

بررسی تجربی اندازه‌گیری نیروی پسای اجسام پهن با استفاده از روش اختلاف مومنتوم

محمد جواد ایزدی یزدی^{۱*}، عبدالامیر بک خوشنویس^۲

۱- مربی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ورامین-پیشوا، تهران

۲- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار

دریافت: زمستان ۹۶ پذیرش: بهار ۹۷

چکیده

یکی از روش‌های اندازه‌گیری نیروی پسای اجسام، روش اختلاف مومنتوم می‌باشد. در این روش با استفاده از توزیع سرعت و شدت اغتشاش‌های جریان سیال در پایین‌دست مدل، می‌توان نیروی پسای اجسام را اندازه‌گیری کرد. در این تحقیق تجربی، شدت اغتشاش‌های جریان هوا در پایین‌دست مدل (استوانه بیضوی و دایره‌ای)، 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 پایین‌دست استوانه بیضوی و دایره‌ای با افزایش فاصله (x/B) کاهش می‌یابند. به‌طوری‌که حداکثر شدت اغتشاش‌ها در فاصله ۲۰ برابر قطر پایین‌دست استوانه دایره‌ای، با توجه به عدد رینولدز، به حدود ۱۴٪ کاهش یافته و خطا در حدود ۲٪ می‌باشد و برای استوانه بیضوی، به حدود ۱۰٪ کاهش یافته و خطا در حدود ۲٪ می‌باشد. در فاصله ۲۵ برابر قطر پایین‌دست استوانه دایره‌ای و بیضوی، حداکثر شدت اغتشاش‌ها به ترتیب حدود ۱۲٪ و ۸٪ کاهش یافته و خطای اندازه‌گیری ضریب نیروی پسای حدود ۱٪ می‌باشد. در این تحقیق، توزیع سرعت و شدت اغتشاش‌های جریان هوا در پایین‌دست استوانه در اعداد رینولدز ۱۵۰۰ و ۳۰۰۰ با استفاده از جریان‌سنج سیم داغ بررسی شده است.

*عهده‌دار مکاتبات: javadezadi2014@gmail.com

کلیدواژه‌گان: توزیع سرعت، شدت اغتشاش‌ها، ضریب نیروی پسای تنش‌های رینولدز، جریان‌سنج سیم داغ.

Experimental Investigation of Bluff Bodies Drag Measurement Using the Wake Survey

است، گلدشتاین^۲ [۴] فشار استاتیکی ناحیه دنباله را مطابق معادله ۴، به صورت شدت اغتشاش‌های سه‌بعدی در نظر گرفت و ضریب نیروی پسا را مطابق معادله ۵ ارائه نمود.

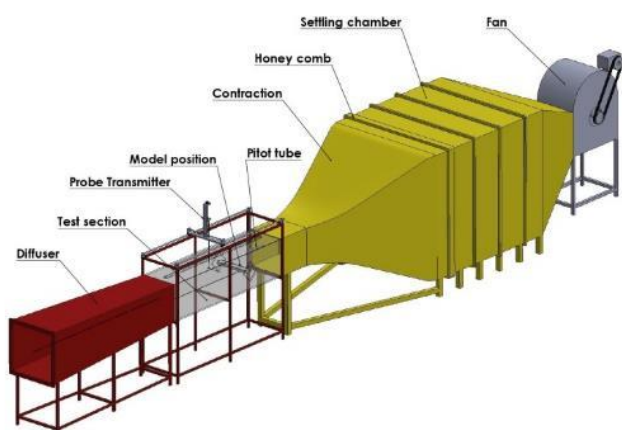
$$p_{s,e} = p_{s,w} + q' \quad , \quad q' = \frac{1}{2} \rho (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (۴)$$

$$C_d = 2 \int \frac{U}{U_\infty} \left(1 - \frac{U}{U_\infty}\right) d\left(\frac{y}{L}\right) + \int \left(\frac{\overline{v'^2} + \overline{w'^2} - \overline{u'^2}}{U_\infty^2}\right) d\left(\frac{y}{L}\right) \quad (۵)$$

v', w' نوسانات عرضی سرعت جریان هوا می‌باشند. معادله ۵ به معادله‌ی اصلاح شده ون دام مشهور است. با فرض شدت اغتشاش‌های همگن و یا به عبارت دیگر $u' = v' = w'$ ، معادله ۵ ساده شده و 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. لو^۳ و برگ^۴ [۵]، با استفاده از روش اختلاف مومنتوم، ضریب پسی استوانه که ناحیه دنباله آن بسیار مغشوش و سه‌بعدی است را با استفاده از معادله اصلاح شده ون دام بررسی نمودند. آن‌ها با استفاده از لوله پیتوت و جریان‌سنج سیم داغ، فشار دینامیکی و مؤلفه‌های نوسانی سرعت جریان را اندازه‌گیری کرده و نیروی پسی استوانه را به دست آوردند. در فاصله‌های نزدیک به استوانه سهم عبارت تنش رینولدز بالا بوده و با افزایش فاصله در پایین‌دست این مقدار کاهش یافته است.

اردکانی^۵ و ایروانی^۶ [۶]، به بررسی تجربی جریان هوا در پایین‌دست سیم‌های چند رشته‌ای پرداختند. آن‌ها با استفاده از روش اختلاف مومنتوم ضریب نیروی پسا برای سیم‌های چند رشته‌ای و مقتول را اندازه‌گیری و مقایسه کردند. نشان دادند که در عدد رینولدز ۲۰۰۰، ضریب نیروی پسی سیم چند رشته‌ای ۱۶٪ از مقتول بزرگ‌تر است که این مقدار با افزایش عدد رینولدز کاهش می‌یابد. همچنین اردکانی و همکاران [۷] به بررسی ضریب پسا در سیم‌های چند رشته‌ای

تجزیه و تحلیل می‌شود. برای جابجایی پراب از مکانیزم انتقال‌دهنده استفاده شده است که دقت این مکانیزم 0.01 میلی‌متر در سه جهت می‌باشد. حرکت این مکانیزم انتقال‌دهنده توسط رایانه و نرم‌افزار کنترل می‌شود. همچنین از لوله استاتیکی پیتوت به همراه مبدل الکترونیکی فشار، به‌منظور اندازه‌گیری فشار کل جریان هوا استفاده شده است. استوانه بیضوی مورد استفاده در این آزمایش، از جنس آلومینیوم با آلیاژ ۷۰۲۳ به قطر بزرگ $42/4$ میلی‌متر و ارتفاع سطح مقطع $21/2$ میلی‌متر و طول 390 میلی‌متر بوده و آزمایش‌ها در اعداد رینولدز 15000 و 30000 (بر اساس ارتفاع سطح مقطع استوانه $Re = U_{\infty} B / \nu$) انجام شده است. جدول ۱ مشخصات استوانه‌های مورد استفاده و سرعت جریان هوا را نشان می‌دهد. همچنین ضریب نیروی پسای استوانه‌های فوق، طبق منحنی‌های ارائه شده توسط لیندزی^۱ [۱۷] (برای استوانه بیضوی) و شلیختینگ^۲ [۱۸] (برای استوانه دایره‌ای) به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴، در جدول ارائه شده است. توزیع سرعت و شدت اغتشاش‌های آن در پایین‌دست استوانه و در فاصله‌های بی‌بعد شده 25 و 10 ، 15 ، 20 ، 5 ، $2/5$ ، 1 ، $x/B=0/25$ ، اندازه‌گیری شده است.



شکل ۱ تونل باد دمنده مورد استفاده در آزمایش شامل اجزاء: ۱- فن سانتریفیوژ ۲- دیفیوزر ۳- توری ۴- لانه زنبوری ۵- اتاق آرامش ۶- نازل ۷- اتاق آزمون ۸- استوانه دایره‌ای.

جریان‌سنج سیم داغ با پراب دوبعدی اندازه‌گیری نمودند. در فاصله $x/D=5$ عبارت تنش‌های رینولدز تقریباً سهمی حدود 22% از کل ضریب پسا را دارد و این مقدار با افزایش

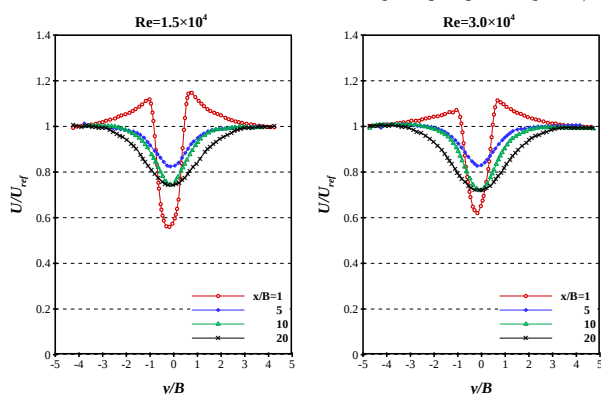
۱	۲۱/۲	۲۱/۲	۱۰	۱۵۰۰۰	۱/۲۱
۱	۲۱/۲	۲۱/۲	۲۰	۳۰۰۰۰	۱/۲
۲	۴۲/۴	۲۱/۲	۱۰	۱۵۰۰۰	۰/۶۲
۲	۴۲/۴	۲۱/۲	۲۰	۳۰۰۰۰	۰/۶۱

۳- نتایج و بحث

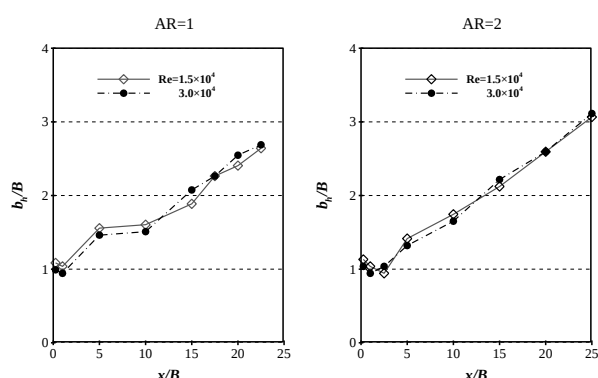
همان گونه که بیان شد، آزمایش ها در اعداد رینولدز ۱۵۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ انجام شده است. ضریب نیروی پسا در عدد رینولدز ۱۵۰۰۰ برای استوانه دایره ای ۱/۲۱ و استوانه بیضوی ۰/۶۲ بوده و برای عدد رینولدز ۳۰۰۰۰ به ترتیب برابر با ۱/۲ و ۰/۶۱ می باشد.

۳-۱- بررسی پروفیل سرعت متوسط

همان طور که در مقدمه بیان شد، به منظور اندازه گیری ضریب نیروی پسا استوانه و یا هر جسم دیگر، نیاز است که عبارت های اختلاف فشار، اختلاف مومنتوم و تنش های رینولدز اندازه گیری شوند که مجموع این سه عبارت برابر ضریب نیروی پسا استوانه و یا جسم مورد نظر می باشد. برای اندازه گیری عبارت اختلاف مومنتوم، نیاز است که سرعت در ناحیه دنباله جسم (استوانه) اندازه گیری شود.

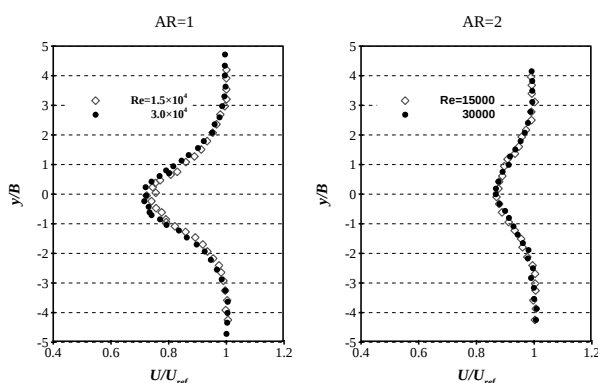


شکل ۵ پروفیل های سرعت متوسط بی بعد شده در فواصل



شکل ۸ توزیع پهنای بی بعد شده ناحیه دنباله استوانه برای اعداد رینولدز مختلف.

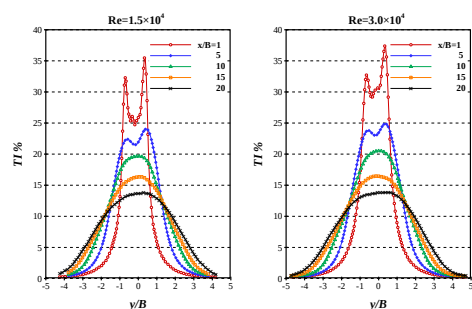
شکل ۹، توزیع سرعت در فاصله $x/B=20$ در اعداد رینولدز ۱۵۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ برای استوانه‌های دایره‌ای و بیضی را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۹، در استوانه دایره‌ای نقصان سرعت در ناحیه دنباله برای عدد رینولدز ۳۰۰۰۰ مقدار بزرگتر و پهنای ناحیه دنباله در همان عدد رینولدز، بیشتر است. در نتیجه ضریب نیروی پسا برای عدد رینولدز ۳۰۰۰۰ مقدار کمتری خواهد بود. این موضوع با توجه به شکل ۴ توجه-پذیر است؛ اما در استوانه بیضی نقصان سرعت در ناحیه دنباله برای هر دو عدد رینولدز تقریباً یکسان می‌باشد.



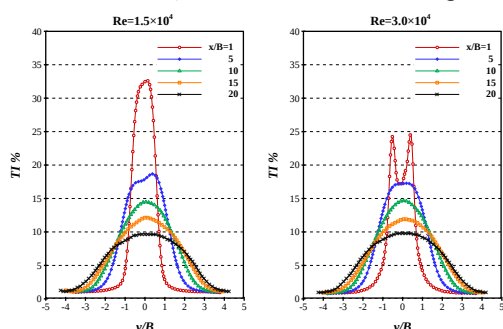
شکل ۹ پروفیل‌های سرعت متوسط بی بعد شده در فاصله ۲۰ برابر قطر استوانه برای اعداد رینولدز مختلف.

با توجه به شکل‌های ۵ و ۶ می‌توان عبارت اختلاف مومنوم در معادلات ۱ و ۵ را به دست آورد. توزیع ضریب نیروی پسای ناشی از اختلاف مومنوم در پایین دست استوانه بر حسب x/B برای اعداد رینولدز مختلف در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۰، مقدار ضریب نیروی پسای ناشی از اختلاف مومنوم در فاصله‌های نزدیک به استوانه یا کمتر از $x/B=5$ ناچیز بوده و حدود سهمی کمتر از ۵۰٪ ضریب نیروی پسا را به خود اختصاص می‌دهد.

۳۰۰۰۰ بر حسب فاصله بی بعد شده قائم بر ناحیه دنباله y/B را نشان می‌دهند. در فاصله $x/B=1$ 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

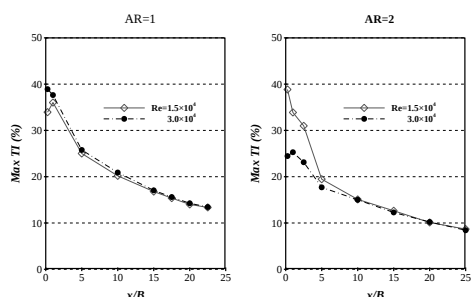


شکل ۱۱ توزیع شدت اغتشاش‌ها در فواصل مختلف پایین‌دست استوانه دایره‌ای.

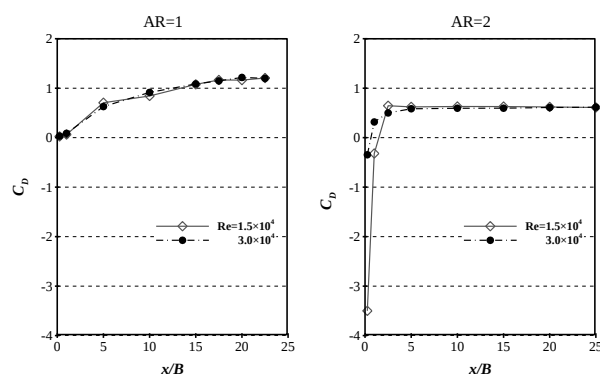


شکل ۱۲ توزیع شدت اغتشاش‌ها در فواصل مختلف پایین‌دست استوانه بیضوی.

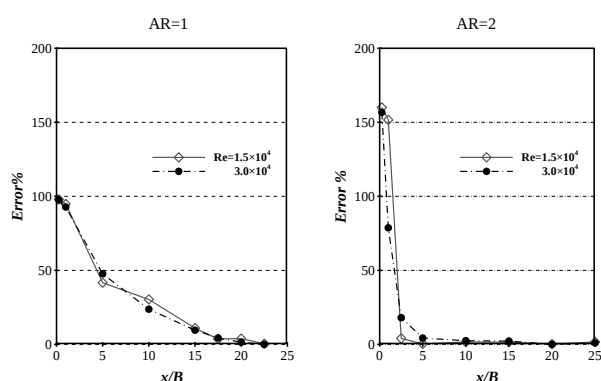
شدت اغتشاش‌ها^۱ طبق رابطه $Tu = \sqrt{(u'^2)} / U_{ref}$ بیان می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود، شدت اغتشاش‌ها در نزدیکی استوانه زیاد بوده و برای استوانه دایره‌ای تا حدود ۳۹٪ افزایش می‌یابد. اما در استوانه بیضوی شدت اغتشاش‌ها با افزایش عدد رینولدز کاهش می‌یابد به طوری که در عدد رینولدز ۱۵۰۰۰ حدود ۳۳٪ و در عدد رینولدز ۳۰۰۰۰ حدود ۲۵٪ می‌باشد. در فواصل بسیار نزدیک به استوانه $x/B=1$ شدت اغتشاش‌ها در مرکز ناحیه دنباله بیشینه نبوده ولی با افزایش پایین‌دست، $x/B > 10$ 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 استوانه، در شکل ۱۳، توزیع حداکثر شدت اغتشاش‌های جریان هوا در پایین‌دست استوانه برای اعداد رینولدز مختلف نشان داده شده است.



جریان هوا همگن نبوده و نمی‌توان در این نواحی از جریان سنج سیم داغ با پراب یک بعدی استفاده کرد. با افزایش فاصله در پایین‌دست، خطای اندازه‌گیری کاهش یافته بطوری‌که در فاصله $x/B=20$ مقدار خطا حدود $1/5\%$ تا 4% برای استوانه دایره‌ای و حدود 2% برای استوانه بیضوی می‌باشد. در این حالت می‌توان شدت اغتشاش‌های جریان هوا را تقریباً همگن فرض کرد.



شکل ۱۵ توزیع ضریب نیروی پسی استوانه در فواصل مختلف پایین‌دست برای اعداد رینولدز مختلف.



شکل ۱۶ خطای اندازه‌گیری ضریب نیروی پسی استوانه در اعداد رینولدز مختلف. با توجه به شکل ۱۶، می‌توان نتیجه گرفت هنگامی‌که شدت اغتشاش‌ها حدود 10% یا کمتر از آن باشد، خطای اندازه‌گیری نیز کمتر از 10% خواهد بود. همان‌گونه که بیان شد، برای اندازه‌گیری ضریب نیروی پسا، باید سه عبارت اختلاف مومنتوم، 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 سه‌بعدی شدت اغتشاش‌ها، ضریب نیروی پسا را اندازه‌گیری نمود. با توجه به اینکه اندازه‌گیری سه‌بعدی شدت اغتشاش‌ها امری دشوار می‌باشد، لذا در صورتی‌که بخواهیم تنها با استفاده از پراب یک‌بعدی شدت اغتشاش‌های جریان را اندازه‌گیری کنیم، داده‌برداری باید در فاصله کافی پایین‌دست مدل انجام شود، یعنی در مکانی که شدت اغتشاش‌ها تقریباً همگن می‌ش

نامطلوبی بر دقت جریان سنج سیم داغ داشته به طوری که خطا برای تغییر ۱ درجه سلسیوس دمای محیط حدود ۲٪ ایجاد می شود که اصلاح نمودن، آن را می تواند به ۰/۱ درصد کاهش دهد [۱۹، ۲۰]. با توجه به توضیح های ارائه شده می توان خطای کلی اندازه گیری را حدود ۳٪ در نظر گرفت.

۵- نتیجه گیری

یکی از روش های اندازه گیری نیروی پسا، اندازه گیری به روش اختلاف مومنوم می باشد. در این روش با اندازه گیری توزیع سرعت و شدت اغتشاش های جریان سیال پایین دست مدل می توان نیروی پسا را اندازه گیری نمود. در این مقاله جریان هوا پایین دست استوانه با سطح مقطع بیضوی و دایره ای، در اعداد رینولدز ۱۵۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ به صورت تجربی و با استفاده از جریان سنج سیم داغ بررسی شده و نتایج زیر حاصل شد:

- به منظور اندازه گیری ضریب نیروی پسا با استفاده از روش اختلاف مومنوم نیاز است که عبارت های توزیع سرعت، توزیع شدت اغتشاش های جریان هوا و توزیع فشار استاتیکی در ناحیه دنباله، پایین دست استوانه اندازه گیری شوند. با استفاده از لوله استاتیکی پیتوت، می توان فشار استاتیکی و سرعت جریان هوا را تماماً اندازه گیری نمود، در صورتیکه با استفاده از جریان سنج سیم داغ می توان توزیع سرعت جریان هوا و شدت اغتشاش های آن را به سادگی اندازه گیری نمود، ولی اندازه گیری توزیع فشار استاتیکی در ناحیه دنباله با این روش امکان پذیر نمی باشد. لذا برای حل این مشکل، می توان با استفاده از فرضیه گلدشتاین، توزیع فشار استاتیکی را با شدت اغتشاش های جریان هوا معادل سازی نموده و با استفاده از پراب سه بعدی، مؤلفه های اغتشاشی جریان هوا را اندازه گیری نمود.

- با بررسی توزیع سرعت در پایین دست استوانه مشخص شد که در نواحی نزدیک به استوانه، جریان هوا علاوه بر نقصان سرعت در دنباله، دارای جریان اضافی (سرعت بیشتر از جریان آزاد) نیز می باشد. با افزایش فاصله بی بعد در پایین دست استوانه، نقصان سرعت در دنباله کاهش یافته و در استوانه دایره ای هنگامی که $x/B > 10$ می شود کمترین سرعت در ناحیه دنباله به مقدار حدود ۰/۷۲ سرعت جریان آزاد و در استوانه بیضوی به مقدار حدود ۰/۸ سرعت جریان آزاد می رسد. با افزایش فاصله پایین دست مقدار آن تقریباً ثابت می ماند. پهنای ناحیه دنباله با افزایش فاصله بی بعد x/B در پایین دست استوانه و با افزایش عدد رینولدز، افزایش می ی

علائم یونانی

 μ لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$) ρ چگالی (kgm^{-3})

زیر نویس ها

 ∞ مقدار کمیت ها در جریان آزاد

ref مقدار کمیت ها در جریان آزاد

۷- مراجع

- [1] W. H. Rae, A. Pope, *Low-speed wind tunnel testing*: John Wiley, 1984.
- [2] M. A. Ardakani, *Low-speed wind tunnel (design principles and application)*, Tehran: Khajeh Nasir Toosi University, 2008. (in Persian)
- [3] C. P. Van Dam, Recent experience with different methods of drag prediction, *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 35, No. 8, pp. 751-798, 1999.
- [4] S. Goldstein, A note on the measurement of total head and static pressure in a turbulent stream, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 155, No. 886, pp. 570-575, 1936.
- [5] B. Lu, M. B. Bragg, Experimental Investigation of the Wake-Survey Method for a Bluff Body with Highly Turbulent Wake, *AIAA-3060*, 2002.
- [6] M. A. Ardakani, E. Irvani, Experimental investigation of airflow at downstream of multi strand cables, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 7, pp. 54-63, 2013. (In Persian)
- [7] M. Ardekani, F. Farhani, A. Nourmohammadi, Experimental study of drag coefficient of multistrand wires using single normal hot-wire anemometer probe, *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 50, pp. 237-244, 2016.
- [8] M. J. Ezadi Yazdi, A. Bak Khoshnevis, Wake-boundary layer interaction behind an elliptic cylinder at different Reynolds numbers, *Journal of Turbulence*, pp. 1-24, 2018.
- [9] M. J. Ezadi Yazdi, A. Bak Khoshnevis, Experimental Investigation of Flow Characteristics around an Elliptic Cylinder Near a Flat Plate, *Fluid Mechanics & Aerodynamics Journal*, Vol. 4, No. 2, pp. 19-35, 2016. (In Persian)
- [10] M. J. Ezadi Yazdi, A. Bak Khoshnevis, Experimental Investigation of Characteristics of the Flow Wake Around an Elliptic Cylinder at Different Reynolds Numbers, <

- Mechanical Engineering*, Vol. 46, No. 2, pp. 19-30, 2016. (In Persian فارسی)
- [17] W. Lindsey, *Drag of cylinders of simple shapes*: Citeseer, 1938.
- [18] H. Schlichting, *Boundary-layer theory*, 1968.
- [19] F. Jorgenson, *How to Measure Turbulence with Hot Wire Anemometers*, *Dantec Dynamics*, 2004.
- [20] S. Yavuzkurt, A guide to uncertainty analysis of hot-wire data, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 106, No. 2, pp. 181-186, 1984.