصات مفتول‌های مورد آزمایش و سرعت جریان هوا را نشان می‌دهد. همچنین ضریب نیروی پسای مفتول‌های فوق، طبق منحنی ارائه شده توسط شلیختینگ [۸]، در جدول ارائه شده است. توزیع سرعت و شدت اغتشاش‌های آن در پایین‌دست مفتول و در فاصله‌های بی‌بعد شده (X/D) ، ۲، ۵، ۷، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ اندازه‌گیری شده است.



شکل ۴- توزیع سرعت بی‌بعد شده در فواصل مختلف پایین دست مفتول برای عدد رینولدز ۱۵۷۰

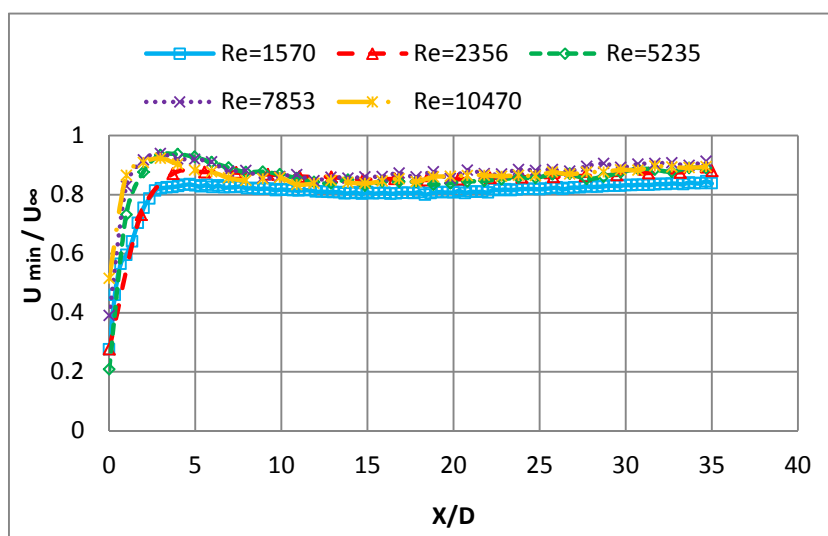


شکل ۵- توزیع سرعت بی‌بعد شده در فواصل مختلف پایین دست مفتول برای عدد رینولدز ۱۰۴۷۰

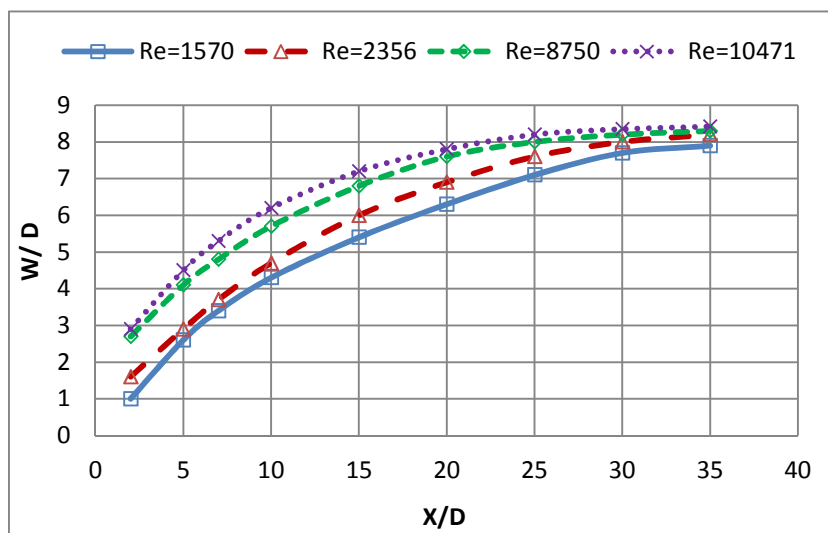
همانطور که در مقدمه بیان شد، به منظور اندازه‌گیری ضریب نیروی پسای مفتول و یا هر جسم دیگر، نیاز است که عبارت‌های اختلاف فشار، اختلاف ممنتوم و تنش‌های رینولدز اندازه‌گیری شوند، که مجموع این سه عبارت برابر ضریب نیروی پسای مفتول و یا جسم مورد نظر می‌باشد. برای اندازه‌گیری عبارت اختلاف ممنتوم، نیاز است که سرعت در ناحیه دنباله جسم (مفتول) اندازه‌گیری شود.

شکل (۴)، سرعت‌های بی‌بعد شده در پایین دست مفتول در فواصل بی‌بعد (X/D)، ۲، ۱۰، ۲۰، ۳۰ برای عدد رینولدز ۱۵۷۰ بر حسب فاصله بی‌بعد شده قائم بر ناحیه دنباله (Y/D) را نشان می‌دهد. در فاصله (X/D=۲) جریان علاوه بر نقصان سرعت، دارای سرعت اضافی (سرعت بیشتر از سرعت جریان آزاد) می‌باشد. با افزایش فاصله در پایین دست نقصان سرعت کاهش یافته و پدیده سرعت اضافی نیز از بین می‌رود ولی پهنای ناحیه دنباله افزایش می‌یابد. شکل (۵) نیز توزیع سرعت‌های بی‌بعد شده در فواصل مختلف پایین دست مفتول و در عدد رینولدز ۱۰۴۷۰ را نشان می‌دهد. مشابه شکل (۴)، در نزدیکی مفتول (X/D=۲) سرعت اضافی با شدت کمتری مشاهده می‌شود. به منظور بررسی دقیق‌تر توزیع سرعت در پایین دست مفتول، بیشترین نقصان سرعت و یا کمترین سرعت در ناحیه دنباله پایین دست مفتول بررسی می‌شود. شکل (۶)، تغییرات کمترین سرعت بی‌بعد شده در پایین دست مفتول برای اعداد رینولدز مختلف را نشان می‌دهد. مطابق شکل (۶)، نقصان سرعت در نزدیکی مفتول زیاد بوده و با افزایش فاصله در پایین دست این مقدار کاهش می‌یابد. هنگامیکه $X/D > 8$ می‌شود کمترین سرعت در ناحیه دنباله به مقدار حدود ۰٫۸۲ سرعت جریان آزاد

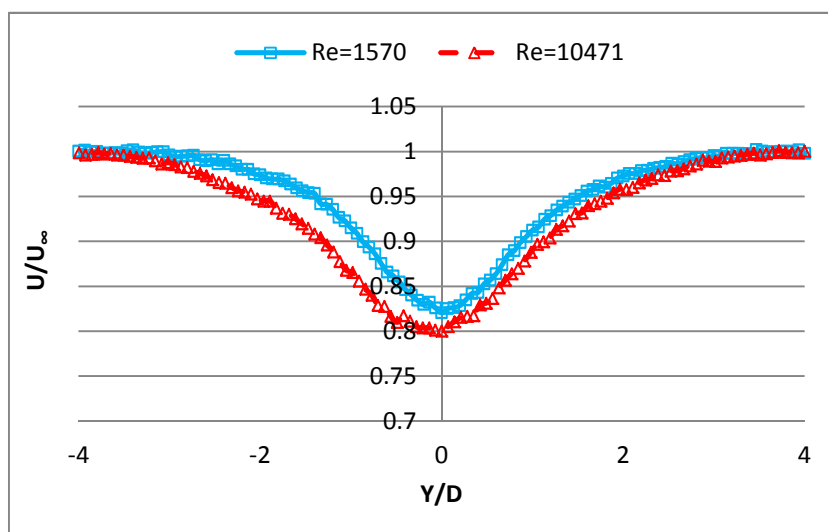
می‌رسد و با افزایش فاصله پایین دست مقدار آن تقریباً ثابت می‌ماند. لازم به ذکر است در فواصل کمتر از (X/D=۴) پروفیل سرعت، دارای جریان اضافی (سرعت بیشتر از جریان آزاد) می‌باشد. پهنای ناحیه دنباله نیز اهمیت زیادی در اندازه‌گیری عبارت اختلاف ممنتوم دارد. شکل (۷)، توزیع پهنای ناحیه دنباله پایین دست مفتول را در اعداد رینولدز مختلف نشان می‌دهد. مطابق شکل (۷)، پهنای ناحیه دنباله، با افزایش فاصله در پایین دست مفتول، افزایش می‌یابد. پهنای ناحیه دنباله تا $X/D=20$ ، با شیب نسبتاً زیادی افزایش یافته و پس از آن روند افزایش با شیب کمتری ادامه می‌یابد. همچنین پهنای ناحیه دنباله با افزایش عدد رینولدز، افزایش یافته است. شکل (۸)، توزیع سرعت در فاصله $X/D=20$ ، در اعداد رینولدز ۱۵۷۰ و ۱۰۴۷۰ را نشان می‌دهد. مطابق شکل (۸)، نقصان سرعت در ناحیه دنباله برای عدد رینولدز ۱۰۴۷۰ مقداری بزرگتر، و پهنای ناحیه دنباله در همان عدد رینولدز، بیشتر است. در نتیجه ضریب نیروی پسای عدد رینولدز ۱۰۴۷۰ مقدار بیشتری خواهد بود. این موضوع با توجه به شکل (۳) توجیه‌پذیر است. با توجه به شکل‌های (۴) و (۵) می‌توان عبارت اختلاف ممنتوم در معادلات (۱) و (۵) را به دست آورد. توزیع ضریب نیروی پسای ناشی از اختلاف ممنتوم در پایین دست مفتول بر حسب (X/D) برای اعداد رینولدز مختلف در شکل (۹) نشان داده شده است. مطابق شکل (۹)، مقدار ضریب نیروی پسای ناشی از اختلاف ممنتوم در فاصله‌های نزدیک به مفتول یا کمتر از $X/D=5$ ناچیز بوده و حدود سهمی کمتر از ۵٪ ضریب نیروی پسای خود اختصاص می‌دهد.



شکل ۶- تغییرات کمترین سرعت بی‌بعد شده، در پایین دست مفتول برای اعداد رینولدز مختلف



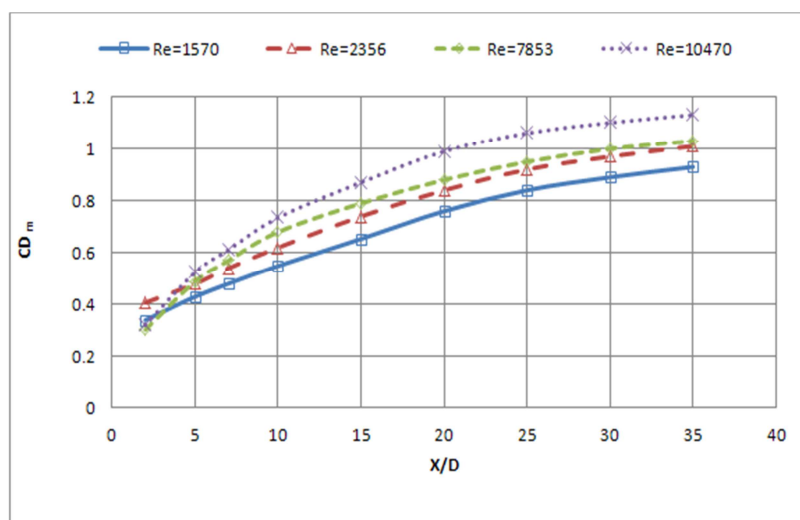
شکل ۷- توزیع پهنای بی بعد شده ناحیه دنباله مفتول، برای اعداد رینولدز مختلف



شکل ۸- توزیع سرعت بی بعد شده در فاصله ۲۰ برابر قطر پایین دست مفتول برای رینولدزهای (۱۵۷۰) و (۱۰۴۷۰).

(۱) همخوانی دارد. عبارت مهم دیگر برای اندازه گیری ضریب نیروی پسا، عبارت تنش های رینولدز می باشد. طبق معادله (۳)، عبارت تنش های رینولدز اثر کاهنده روی ضریب نیروی پسا دارد. در صورتیکه طبق معادله وندم اصلاح شده یا معادله (۵)، بخواهیم عبارت اختلاف فشار در ناحیه دنباله را بر حسب شدت اغتشاش ها بیان کنیم، مجبور به اندازه گیری سه بعدی شدت اغتشاش ها هستیم و در این حالت اثر آن مطابق معادله (۵)، مثبت خواهد بود.

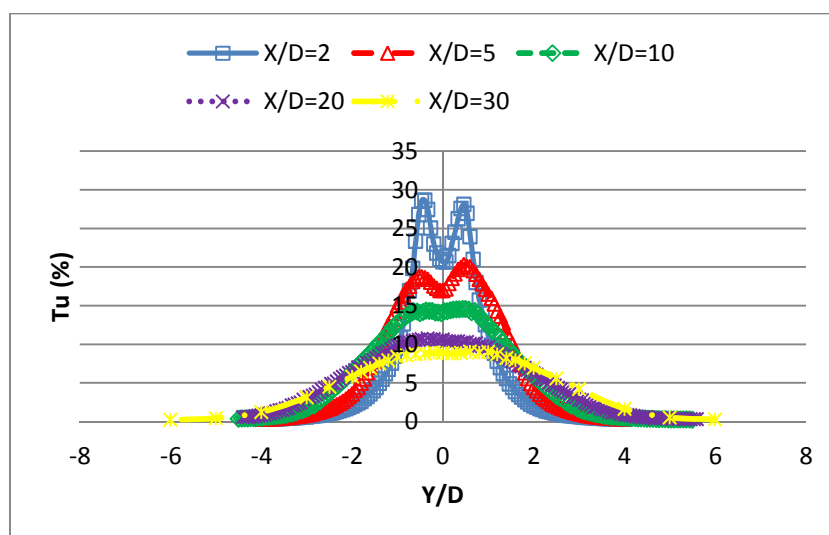
با افزایش فاصله در پایین دست، مقدار ضریب نیروی پسا ناشی از ممنتوم افزایش یافته و در فاصله $X/D=20$ ، این عبارت معادل ۸۲٪ ضریب نیروی پسا می باشد. با افزایش بیشتر فاصله در پایین دست مفتول، شیب افزایش ضریب نیروی پسای ناشی از ممنتوم، کاهش یافته ولی همچنان روند آن صعودی می باشد. به طوری که در فاصله ۳۵ برابر قطر پایین دست مفتول، این مقدار به حدود ۹۳٪ ضریب پسا می رسد. همانطور که در شکل (۹) مشاهده می شود، ضریب نیروی پسای ناشی از ممنتوم وابسته به عدد رینولدز بوده به طوری که در عدد رینولدز ۱۵۷۰ و در $X/D=35$ ، برابر ۰/۹۳ و در عدد رینولدز ۱۰۴۷۰ برابر ۱/۱۳ می باشد، که این موضوع بیان کننده تغییرات ضریب نیروی پسا با عدد رینولدز بوده و با مقادیر ارائه شده در شکل (۳) و جدول



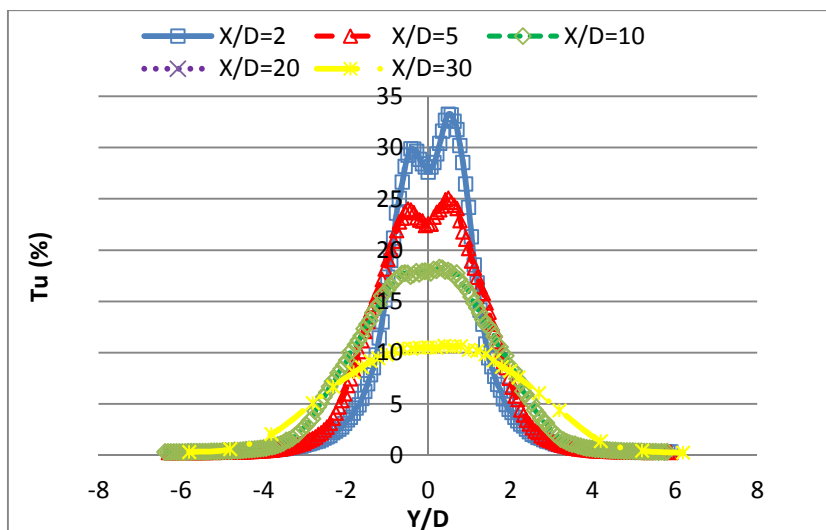
شکل ۹- توزیع ضریب نیروی پسای ناشی از اختلاف ممنتوم بر حسب فاصله در پایین دست مفتول برای اعداد رینولدز مختلف

داده شده، در نزدیکی مفتول شدت اغتشاش‌ها زیاد بوده و حدود ۳۵٪ است. در فواصل بسیار نزدیک به مفتول $X/D=2$ ، شدت اغتشاش‌ها در مرکز ناحیه دنباله بیشینه نبوده ولی با افزایش پایین دست، $X/D > 10$ بیشینه مقدار شدت اغتشاش‌ها در مرکز ناحیه دنباله اتفاق افتاده و از شدت آنها کاسته می‌شود. به منظور بررسی دقیق‌تر تغییرات شدت اغتشاش‌ها در پایین‌دست مفتول، در شکل (۱۲)، توزیع حداکثر شدت اغتشاش‌های جریان هوا در پایین دست مفتول برای اعداد رینولدز مختلف نشان داده می‌شود.

در این حالت حتماً باید از جریان‌سنج سیم‌داغ با پراب سه بعدی استفاده شود که مشکلات زیادی به همراه دارد. در صورتی که در ناحیه‌ای پایین دست مفتول شدت اغتشاش‌های جریان هوا همگن شود، می‌توان با استفاده از یک پراب یک بعدی، اغتشاش‌های جریان را اندازه‌گیری نموده و عبارت‌های اختلاف فشار و تنش‌های رینولدز را مطابق فرضیه گلدشتاین یا معادله (۴) مشخص نمود. بدین منظور توزیع شدت اغتشاش‌های جریان در فواصل مختلف پایین‌دست مفتول در عدد رینولدز ۱۵۷۰ در شکل (۱۰) و در عدد رینولدز ۱۰۴۷۰ در شکل (۱۱) نشان داده شده است. شدت اغتشاش‌ها طبق رابطه



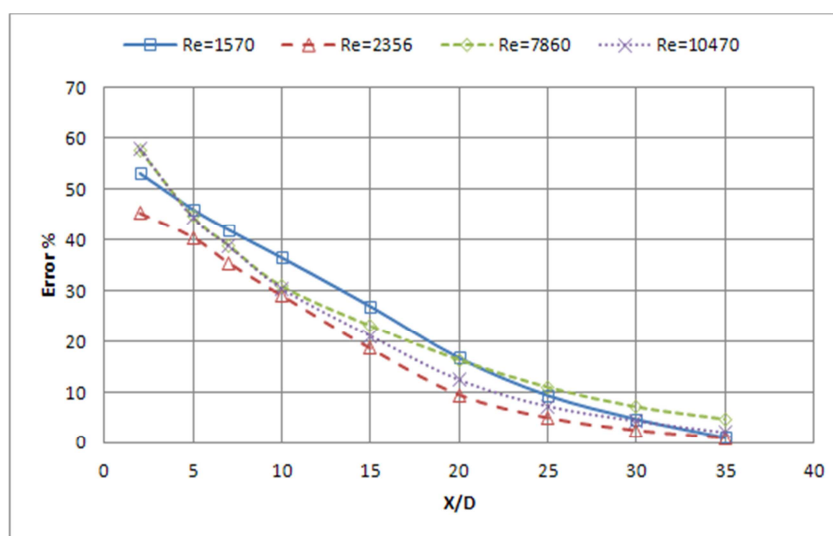
شکل ۱۰- توزیع شدت اغتشاش‌ها در فواصل مختلف پایین‌دست مفتول در رینولدز ۱۵۷۰



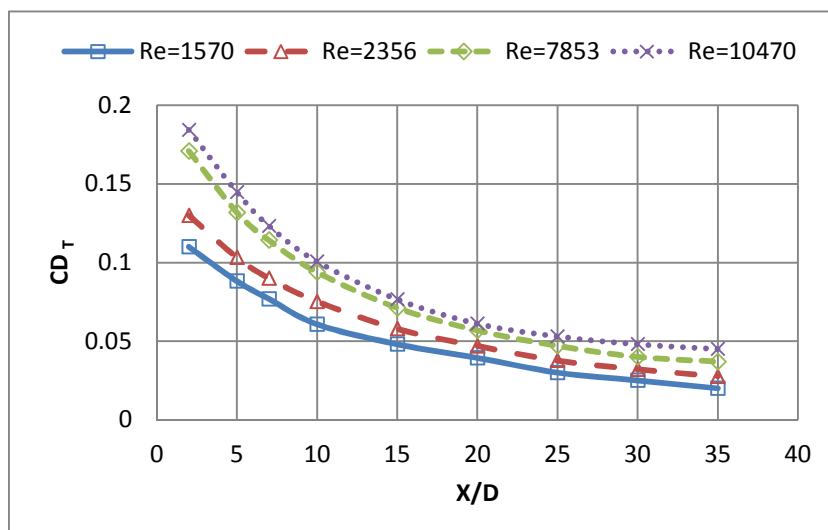
شکل ۱۱- توزیع شدت اغتشاش‌ها در فواصل مختلف پایین‌دست مفتول در رینولدز ۱۰۴۷۱

رینولدز برای اعداد رینولدز مختلف را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود، مقدار ضریب نیروی پسا ناشی از تنش‌های رینولدز در فواصل نزدیک به مفتول زیاد بوده و با افزایش فاصله در پایین دست (X/D)، کاهش می‌یابد. تا $X/D=20$ این کاهش شدید بوده، و پس از آن روند کاهش با شیب کمتری ادامه می‌یابد. همچنین با افزایش عدد رینولدز، ضریب نیروی پسا ناشی از تنش‌های رینولدز افزایش می‌یابد. به طوری که مقدار آن در $X/D=2$ برای عدد رینولدز ۱۰۴۷۰، برابر ۰٫۱۸۵ و در فاصله $X/D=35$ حدود ۰٫۰۴۱ خواهد بود.

مطابق شکل (۱۲)، شدت اغتشاش‌ها در نزدیکی مفتول بالا بوده و حدود ۳۵٪ است و با افزایش فاصله در پایین‌دست تا $X/D=20$ ، شدت اغتشاش‌ها با شیب نسبتاً زیادی کاهش یافته و به حدود ۱۰٪ تا ۱۳٪ می‌رسد. با افزایش بیشتر فاصله در پایین دست، این شیب کاهش یافته و در $X/D=35$ به حدود ۸٪ تا ۱۱٪ کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که حداکثر مقدار شدت اغتشاش‌ها وابسته به عدد رینولدز می‌باشد. هنگامی که عدد رینولدز از ۱۵۷۰ به ۱۰۴۷۰ افزایش می‌یابد، شدت اغتشاش‌ها در فاصله $X/D=35$ از ۸٪ به ۱۱٪ افزایش می‌یابد. شکل (۱۳)، توزیع ضریب نیروی پسا ناشی از تنش‌های



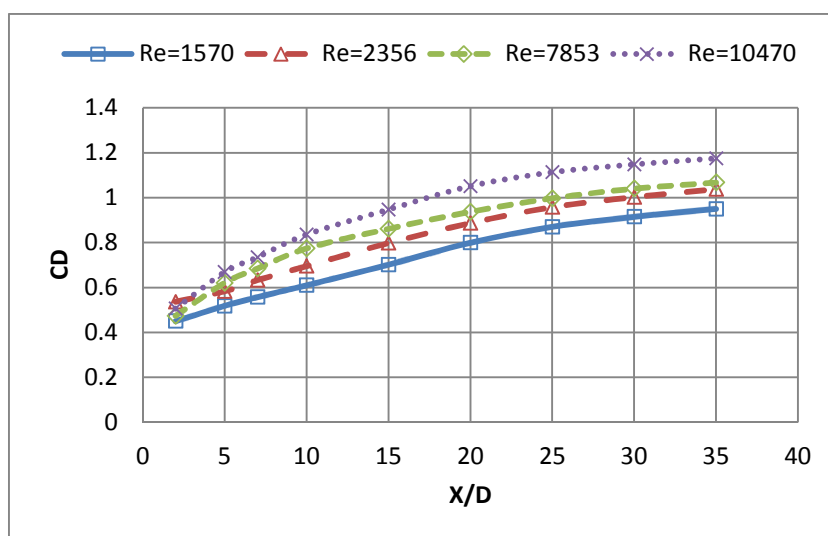
شکل ۱۲- توزیع حداکثر اغتشاش جریان هوا در پایین‌دست مفتول برای اعداد رینولدز مختلف



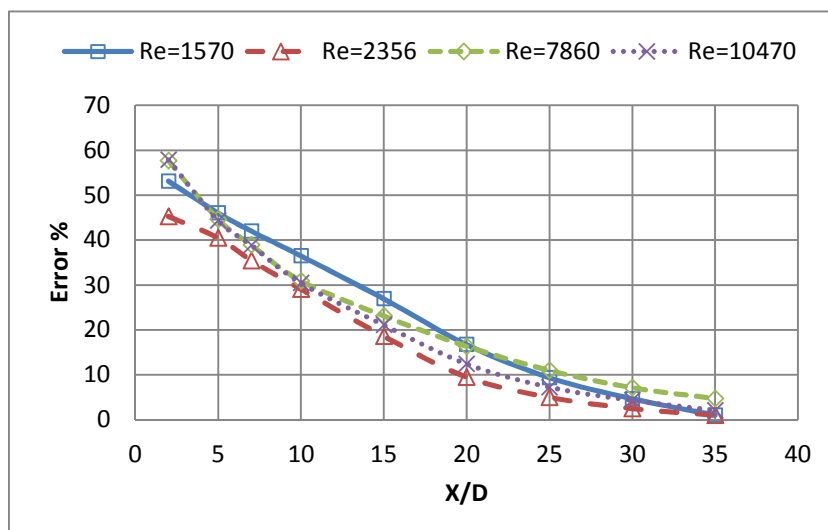
شکل ۱۳- توزیع ضریب نیروی پسا ناشی از تنش های رینولدز در پایین دست مفتول برای اعداد رینولدز مختلف

صورتی که اندازه گیری های اختلاف ممنوم و تنش های رینولدز در فاصله $X/D=2$ انجام شود، خطایی حدود ۴۵٪ تا ۶۰٪ خواهیم داشت. این موضوع نشان دهنده آن است که اغتشاش های جریان هوا همگن نبوده و نمی توان در این نواحی از جریان سنج سیم داغ با پراب یک بعدی استفاده کرد. با افزایش فاصله در پایین دست، خطای اندازه گیری کاهش یافته به طوریکه در فاصله $X/D=20$ مقدار خطا حدود ۱۰٪ تا ۱۵٪، و در فاصله $X/D=35$ برابر ۱٪ تا ۸٪ می باشد. این خطا نیز بستگی به عدد رینولدز داشته و با افزایش عدد رینولدز این خطا تا حدی افزایش می یابد. در این حالت می توان شدت اغتشاش های جریان هوا را تقریباً همگن فرض کرد.

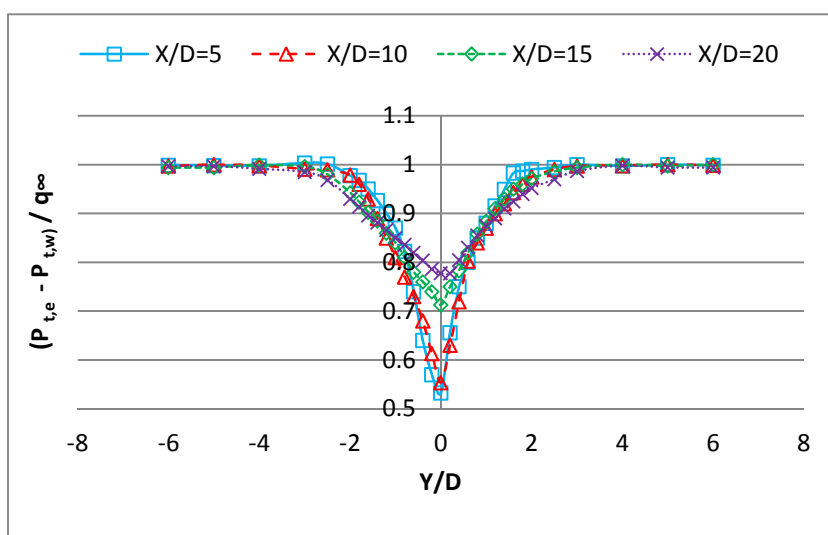
لازم به ذکر است که در فواصل نزدیک به مفتول، اغتشاش های جریان هوا همگن نمی باشد [۶]. در صورتیکه اغتشاش های جریان در پایین دست مفتول همگن فرض شود، می توان از معادله وندم اصلاح شده برای مشخص نمودن ضریب نیروی پسا استفاده کرد. شکل (۱۴) نتایج حاصل از معادله (۵) را نشان می دهد. مطابق شکل (۱۴) در فواصل نزدیک به مفتول، ضریب نیروی پسا بسیار کوچکتر از مقدار واقعی است و با افزایش فاصله در پایین دست به مقدار واقعی نزدیک می شود. شکل (۱۵)، خطای اندازه گیری ضریب نیروی پسا در پایین دست مفتول برای اعداد رینولدز مختلف بر حسب مکان اندازه گیری بی بعد شده (X/D) را نشان می دهد. مطابق شکل (۱۵)، در



شکل ۱۴- توزیع ضریب نیروی پسای مفتول در فواصل مختلف پایین دست برای اعداد رینولدز مختلف



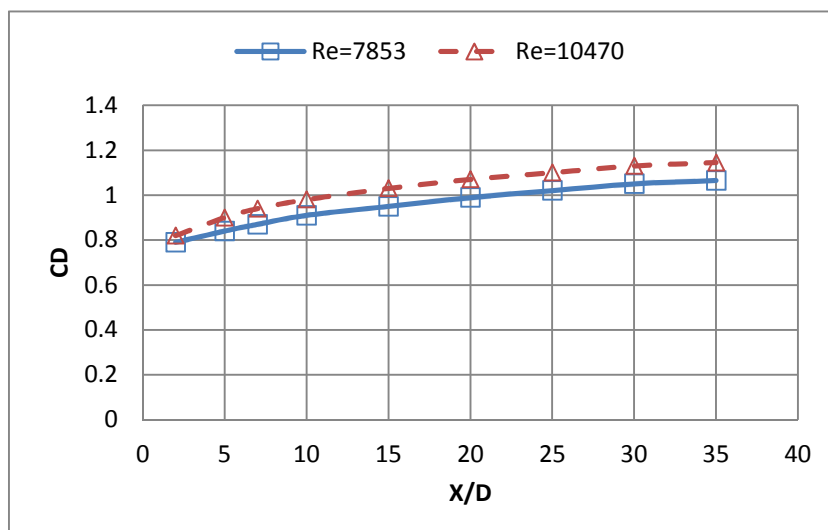
شکل ۱۵- خطای اندازه‌گیری ضریب نیروی پسی مفتول در اعداد رینولدز مختلف



شکل ۱۶- توزیع فشار کل بی‌بعد شده در فواصل مختلف پایین‌دست مفتول برای عدد رینولدز ۱۰۴۷۰

امری دشوار می‌باشد، لذا در صورتیکه بخواهیم تنها با استفاده از پراب یک بعدی شدت اغتشاش‌های جریان را اندازه‌گیری کنیم، داده‌گیری باید در فاصله کافی پایین دست مفتول انجام شود، یعنی در مکانی که شدت اغتشاش‌ها تقریباً همگن می‌شوند. اگر فشار کل جریان هوا در ناحیه دنباله با استفاده از لوله پیتوت اندازه‌گیری شود، در این حالت عبارت‌های اختلاف ممنتوم و اختلاف فشار مطابق معادله (۶) توأمأ اندازه‌گیری می‌شوند. توزیع فشار کل بی‌بعد شده در فواصل مختلف پایین‌دست مفتول برای عدد رینولدز ۱۰۴۷۰، در شکل ۱۶ نشان داده می‌شود.

با توجه به شکل (۱۲)، می‌توان نتیجه گرفت هنگامی که شدت اغتشاش‌ها حدود ۱۰٪ یا کمتر از آن باشد، خطای اندازه‌گیری نیز کمتر از ۱۰٪ خواهد بود. همانگونه که بیان شد، برای اندازه‌گیری ضریب نیروی پسا، باید سه عبارت اختلاف ممنتوم، اختلاف فشار و تنش‌های رینولدز را اندازه‌گیری نمود. با استفاده از فرضیه گلدشتاین، می‌توان عبارت اختلاف فشار را به صورت شدت اغتشاش‌ها تبدیل کرده و مطابق معادله (۵) با اندازه‌گیری سه بعدی شدت اغتشاش‌ها، ضریب نیروی پسا را اندازه‌گیری نمود. با توجه به اینکه اندازه‌گیری سه بعدی شدت اغتشاش‌ها



شکل ۱۷- ضریب نیروی پسای مفتول با استفاده از اندازه‌گیری فشار کل توسط لوله پیتوت، و در نظر گرفتن تنش‌های رینولدز

فاصله در پایین دست، پروفیل سرعت به تدریج به پروفیل سرعت جریان آزاد نزدیک‌تر شده و مقدار ضریب نیروی پسا به نتایج حاصل از معادله (۶) نزدیک می‌شود. همچنین لازم به ذکر است در فواصل نزدیک به مفتول که شدت اغتشاش‌های جریان هوا بالا است، اندازه‌گیری با لوله پیتوت نیز با خطا همراه است.

۴- نتیجه‌گیری

یکی از روش‌های اندازه‌گیری نیروی پسا، اندازه‌گیری به روش اختلاف ممنوم می‌باشد. در این روش با اندازه‌گیری توزیع سرعت و شدت اغتشاش‌های جریان سیال پایین‌دست مدل می‌توان نیروی پسا را اندازه‌گیری نمود. در این مقاله جریان هوا پایین‌دست مفتول به قطر ۳ و ۱۰ میلی متر، در اعداد رینولدز ۱۵۷۰ تا ۱۰۴۷۰ به صورت تجربی و با استفاده از جریان‌سنج

سیم‌داغ بررسی شده و نتایج زیر حاصل شد:

به منظور اندازه‌گیری ضریب نیروی پسا با استفاده از روش اختلاف ممنوم نیاز است که عبارت‌های توزیع سرعت، توزیع شدت اغتشاش‌های جریان هوا و توزیع فشار استاتیکی در ناحیه دنباله، پایین‌دست مفتول اندازه‌گیری شوند. با استفاده از لوله استاتیکی پیتوت، می‌توان فشار استاتیکی و سرعت جریان هوا را توأماً اندازه‌گیری نمود، در صورتیکه با استفاده از جریان‌سنج سیم‌داغ می‌توان، توزیع سرعت جریان هوا و شدت اغتشاش‌های آن را به سادگی اندازه‌گیری نمود، ولی اندازه‌گیری توزیع فشار استاتیکی در ناحیه دنباله با این روش امکان‌پذیر نمی‌باشد. لذا برای حل این مشکل، می‌توان با استفاده از فرضیه گلدشتاین، توزیع فشار استاتیکی را با شدت اغتشاش‌های جریان هوا معادل‌سازی نموده و با استفاده از پراب سه بعدی، مولفه‌های اغتشاشی جریان هوا را اندازه‌گیری نمود.

همانطور که در شکل (۱۶) مشاهده می‌شود، مقدار نقصان فشار کل در فواصل نزدیک به مفتول زیاد بوده و با افزایش فاصله در پایین‌دست به تدریج کاهش می‌یابد. همچنین پهنای ناحیه دنباله در فاصله $X/D=5$ کوچک بوده و با افزایش پایین‌دست، پهنای دنباله به تدریج افزایش می‌یابد. با انتگرال‌گیری از توزیع فشار کل در شکل (۱۶)، و با در نظر گرفتن معادله (۶)، می‌توان عبارت‌های ضریب نیروی پسا ناشی از اختلاف فشار و اختلاف ممنوم را توأماً مشخص نمود، همچنین با در نظر گرفتن تنش‌های رینولدز طبق معادله (۳)، می‌توان ضریب نیروی پسای مفتول را اندازه‌گیری نمود.

$$\int \left(\frac{P_{t,e} - P_{t,w}}{q_\infty} \right) d\left(\frac{y}{L}\right) = \int \left(\frac{P_{s,e} - P_{s,w}}{q_\infty} \right) d\left(\frac{y}{L}\right) + \int \left(1 - \left(\frac{U}{U_\infty} \right)^2 \right) d\left(\frac{y}{L}\right) \quad (۶)$$

شکل (۱۷) ضریب نیروی پسای مفتول را نشان می‌دهد. مطابق شکل (۱۷)، ضریب نیروی پسا در فاصله $X/D=5$ حدود ۰/۸ بوده و با افزایش فاصله در پایین‌دست مفتول، مقدار ضریب نیروی پسا افزایش یافته و به مقدار واقعی نزدیک می‌شود. خطای موجود در فواصل نزدیک به مفتول را می‌توان با در نظر گرفتن اختلاف معادلات (۶) و (۳) توجیه کرد. اختلاف این دو معادله در مقدار دبی جرمی هوای خروجی از سطوح جانبی حجم کنترلی است که جسم را دربر گرفته است. به طوری که مطابق معادله (۶)، هیچ جریان هوایی از سطوح جانبی حجم کنترل خارج نمی‌شود. مقدار دبی جرمی که از دیواره‌های جانبی حجم کنترل خارج می‌شود [۹] عبارتست از:

$$\dot{m} = \rho \int_0^H (U_\infty - U) \cdot l \cdot d(y) \quad (۷)$$

که در آن H ارتفاع حجم کنترل و l عرض حجم کنترل می‌باشد. هر چه مقدار دبی جرمی که از سطوح جانبی حجم کنترل خارج شود کمتر باشد، استفاده از معادله (۶) صحیح‌تر است. با افزایش

از ۵٪ کاهش می‌یابد. که در این شرایط حداکثر شدت اغتشاش‌ها حدود ۱۰٪ می‌باشد.

هنگامی که ضریب نیروی پسا با استفاده از لوله استاتیکی پیتوت اندازه‌گیری شود، در فواصل نزدیک به مفتول خطای اندازه‌گیری حدود ۳۰٪ الی ۳۵٪ بوده که با افزایش فاصله در پایین‌دست این خطا به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. در فاصله حدود $X/D=20$ خطای فوق کمتر از ۱۲٪ می‌باشد. علت این خطا را می‌توان ناشی از مقدار دبی جرمی هوایی دانست که از سطوح جانبی حجم کنترل خارج می‌شود. هرچه این جریان جرمی کمتر باشد، خطای اندازه‌گیری نیز کمتر خواهد بود. با افزایش فاصله در پایین‌دست مفتول، توزیع سرعت جریان هوا به توزیع سرعت جریان آزاد نزدیک‌تر شده و در نتیجه مقدار دبی هوای خروجی از سطوح جانبی حجم کنترل کاهش خواهد یافت. به طوریکه در فاصله حدود $X/D=35$ خطای اندازه‌گیری به حدود ۶٪ کاهش می‌یابد.

۵- نمادها

H	ارتفاع حجم کنترل
l	عرض حجم کنترل
L	طول مشخصه مدل
$p_{s,e}$	فشار استاتیکی در ناحیه خارج از دنباله یا بالادست
$p_{s,w}$	مدل فشار استاتیکی در ناحیه دنباله مدل
q_{∞}	فشار دینامیکی جریان آزاد
U	سرعت محلی
U_{∞}	سرعت جریان آزاد
u'	نوسان سرعت جریان هوا در جهت جریان آزاد
y	فاصله قائم در راستای عمود بر دنباله
v', w'	نوسانات عرضی سرعت جریان هوا
τ_{xx}	تنش برشی
ρ'	نوسانات چگالی

مراجع

- [1] Pope A., and Goin K.L., "Low Speed Wind Tunnel Testing", 2nd Edition, John Wiley and Sons, Inc., 1984.
- [2] Ardakani M. A., Low-speed wind tunnel (design principles and application), KN Toosi University. (in Persian). 2008.
- [3] van Dam C. P., "Recent Experience With Different Methods of Drag Prediction," Progress in Aerospace Sciences 35, pp. 751-798, 1999.
- [4] 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, pp. 570-575, 1936.

- با بررسی توزیع سرعت در پایین‌دست مفتول مشخص شد، که در نواحی نزدیک به مفتول، جریان هوا علاوه بر نقصان سرعت در دنباله، دارای جریان اضافی (سرعت بیشتر از جریان آزاد) نیز می‌باشد. با افزایش فاصله بی‌بعد شده در پایین‌دست مفتول، نقصان سرعت در دنباله کاهش یافته و در فاصله حدود $X/D=8$ به مقدار ۰٫۸ تا ۰٫۹ رسیده و پس از آن ثابت می‌ماند. شایان ذکر است که این مقدار بستگی به عدد رینولدز داشته، و با افزایش عدد رینولدز به مقدار ۰٫۹ نزدیک می‌شود. پهنای ناحیه دنباله با افزایش فاصله بی‌بعد X/D در پایین‌دست مفتول و با افزایش عدد رینولدز، افزایش می‌یابد. افزایش پهنای ناحیه دنباله تا فاصله $X/D=20$ با شیب نسبتاً زیادی همراه است و پس از آن روند افزایش با شیب کمتری ادامه می‌یابد.
- ضریب نیروی پسا ناشی از عبارت اختلاف ممنتوم (در نظر نگرفتن فشار و تنش‌های رینولدز)، با افزایش فاصله بی‌بعد X/D در پایین‌دست مفتول، افزایش می‌یابد. در فاصله حدود $X/D=2$ ضریب نیروی پسا ناشی از اختلاف ممنتوم حدود ۳۰٪ از ضریب نیروی پسای مفتول را شامل می‌شود. با افزایش بیشتر فاصله در پایین‌دست این مقدار افزایش می‌یابد. به طوریکه در فاصله $X/D=20$ ، ضریب نیروی پسا ناشی از اختلاف ممنتوم حدود ۸۰٪ تا ۸۵٪ از ضریب نیروی پسای مفتول را شامل می‌شود. این مقدار در فاصله $X/D=35$ به حدود ۹۶٪ افزایش می‌یابد.
- عبارت تنش‌های رینولدز اهمیت زیادی در اندازه‌گیری صحیح ضریب نیروی پسا دارد. شدت اغتشاش‌های جریان هوا در فاصله حدود $X/D=2$ ، برابر ۳۰٪ الی ۳۵٪ می‌باشد. با افزایش فاصله در پایین‌دست از شدت اغتشاش‌های جریان هوا کاسته می‌شود. تا فاصله حدود $X/D=20$ از شدت اغتشاش‌ها تا مقدار زیادی کاسته شده و پس از آن روند کاهش با شیب کمتری ادامه می‌یابد. در فاصله $X/D=35$ ، شدت اغتشاش‌ها حدود ۸٪ الی ۱۲٪ بوده که بستگی به عدد رینولدز دارد.
- استفاده از جریان‌سنج سیم‌داغ با پراب یک بعدی به منظور اندازه‌گیری ضریب نیروی پسا، هنگامی صحیح است که اغتشاش‌های جریان هوا همگن شود. در این حالت می‌توان با استفاده از فرضیه گلداشتاین و با اندازه‌گیری توزیع سرعت جریان هوا، ضریب نیروی پسا را به‌دست آورد. هر چقدر شدت اغتشاش‌های جریان هوا کمتر باشد، فرض همگن بودن اغتشاش‌های آن صحیح‌تر است. هنگامی که از جریان‌سنج سیم‌داغ با پراب یک بعدی استفاده شود، ضریب نیروی پسای اندازه‌گیری شده در فواصل کمتر از $X/D=5$ ، دارای خطایی حدود ۴۵٪ تا ۵۸٪ می‌باشد. در فاصله $X/D=20$ خطای اندازه‌گیری به حدود ۱۰٪ تا ۱۵٪ کاهش یافته که بستگی به عدد رینولدز دارد. برای فواصل بزرگتر از $X/D=25$ ، این خطا به کمتر

- [5] Biao Lu and Michael B. Bragg., "Experimental Investigation of the Wake Survey Method for a Bluff Body With a Highly Turbulent Wake", 20th AIAA Applied Aerodynamics Conference, ISBN:978-1-62410-110-6
- [6] Antonia R. A. and Rajagopalan , S., "Determination of Drag of a Circular Cylinder," AIAA Journal, Vol.28, No.10, pp.1833-1834, 1990.
- [7] Ardekani M. A., Hot-Wire Anemometer, KN Toosi University. (in Persian) 2006.
- [8] Schlichting H., Boundary-Layer theory, 7th ed. New York: MacGraw-Hill, 1969.
- [9] Kusunose K. "Drag Prediction based on a wake integral method", AIAA Paper 96-2482, June 1998.