

## ارایه‌ی روابط جدید برای پیش‌بینی مقادیر مرتبه بالای سرعت در دنباله‌ی تخت پشت یک استوانه دایره‌ای

عبدالامیر بک خوشنویس\*  
محمدرضا ایزدی یزدی  
احسان قلی پوراسرمی

دانشیار، دانشگاه حکیم سبزواری، دانشکده فنی مهندسی  
دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه حکیم سبزواری، دانشکده فنی مهندسی  
دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه حکیم سبزواری، دانشکده فنی مهندسی

### چکیده

در این مقاله به بررسی تجربی وجود همبستگی‌های آماری بین مقادیر مرتبه بالای سرعت مانند تختی (Flatness) و چولگی (Skewness) در دنباله‌ی تخت پشت یک استوانه دایره‌ای پرداخته شده است. جهت اندازه‌گیری مشخصه‌های جریان از دستگاه تونل باد و جریان‌سنج سیم داغ استفاده شده است. شدت اغتشاشات خط آزاد دستگاه تونل باد ۰/۱ درصد می‌باشد که از این نظر دارای دقت بالایی است. عدد رینولدز در این آزمایش‌ها برابر ۲۸۰۰۰ می‌باشد. بر اساس داده‌های خروجی از آزمایش‌ها، منحنی‌های مربوط به مقادیر بی‌بعد تختی و چولگی در نسبت فواصل مختلف ارایه شده است. از مقایسه مقادیر واقعی تختی و چولگی (که از آزمایش‌های تجربی در این تحقیق به دست آمده‌اند) با مقادیر پیش‌بینی شده توسط روابط موجود (که برای لایه مرزی آشفتنه و جت آزاد اثبات شده‌اند) روابطی به دست آمده که مطابقت بیشتری با مقادیر پیش‌بینی شده دارند. برای ارایه روابطی دقیق‌تر، از دو چند جمله‌ای مرتبه دوم و سوم استفاده شده است. مشخص شد که مقادیر مرتبه بالای سرعت با روابط ارایه شده در این تحقیق با دقت بیشتری پیش‌بینی شده‌اند. البته دقت این پیش‌بینی‌ها در نسبت فواصل بزرگ‌تر به‌طور چشمگیری کاهش یافته است.

واژه‌های کلیدی: استوانه دایره‌ای، دنباله جریان، چولگی و تختی، جریان‌سنج سیم داغ.

## Introducing New Relationship Between High-order Moments In the Turbulent Plain Wake Behind a Circular Cylinder

A. B. Khoshnevis  
M. J. Ezadi Yazdi  
E. Gholiepour Asrami

Associate professor, Hakim Sabzevari University, School of Engineering  
M.Sc. Student, Hakim Sabzevari University, School of Engineering  
M.Sc. Student, Hakim Sabzevari University, School of Engineering

### Abstract

In this paper, the existence of statistical relationship between high-order velocity moments as flatness and skewness in the plain wake behind a circular cylinder were studied. Hot-wire anemometer was used to measure turbulent parameters in various situations downstream the flow behind the cylinder. Turbulence intensity of wind tunnel's free line is 0.1 percent which in this sense, it has high accuracy. In these experiments, the Reynolds number is 28000. Non-dimensional values of mean velocity, skewness  $S$  and flatness  $F$  in various  $x/d$ 's has been plotted. By comparing existent relationship for predicting flatness values (which are demonstrated for turbulent boundary layer and free jet) with actual values, it has been found that new relationship can be found which can have much more agreement with their actual cases. Considering this point, and by using fitting method, in this paper some new relationship from which was can predict high-order moments with much more accuracy was provided. Therefore for further accuracy, two polynomial of orders 2 and 3 were used to fit the data which has taken in a wind tunnel. Though the accuracy of these estimations in larger  $x/d$ 's reduces significantly.

**Keywords:** Circular Cylinder, Plain Wake, Skewness and Flatness, Hot Wire Anemometry.

## ۱- مقدمه

اگرچه آشفتگی یکی از مسائل بسیار قدیمی در حوزه مکانیک سیالات می‌باشد اما همچنان حل نشده باقی مانده است. این پدیده در بیشتر مسائل تبدیل انرژی، جریان سیال، سیستم‌های انتقال و ... وجود دارد [۱]. روش ممکن در توصیف آشفتگی با قوانین عمومی مکانیک پیوسته توسط رینولدز در اواخر قرن گذشته پایه‌گذاری شد. در این روش، میدان سرعت آشفته به دو مؤلفه تجزیه می‌شود که یکی مربوط به حرکت میانگین و دیگری مربوط به نوسان‌های وابسته به زمان سرعت سیال است. منطقی‌ترین روش در توصیف آشفتگی مربوط به نظریه‌هایی است که بر پایه‌ی فرضیات آماری مرتبط با معادلات دینامیک جریان سیال شکل می‌گیرند. نظریه‌ی آماری نیازمند اطلاعاتی در مورد ارزیابی تابع توزیع احتمال چگالی و توابع همبستگی متناظر است. توابع همبستگی مراتب بالا (مانند چولگی، تختی و ...) باعث بهبود جامعیت مدل آشفته‌ی خاص از نظر آماری می‌گردد.

آشفتگی ایزوتروپ<sup>۱</sup> و همگن<sup>۲</sup> با یک چولگی منفی در مشتق سرعت  $\partial u_i / \partial x_i$  مشخص می‌شود که  $u_i$  مؤلفه نوسانی سرعت در امتداد  $x_i$  می‌باشد. چولگی مانند زیر تعریف می‌شود [۲]:

$$S = - \frac{\left( \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right)^2}{\left[ \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right)^2 \right]^{3/2}} \quad (1)$$

(به علامت منفی توجه کنید).

در آشفتگی ایزوتروپ و همگن، چولگی، بیانگر تولید گردابی به علت کشیدگی گردابه می‌باشد و مقدار غیر صفر آن از غیرخطی بودن معادله‌ی ناویر استوکس ناشی می‌شود [۳]. پیش‌بینی‌های نظری برای چولگی و وابستگی آن به عدد رینولدز آشفته  $Re_\lambda$ ،  $(Re_\lambda = \lambda u' / \nu)$  که  $u'$  سرعت نوسانی می‌باشد،  $\lambda$  میکرو مقیاس تیلور و  $\nu$  لزجت سینماتیکی است) در گذشته به‌طور وسیعی مورد توجه قرار گرفته است. در حالی که کولموگوروف [۴] استدلال کرده است که چولگی باید ثابت باشد، اما بسیاری از محققان بر اساس مباحث متوالی کولموگوروف [۵] اظهار کرده‌اند که با افزایش  $Re_\lambda$ ، چولگی نیز باید افزایش و یا کاهش یابد [۶].

جریان سنج سیم داغ می‌تواند اندازه‌گیری دقیقی از چولگی، با حلی که تاکنون با دیگر روش‌های تجربی مطابقت داده نشده است را ارائه دهد. با این وجود، وضوح سه بعدی پروب<sup>۳</sup> تأثیر منفی بر تخمین چولگی دارد. در حقیقت، مشتق سرعت تحت تأثیر حرکت مقیاس‌های کوچک<sup>۴</sup> قرار می‌گیرد که باعث ایجاد

مشکل می‌شود. از طرفی، وضوح نمونه‌برداری زمانی سیگنال سرعت نیز بر روی اندازه‌گیری حرکت مقیاس کوچک تأثیر می‌گذارد. با شبیه‌سازی عددی مستقیم حالت آشفتگی، می‌توان به ارزیابی اثرات ناشی از فضای محدود و وضوح موقتی جریان سنج سیم داغ در آزمایش‌ها پرداخت. ایده انجام این کار از چندین مقاله به‌ویژه مرجع‌های [۷، ۸] گرفته شده است. در مرجع‌های [۷، ۸] رویکردی آماری برای پیش‌بینی جریان آشفته بر مبنای دستگاه معادلات دینامیکی از مرتبه دلخواه برای مقادیر مراتب بالای توزیع سرعت آشفتگی معرفی شده است. با استفاده از معادلات معرفی شده در مرجع [۹] و رسم نمودارهای تختی بر حسب چولگی مشخص شده است که مقادیر پیش‌بینی شده برای تختی با مقادیر واقعی مطابقت خوب و دقیقی ندارد. هدف از تحقیق حاضر در واقع بررسی روابط آماری موجود بین مقادیر مرتبه بالای مؤلفه‌های اغتشاشی سرعت و معرفی روابط آماری دقیق‌تر برای پیش‌بینی مقادیر تختی می‌باشد.

## ۲- پیش‌بینی پژوهش

مرور کاملی از روابط آماری موجود بین ممان‌های سرعت مرتبه بالا در جریان درون کانال، لایه مرزی و جت آزاد در مرجع [۱۰] آمده است. آن‌ها با ترکیب داده‌های تجربی خود با نتایج متناظر به دست آمده، روابط زیر برای چولگی و تختی بیان کرده‌اند:

$$F_U \approx 2.65 + 1.625U^2 \quad (2)$$

$$F_V \approx 3.13 + 2.485V^2 \quad (3)$$

برای مؤلفه‌ی سرعت  $U$  در جهت طولی و  $V$  در جهت عرضی داریم:

$$S_j = \frac{\overline{U_j^3}}{\sigma_j^3}, F_j = \frac{\overline{U_j^4}}{\sigma_j^4}, \sigma_j = \sqrt{\overline{U_j^2}} \quad (4)$$

(U: j = 1; V: j = 2)

در کنار روابط (۲) و (۳) برای مقادیر مراتب متوالی درون لایه مرزی روابط خطی بین ممان‌های زوج و فرد مرکزی اثبات شده است. موفقیت درزمینه‌ی اثبات وجود روابط (۲) و (۳) در جریان‌های آشفته‌ی محدود شده، انگیزه‌ای برای انجام دیگر تحقیقات، جهت شکل‌گیری تحلیل‌های مشابه در جریان‌های آزاد بوده است. ماتوویچ از جریان‌سنج تک مؤلفه‌ای لیزری<sup>۵</sup> جهت سنجش روابط (۲) و (۳) در جریان آزاد جت استفاده کرد [۱۱].

مجموعه نتایج به دست آمده، محققان را بر آن داشت که آزمایش‌های مشابهی بر روی جریان‌های آزاد جت انجام دهند [۱۲]. برای این کار آن‌ها از پراب جریان‌سنج سیم داغ  $X$  برای اندازه‌گیری ممان‌های سرعت تا ممان مرتبه شش استفاده کردند

<sup>1</sup> Isotropic Turbulence

<sup>2</sup> Homogeneous

<sup>3</sup> Probe

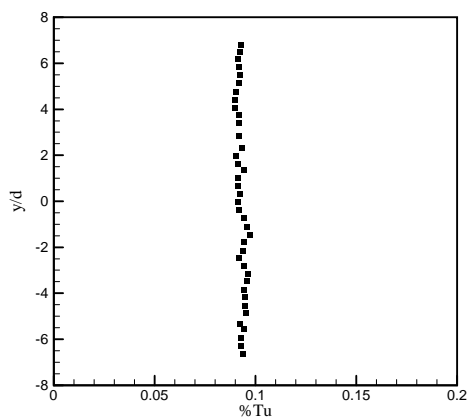
<sup>4</sup> Small Scale Motion

<sup>5</sup> Laser - Doppler

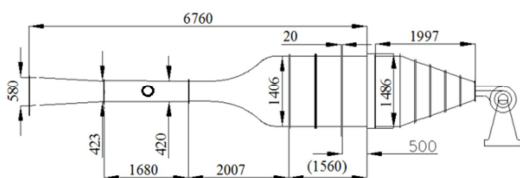
صورت آزمایشگاهی [۱۹-۲۱] و عددی [۲۲-۲۴] نیز ارزیابی شد؛ مجموعه‌های گسترده‌ای از اطلاعات برای S در جریان‌های مختلف در مراجع [۱۷، ۲۰] آورده شده است؛ همچنین مقاله مروری [۲۵] را نیز ببینید. به خاطر داشته باشید که تا امروز مقادیر S در بالاترین  $R_g$  نتایج آزمایشگاهی به دست می‌آیند.

### ۳- تجهیزات آزمایشگاهی و شرایط محیطی

اندازه‌گیری مشخصات جریان در این کار تجربی با استفاده از جریان‌سنج سیم داغ و در تونل بادی با سرعت پایین صورت گرفته است. تونل باد این تحقیق دارای اتاقک آزمایشی به طول ۱۶۸ سانتی‌متر و عرض ۴۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر می‌باشد. طراحی مناسب کانال باعث ایجاد شدت اغتشاشات جریان آزاد در حدود ۰.۱٪ در جهت جریان شده است که دستگاه موردنظر از این نظر دارای دقت بالایی است. در شکل ۱ میزان اغتشاش‌های جریان ورودی در محل استقرار سیلندر نشان داده شده است که در شرایط آزمایش کمتر از ۰.۱ درصد اندازه‌گیری شده است. جریان‌سنج سیم داغ از نوع دما ثابت بوده که دارای یک پروب تک مؤلفه‌ای است. تونل باد و جریان‌سنج سیم داغ این تحقیق ساخت شرکت فرا سنجش صبا می‌باشند [۲۶]. در شکل ۲ نمایی از تونل باد مورد نظر و مدل نصب شده در آن نشان داده شده است.



شکل ۱- نمودار شدت اغتشاش‌ها در محل استقرار سیلندر



شکل ۲- طرحواره تونل باد

در این تحقیق تجربی، آزمایش‌ها در دماهای تقریباً یکنواخت هوای محیط انجام شده است. تغییرات دما در حدود  $\pm 2$  درجه

و به ارزیابی روابط (۲) و (۳) پرداختند. منابع مشابهی وجود دارد که دربردارنده پایگاه کاملی از داده‌ها درزمینه‌ی جریان‌های جت آزاد آشفته می‌باشند [۱۳]. بر اساس این داده‌ها می‌توان گفت که هم جریان محدود و هم جریان آزاد آشفته از روابط یکسان و یا حداقل از روابط بسیار مشابهی از نظر همبستگی‌های مراتب بالای مربوط به مؤلفه‌های سرعت نوسانی پیروی می‌کنند. برای اثبات این موضوع، اندازه‌گیری دقیق میدان سرعت آشفته برای دنباله‌ی تخت، پشت یک استوانه دایره‌ای انجام گرفته است. به روابطی که بر اساس بسط سری‌های گرم-چارلی<sup>۱</sup> شکل گرفته، توجه خاصی شده است. اگرچه آن‌ها با ساختار معادلات ناویر-استوکس متوسط زمانی خود سازگارند، اما همواره برای آن‌ها باید ناحیه‌ی قابل استفاده تعریف گردد که علتش همگرایی ضعیف آن‌ها می‌باشد.

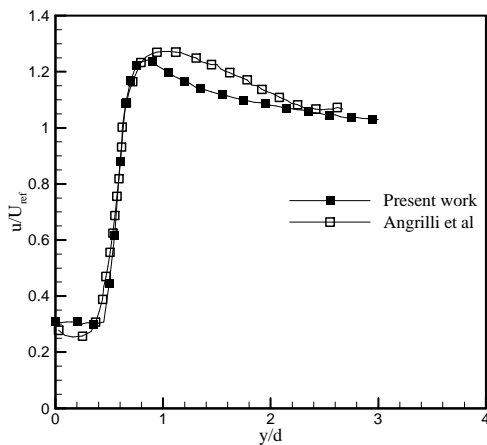
جانسون و همکاران [۱۴] برای لایه مرزی با گرادیان فشار صفر، پارامترهای اغتشاشی سرعت را در بازه اعداد رینولدز،  $2730 < Re_\theta < 2530$  مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها آزمایش‌های خود را با استفاده از جریان‌سنج سیم داغ و فیلم داغ برای اندازه‌گیری تنش برشی دیواره انجام داده و اثرات تغییر عدد رینولدز و اندازه پروب مورد استفاده را بر شدت اغتشاشات، چولگی و تختی جریان بررسی نمودند.

کنستانتین [۱۵]، آبرودینامیک و مشخصات جریان انتقالی از روی سطوح کره و استوانه را در چند نوع زبری مختلف بررسی نمود. او آزمایش‌ها را در ۸ نوع برآمدگی و فرورفتگی مختلف انجام داد و با رابطه‌ای، ضریب چولگی را در هر مورد محاسبه نمود. او همچنین ضریب پسای استوانه را در هر حالت به دست آورد. نتایج نشان داد که برآمدگی روی استوانه سبب افزایش تدریجی ضریب پسا می‌شود و همچنین فرورفتگی ابتدا سبب کاهش و سپس افزایش ضریب پسا گردیده است.

قربانیان و همکاران [۱۶]، آزمایش‌هایی برای بررسی تأثیر نصب سیم اغتشاش ساز بر روی پارامترهای اغتشاشی جریان انجام دادند. آن‌ها با نصب سیم‌هایی با قطرهای متفاوت و همچنین در موقعیت‌های مختلف در تونل باد با سرعت پایین به بررسی تأثیر آن بر روی مشخصه‌های اغتشاشی، بخصوص شدت اغتشاشات پرداختند. نتایج نشان داد وجود این سیم‌ها سبب کاهش شدت اغتشاشات جریان در تونل باد می‌گردد.

جورج [۶] پیشنهاد کرد که حاصلضرب  $SR_g$  باید با تغییر  $R_g$  ثابت بماند. پیش‌بینی‌های مغایر ناشی از کولوموگروف [۴، ۵] باعث بوجود آمدن فعالیت‌های تحقیقاتی بسیاری شده است (مراجع [۱۷] را ببینید که مدل‌های فیزیکی مختلفی را در رابطه با چولگی و تناوب در نظر گرفته است). با این وجود، نلکین [۱۸] ملاحظه کرد که این مسأله حل نشده باقی می‌ماند. رفتار S به

<sup>۱</sup> Gram-Charlier Series



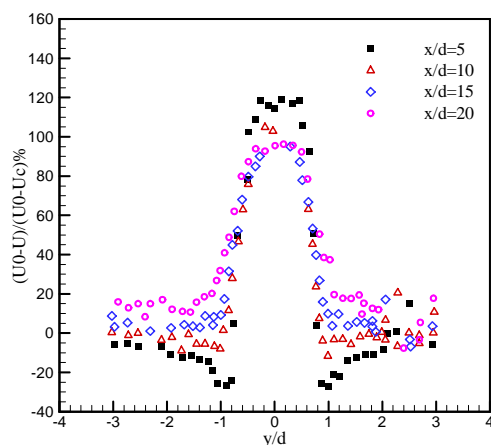
شکل ۴- پروفیل سرعت در ایستگاه  $x/d=1.5$  در  $Re = 4500$ ، برای نتایج مطالعه حاضر و  $Re = 3820$ ، برای نتایج تحقیق انگریلی و همکاران [۲۷]

همان‌طور که مشاهده می‌شود، تطابق بسیار خوبی بین نتیجه کار حاضر و کار انگریلی و همکارانش [۲۷] مشاهده می‌شود.

### ۵- بحث و بررسی نتایج

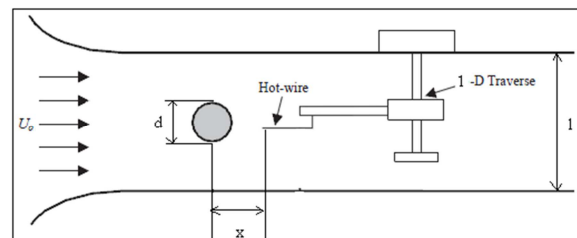
#### ۵-۱- پروفیل مؤلفه‌های سرعت میانگین و اغتشاشات

پروفیل‌های سرعت و اغتشاشات مربوط به چهار نسبت فاصله  $x/d=5, 10, 15$  و  $20$  در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. این پروفیل‌ها با توجه به سرعت میانگین جریان  $U_0 - U_c$  بی‌بعد شده‌اند که  $U_0$  سرعت میانگین جریان آزاد و  $U_c$  سرعت میانگین مرکز دنباله می‌باشند.



شکل ۵- پروفیل‌های بی‌بعد  $U_0 - U/U_0 - U_c$  در چهار ایستگاه پشت استوانه

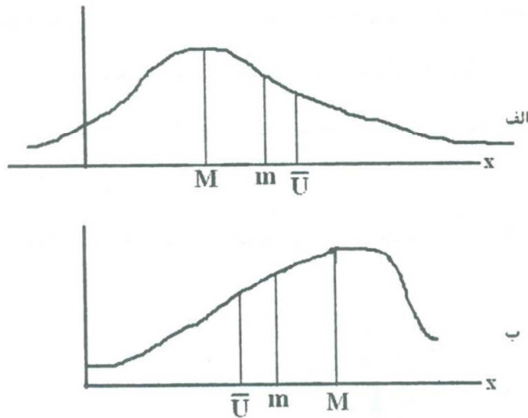
سانتی‌گراد بوده که این شرایط به همراه تهویه‌ی هوای جریان چرخشی به درون کانال، موجب ایجاد تغییرات دمایی اندک به میزان کمتر از  $\pm 0.2$  درجه سانتی‌گراد در هنگام اندازه‌گیری و در حدود  $\pm 0.5$  در طی کالیبره کردن پروب جریان‌سنج سیم داغ شده است. آزمایش‌ها روی استوانه‌ای با سطح مقطع دایره‌ای و به قطر ۲۰ میلی‌متر انجام شده است. سرعت جریان آزاد در این آزمایش‌ها ۲۰ متر بر ثانیه می‌باشد. عدد رینولدز جریان در طول آزمایش برابر ۲۸۰۰۰ (بر اساس سرعت جریان آزاد و قطر استوانه) و ثابت در نظر گرفته شده است. اندازه‌گیری‌ها در نسبت فواصل ۲۰ و ۱۵، ۱۰،  $x/d=5$  انجام گرفته است. با توجه به ابعاد سطح مقطع اتاقک آزمایش، انجام آزمایش‌ها در نسبت فواصل بزرگ‌تر در پشت سیلندر امکان‌پذیر نبوده است. در شکل ۳ جهت جریان و نحوه قرارگیری استوانه درون اتاقک آزمایش تونل باد نشان داده شده است.



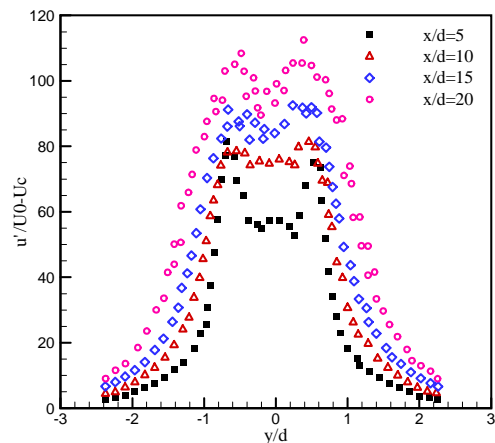
شکل ۳- قرارگیری استوانه درون تونل باد

#### ۴- اعتبارسنجی

در ابتدا، برای بررسی صحت عملکرد دستگاه تونل باد و جریان‌سنج سیم داغ، یک نمونه داده برداری صورت گرفته و با کار انگریلی و همکارانش [۲۷] مقایسه شده است. نمودار پروفیل سرعت میانگین برای یک استوانه دایره‌ای در ایستگاه  $x/d=1.5$  در شکل ۴ نشان داده شده است.

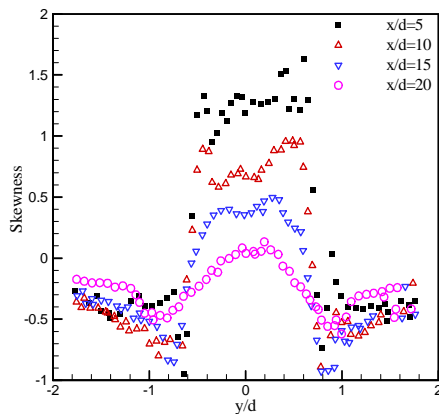


شکل ۷- ترتیب قرار گرفتن میانگین، میانه و نمای منحنی توزیع چگالی در دو حالت (الف) میزان چولگی منفی و (ب) میزان چولگی مثبت



شکل ۶- پروفیل‌های بی بعد  $u'/U_0 - U_c$  در چهار ایستگاه پشت استوانه

اسیلوگرام<sup>۳</sup> در اصل، سرعت لحظه‌ای را نشان می‌دهد که بیشتر داده‌ها در آن ناحیه از سرعت میانگین بیشتر هستند. اما پرش‌های منفی‌ای وجود دارند که سبب کاهش سرعت میانگین می‌گردند. میزان پرش سرعت لحظه‌ای با محاسبه‌ی میزان چولگی مشخص می‌شود. پروفیل ضریب چولگی، تابع توزیع چگالی احتمال مربوط به مؤلفه سرعت اغتشاشی  $u'$ ، در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸- پروفیل بی بعد ممان چولگی در دنباله تخت آشفته پشت استوانه دایره‌ای

میزان تختی و برجستگی<sup>۴</sup> طبق معادله‌های زیر بیان می‌شود:

$$K_u = \frac{\overline{u'^4}}{\sigma_u^4} \quad (۸)$$

### ۲-۵- پروفیل‌های چولگی و تختی

میزان چولگی<sup>۱</sup> برای مؤلفه‌های سرعت جریان سیال طبق معادله‌های زیر بیان می‌شود:

$$S_u = \frac{\overline{u'^3}}{\sigma_u^3} \quad (۵)$$

$$S_v = \frac{\overline{v'^3}}{\sigma_v^3} \quad (۶)$$

$$S_w = \frac{\overline{w'^3}}{\sigma_w^3} \quad (۷)$$

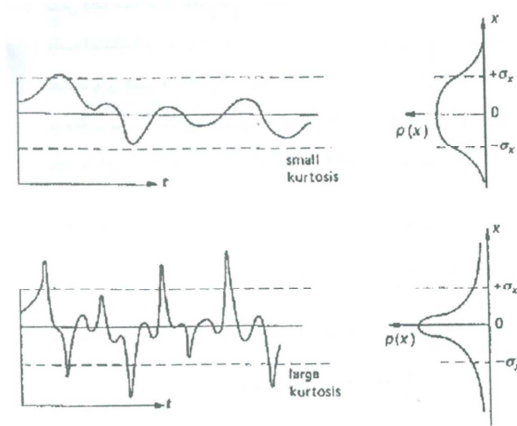
که در روابط فوق  $u', v', w'$  کمیت‌های سرعت اغتشاشی در جهات  $x, y, z$  می‌باشند. چولگی همان ممان مرکزی سوم<sup>۲</sup> است که بیانگر کاستی و عدم تقارن در منحنی سرعت لحظه‌ای جریان سیال می‌باشد. با محاسبه میزان چولگی با استفاده از سرعت‌های لحظه‌ای اندازه‌گیری شده، می‌توان چگالی داده‌های موجود را نسبت به سرعت میانگین به دست آورد. در صورتی که داده‌های به دست آمده مطابق با توزیع نرمال باشد، به دلیل تقارن، میزان چولگی برابر صفر می‌باشد. اگر منحنی توزیع چگالی به سمت راست متمایل باشد (شکل ۷-الف)، میانگین، میانه و نما از راست به چپ روی محور طول‌ها قرار می‌گیرند که در این صورت میزان چولگی مثبت است. اگر منحنی توزیع چگالی به سمت چپ متمایل باشد، میانگین، میانه و نما از چپ به راست روی محور طول‌ها قرار می‌گیرند (شکل ۷-ب) که در این صورت میزان چولگی منفی است.

<sup>3</sup> Oscillogram

<sup>4</sup> Kurtosis

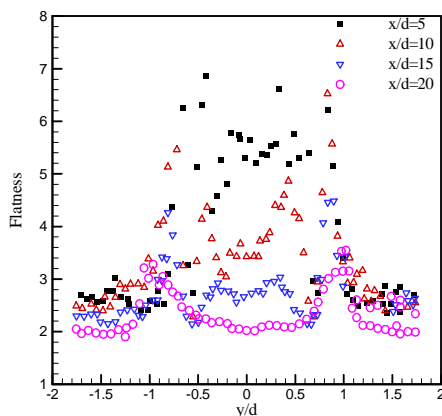
<sup>1</sup> Skewness

<sup>2</sup> Third Central Moment



شکل ۱۰- میزان تختی و برجستگی حالت‌های پیخ و کشیده داده‌های لحظه‌ای

در نتیجه سرعت لحظه‌ای در این حالت در بسیاری از موارد از سرعت میانگین فاصله زیادی گرفته و پرش و اغتشاشات سرعت لحظه‌ای جریان زیاد می‌شود. برای تختی مثبت، سرعت لحظه‌ای نسبت به حالت تابع چگالی گوسی، مقدار کمتری داشته ولی دنباله‌های توزیع چگالی حجیم‌تر می‌گردند. پروفیل ضریب تختی توزیع چگالی احتمال، برای مؤلفه سرعت اغتشاشی  $u'$ ، در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



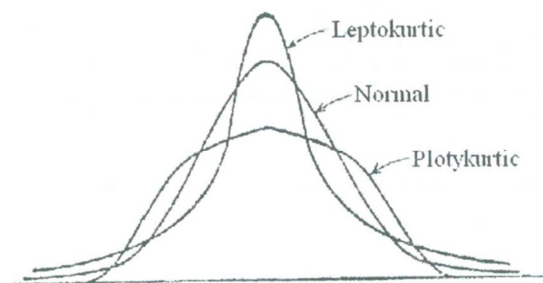
شکل ۱۱- پروفیل بی بعد ضریب تختی در دنباله تخت و آشفته پشت استوانه دایره‌ای

شکل‌های ۸ و ۱۱ به وضوح نشان می‌دهند که منحنی‌های مقادیر مرتبه بالای مرکزی، هنگامی که در امتداد عرضی دنباله کشیده می‌شوند تا مرتبه‌ی چهارم خود متشابه<sup>۳</sup> می‌باشند که این ممکن است به حضور ساختارهای جریانی گردابه‌ی کارمن در اطراف استوانه مربوط باشد که صرف نظر از رژیم جریان،

$$K_v = \frac{\overline{v'^4}}{\sigma_u^4} \quad (9)$$

$$K_w = \frac{\overline{w'^4}}{\sigma_u^4} \quad (10)$$

که در روابط فوق  $u', v', w'$  کمیت‌های سرعت اغتشاشی در جهات  $x, y, z$  می‌باشند. ضریب تختی همان ممان مرکزی چهارم<sup>۱</sup> است. به میزان کشیدگی یا پخی منحنی توزیع چگالی احتمال نسبت به منحنی تابع چگالی گوسی<sup>۲</sup>، تختی گفته می‌شود. در واقع میزان قله ناگهانی نمودار توزیع احتمال نسبت به توزیع نرمال، توسط میزان تختی بیان می‌شود. در این صورت تختی مثبت یا منفی به ترتیب بیانگر منحنی چگالی کشیده‌تر یا پیخ‌تر نسبت به تابع چگالی گوسی می‌باشند (شکل ۹). در حالتی که تختی مثبت باشد، دنباله‌های توزیع داده‌ها طولانی بوده و تغییرات دامنه داده‌ها نسبت به زمان بیشتر است. همان‌طور که در شکل ۸ مشخص است در نمودار Leptokurtic، تختی مثبت است. در این حالت دنباله توزیع داده‌ها طولانی بوده و تغییرات دامنه داده‌ها نسبت به زمان بیشتر می‌باشد. بنابراین سرعت لحظه‌ای در بسیاری از مواقع از سرعت میانگین فاصله گرفته و پرش و اغتشاشات سرعت لحظه‌ای جریان زیاد می‌شود. در نمودار Platykurtic، تختی منفی است و نسبت به حالت تابع چگالی گوسی، سرعت لحظه‌ای کمتر از سرعت میانگین است ولی دنباله‌های توزیع چگالی حجیم‌تر می‌باشند.



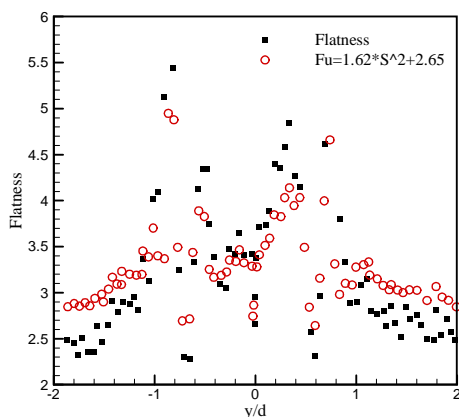
شکل ۹- دو حالت پیخ و کشیده نسبت به حالت نرمال

در نمودارهای شکل ۱۰، به این موضوع برای  $K$  کوچک‌تر و بزرگ‌تر از صفر نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هر چه منحنی کشیده باشد، دامنه اغتشاش‌ها بیشتر و هر چه منحنی پیخ‌تر باشد، منحنی دارای فراوانی روان‌تری با اغتشاش‌های کمتر خواهد بود. در صورتی که از پرش دو و سه بعدی استفاده شود، علاوه بر مقادیر اغتشاش‌ها می‌توان تنش رینولدز و یا ممان‌های جانبی بالاتر  $\overline{U^n V^m}$  را به دست آورد.

<sup>1</sup> Forth Central Moment

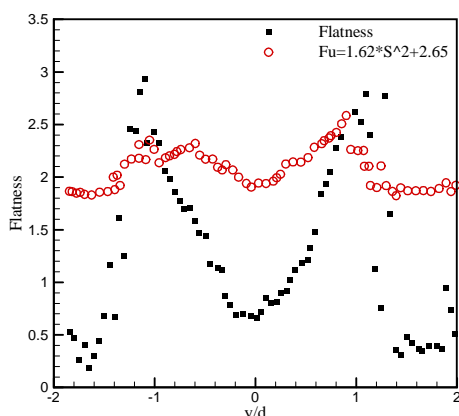
<sup>2</sup> Gaussian Density Function

<sup>3</sup> Self similar



شکل ۱۳- مقایسه‌ی مقدار پیش‌بینی شده و واقعی برای تختی با رابطه (۲) در  $x/d=1.0$ .

این مطلب را در فواصل دورتری از استوانه به‌وضوح می‌توان مشاهده نمود (شکل ۱۴).



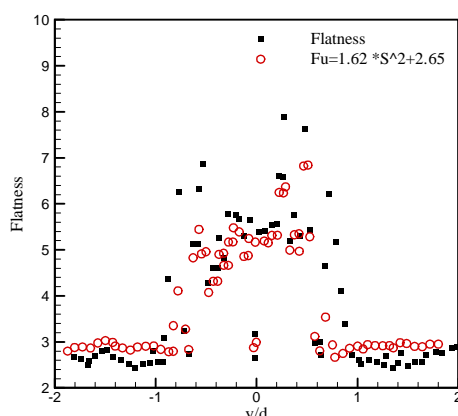
شکل ۱۴- مقدار پیش‌بینی شده و واقعی برای تختی با رابطه (۲) در  $x/d=2.0$ .

با برازش مقادیر تختی بر حسب چولگی، روابط جدیدی جهت پیش‌بینی دقیق‌تر مقدار ضریب تختی ارائه شده است که در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است. برای بررسی دقت کار، عملیات برازش با استفاده از چندجمله‌ای‌های مرتبه دو و مرتبه سه انجام گرفته است.

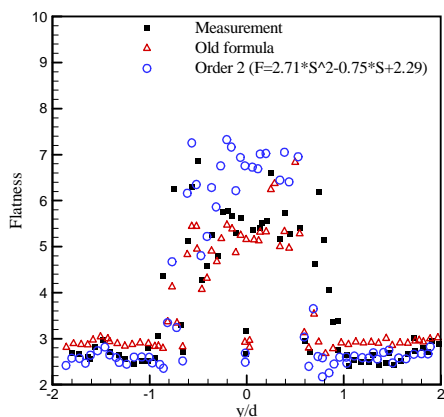
مشابه یکدیگرند. به هر حال باید توجه داشت که در جریان‌های دنباله‌ای، رسیدن به خود تشابهی در همبستگی‌های سرعت مرتبه بالا، در فواصل کمتر از  $100d$  به‌ندرت اتفاق می‌افتد. اگرچه این موضوع در مطالعه حاضر به دلیل محدودیت وسایل آزمایشگاهی بررسی نشده است، اما این پدیده را باید به اثر شرایط اولیه ربط داد. تقارن کاملی بین سمت چپ و راست پروفیل‌های سرعت وجود ندارد که این هنوز جزء آن دسته از محدودیت‌های قابل قبولی است که در تمامی آزمایش‌هایی از این قبیل وجود دارد.

### ۵-۳- معرفی روابط جدید همبستگی بین مقادیر مرتبه بالای سرعت

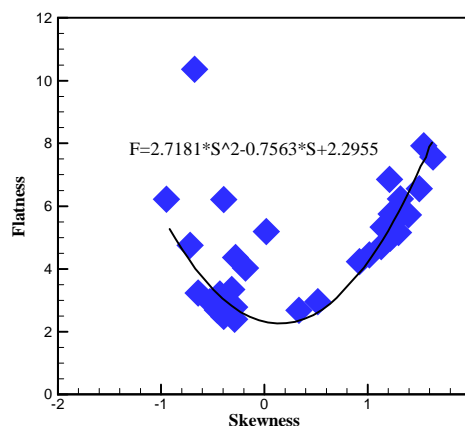
هدف از مطالعه‌ی حاضر، بررسی روابط آماری موجود بین مقادیر مرتبه بالای سرعت به ازای تابع توزیع چگالی احتمال مربوط به مؤلفه‌های سرعت اغتشاشی و معرفی روابط جدید می‌باشد. نتایج به دست آمده از ترسیم مقادیر واقعی و مقادیر تخمین زده شده توسط روابط موجود در مرجع‌های [۹، ۱۰] در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ نشان داده شده است. در حالت کلی ضرایب چولگی و تختی (مقادیر اندازه‌گیری شده در دنباله) از روابط (۲) و (۳) که قبلاً در لایه مرزی و جریان آزاد جت اثبات شده‌اند، تبعیت می‌کنند. این نتیجه کاملاً با نتایج مرجع‌های [۹، ۱۰] مطابقت دارد. البته به‌طور کلی مطابقت، فقط در نزدیکی مقادیری که متناظر با تابع توزیع چگالی احتمال گاوس می‌باشد، قابل قبول است. با توجه به نمودارهایی که بر اساس روابط موجود ترسیم شده است، می‌توان به این موضوع پی برد که مقادیر پیش‌بینی شده تطابق کاملی با مقادیر واقعی ندارند (شکل‌های ۱۲ و ۱۳).



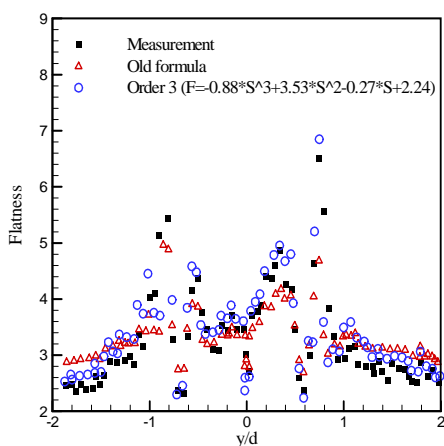
شکل ۱۵- مقدار پیش‌بینی شده و واقعی برای تختی با رابطه (۲) در  $x/d=5$ .



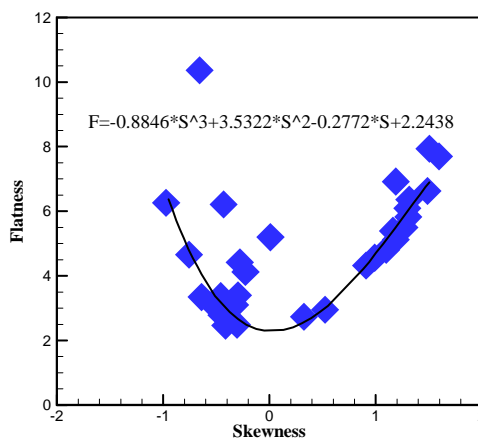
شکل ۱۷- مقدار پیش‌بینی شده تختی با رابطه (۲)، فرمول جدید مرتبه ۲ و مقادیر واقعی برای تختی در  $x/d=10$



شکل ۱۵- پیش‌بینی مقادیر تختی برحسب چولگی با یک چندجمله‌ای مرتبه دو



شکل ۱۸- مقدار پیش‌بینی شده تختی با رابطه (۲)، فرمول جدید مرتبه ۳ و مقادیر واقعی برای تختی در  $x/d=10$



شکل ۱۶- پیش‌بینی مقادیر تختی برحسب چولگی با یک چندجمله‌ای مرتبه سه

با توجه به شکل‌های فوق می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر به دست آمده از روابط مرتبه دو و سه در  $x/d$  های کمتر مطابقت بیشتری با مقادیر واقعی‌شان دارند. با افزایش نسبت فاصله، پیش‌بینی‌ها نیز از مقادیر واقعی فاصله می‌گیرند. در هر صورت بر اساس نتایج به دست آمده می‌توان گفت که روابط ارائه شده جدید باعث افزایش دقت پیش‌بینی‌ها در محاسبه مقادیر تختی و چولگی می‌گردد. شکل‌های ۱۹ و ۲۰ چگونگی تغییرات ضریب تختی را در سه حالت مذکور برای  $x/d=20$  نشان می‌دهد.

با استفاده از داده‌های به دست آمده و میانگین‌گیری از چند حالت  $x/d$ ، رابطه جدیدی برای پیش‌بینی مقادیر تختی بیان شده است. با رسم نمودارهای متناظر با این روابط (شکل‌های ۱۷ و ۱۸) مشاهده می‌گردد که مقادیر پیش‌بینی شده مطابقت خوبی با مقادیر واقعی دارند که این خود دلیلی بر صحت و دقت روابط جدید می‌باشد. در شکل‌های زیر حالت اول مربوط به مقدار پیش‌بینی شده تختی که از رابطه (۲) استخراج شده است. حالت دوم مربوط به مقادیر پیش‌بینی شده ضریب تختی به ازای رابطه جدید پیش‌بینی شده و حالت سوم مربوط به مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده تختی با استفاده از جریان‌سنج سیم داغ می‌باشد.



نرمال گاوسی فرمول بندی شده‌اند؛ بنابراین خطاهای به وجود آمده در ارزیابی مقادیر مرتبه بالا، در جاهایی که توزیع واقعی مؤلفه‌های سرعت سیال از شکل نرمال به دور هستند، با روابط (۴) در دنباله افزایش می‌یابند. این خطاهای ارزیابی می‌توانند دلیل معتبری برای انحرافات نتایج به دست آمده در این تحقیق از روندهای آنالوگ در لایه مرزی باشند.

می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات زیاد در ممان های مرتبه بالا در نزدیکی مقادیر گوسی، از نظر آماری، باعث پیچیده‌تر شدن آرایش جریان دنباله در مقایسه با جریان جت آزاد و جریان‌های محدود می‌گردد. این تحقیق نشان می‌دهد که هم جریان آشفته‌ی آزاد و هم جریان‌های محدود، از روابط آماری مشابهی پیروی می‌کنند. گفتنی است که آزمایش‌های مشابهی برای دنباله‌ی استوانه در رینولدزهای مختلف می‌تواند صورت گیرد تا با بررسی دقیق‌تر مقادیر آشفته‌گی در دنباله به روابط موجود بین مقادیر مرتبه بالای سرعت دست پیدا کرد.

#### ۷- نمادها

S	ضریب چولگی
F	ضریب تختی
$U_0$	سرعت متوسط جریان آزاد، (m/s)
$U_c$	سرعت متوسط مرکز دنباله، (m/s)
$u', v', w'$	مؤلفه‌های اغتشاشی سرعت، (m/s)
Re	عدد رینولدز (مبتنی بر قطر استوانه)
x	فاصله افقی بین مرکز استوانه و جریان سنج سیم داغ، (mm)
y	فاصله عمودی بین مرکز استوانه و جریان سنج سیم داغ، (mm)
d	قطر استوانه، (mm)
$Re_\lambda$	عدد رینولدز جریان آشفته

#### ۸- ضمایم

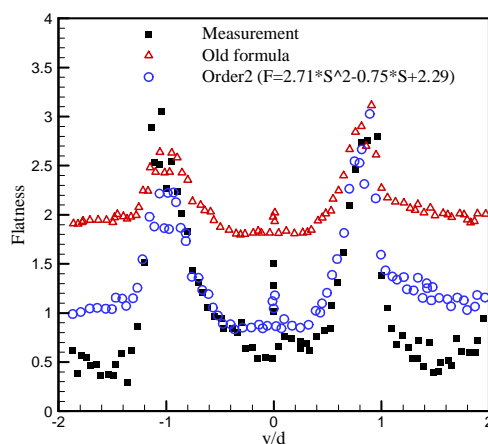
##### ۸-۱- تحلیل عدم قطعیت نتایج

در پایان به بررسی حداکثر خطای موجود در اندازه‌گیری داده‌های لحظه‌ای سرعت پرداخته می‌شود. پارامترهایی که روی سرعت لحظه‌ای تأثیر می‌گذارند و چگونگی تأثیرگذاری آن‌ها و مقدار تأثیر آن در زیر بیان شده است.

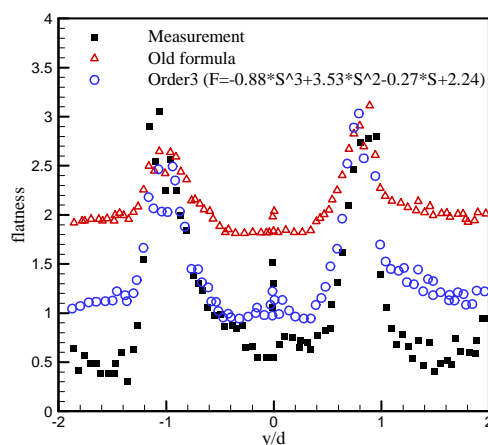
تأثیر خطایی که هر پارامتر روی سرعت می‌گذارد از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید که با عنوان عدم قطعیت استاندارد نسبی بیان می‌شود.

$$\text{Error}(\%) = \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{U} \cdot \Delta y_i \quad (11)$$

که در آن K ضریب همگرایی و  $\frac{1}{U} \cdot \Delta y_i$  انحراف معیار می‌باشد.



شکل ۱۹- مقایسه‌ی مقدار پیش‌بینی شده با رابطه (۲)، فرمول جدید مرتبه ۲ و مقادیر واقعی برای تختی در  $x/d=20$



شکل ۲۰- مقدار پیش‌بینی شده با رابطه (۲)، فرمول جدید مرتبه ۳ و مقادیر واقعی برای تختی در  $x/d=20$

#### ۶- نتیجه‌گیری

در مطالعه‌ی حاضر به ارزیابی روابط آماری موجود بین مقادیر مرتبه بالای سرعت، یعنی ضرایب چولگی و تختی و همچنین معرفی روابط جدید مربوط به مؤلفه‌ی سرعت در جهت جریان در دنباله‌ی تخت پشت یک استوانه دایره‌ای پرداخته شده است. در این کار از جریان سنج سیم داغ برای اندازه‌گیری مشخصات جریان و پارامترهای مربوط به مؤلفه‌های اغتشاشی سرعت در موقعیت‌های مختلف در پایین‌دست جریان پشت استوانه استفاده شده است. تاکنون دلیل منطقی و محکمی از نظر آماری برای توجیه رفتارهای فوق برای یک دنباله ارائه نشده است. ممکن است این به دلیل وجود انحرافات زیاد توزیع چگالی احتمال مربوط به مؤلفه‌های سرعت از حالت عادی باشد (که در اینجا هم مشاهده شده است). در چنین حالتی روابط (۴) برای ممان های مرتبه بالا نادرست می‌باشند، به این دلیل که آن‌ها برای توزیع

در نهایت مجموع خطای ناشی از پارامترهای مختلف روی سرعت لحظه‌ای از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\text{Error}_{\text{Total}}(\%) = 2 \sqrt{\sum \left( \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{U} \cdot \Delta y_i \right)^2} \quad (12)$$

### ۸-۲- خطای کالیبراسیون

خطای کالیبراسیون بسته به این که با یک دستگاه اختصاصی یا با یک لوله پیتوت انجام شده باشد متغیر می‌باشد و می‌تواند منبع بزرگی از عدم قطعیت باشد. با توجه به این که در این تحقیق از لوله پیتوت و یک مانومتر استفاده شده است، حداکثر یک درصد خطا در این مرحله وجود دارد.

### ۸-۳- خطای برازش منحنی

در این مرحله حداکثر خطا ۱ درصد می‌باشد.

### ۸-۴- خطای مربوط به تبدیل سیگنال آنالوگ به دیجیتال

بورد A/D شامل ۱۲ بیت و دارای بیشینه ولتاژ ۱۰ ولت و دارای بیشینه خطای ۰٫۱۲ درصد می‌باشد.

$$\text{Error}(\%) = \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{U} \cdot \Delta y_i = \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{U} \cdot \frac{E_{AD}}{2^n} \cdot \frac{\partial U}{\partial E} \quad (13)$$

$$K = \sqrt{3}, U = 10 \text{ m/s}, E_{AD} = 3 \text{ volt}, n = 12, \frac{\partial U}{\partial E} = 30.5 \frac{\text{m/s}}{\text{volt}}$$

### ۸-۵- خطای ناشی از قرارگیری پروب

اگر حداکثر تغییر زاویه پروب، یک درجه باشد، می‌توان از خطای این مرحله صرف نظر کرد.

$$\text{Error}(\%) = \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{U} \cdot \Delta y_i = \frac{1}{k} \cdot (1 - \cos \theta) \approx 0 \quad (14)$$

$$K = \sqrt{3}, \theta = 1^\circ$$

### ۸-۶- خطای ناشی از تغییرات دما

این خطا شامل دو قسمت می‌باشد:

الف) تغییرات دما در حین کالیبراسیون که حداکثر یک درجه می‌باشد، مقدار خطای ایجاد شده ۰٫۸ درصد می‌باشد.

$$\text{Error}(\%) = \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{U} \cdot \Delta y_i = \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{U} \cdot \frac{\Delta T}{T_w - T_o} \cdot \left( \frac{A}{B \sqrt{U}} + 1 \right) = 0.00043 \quad (15)$$

$$\Delta T = 1^\circ, T_w - T_o = 200^\circ\text{C}, A = 1.396, B = 0.895, K = \sqrt{3}, U = 10 \text{ m/s}$$

ب) تغییرات دما در حین آزمایش:

تغییرات دما در حین آزمایش حداکثر دو درجه می‌باشد که مقدار خطای ایجاد شده ۰٫۴ درصد می‌باشد.

$$\text{Error}(\%) = \frac{1}{k} \cdot \frac{\Delta T}{273} = 0.0042 \quad (16)$$

$$\Delta T = 2^\circ, K = \sqrt{3}$$

### ۸-۷- خطای ناشی از تغییرات رطوبت و فشار محیط

با توجه به اینکه در محل آزمایشگاه تونل باد دانشگاه حکیم سبزواری فاکتورهای فشار و رطوبت ثابت هستند، لذا خطای این مقادیر صفر می‌باشد و از خطای موجود در این مرحله می‌توان صرف نظر کرد.

با در نظر گرفتن تمام عوامل فوق، میزان خطای کل اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای از رابطه ۱۲ به دست می‌آید که برابر ۴٫۰۳ درصد می‌باشد.

$$\text{Error}_{\text{Total}}(\%) = 2 \sqrt{\sum \left( \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{U} \cdot \Delta y_i \right)^2} \quad (17)$$

$$= 2[1^2 + 1^2 + 0.12^2 + 0^2 + 0.043^2 + 0^2]$$

$$= 4.03\%$$

## مراجع

- [۱] صنیعی‌نژاد مهدی، "مقدمه ای بر مفاهیم جریان های آشفتنه و مدلسازی آنها"، تهران، ۱۳۸۳.
- [2] Burattini P., Lavoie P., Antonia R. A., "Velocity derivative skewness in isotropic turbulence and its measurement with hot wires", Experiments in fluids, vol. 45, no. 3, pp. 523-535, 2008 .
- [3] Monin A. S., Yaglom A. M., Statistical fluid mechanics: mechanics of turbulence: Courier Corporation, 2007 .
- [4] Kolmogorov A. N., "Dissipation of energy in the locally isotropic turbulence", Proceedings: Mathematical and Physical Sciences, pp. 15-17, 1991 .
- [5] Kolmogorov A. N., "A refinement of previous hypotheses concerning the local structure of turbulence in a viscous incompressible fluid at high Reynolds number", Journal of Fluid Mechanics, vol. 13, no. 01, pp. 82-85, 1962 .
- [6] George W. K., "The decay of homogeneous isotropic turbulence", Physics of Fluids A: Fluid Dynamics (1989-1993), vol. 4, no. 7, pp. 1492-1509, 1992 .
- [7] Suzuki Y., Kasagi N., "Evaluation of hot-wire measurements in wall shear turbulence using a direct numerical simulation database", Experimental thermal and fluid science, vol. 5, no. 1, pp. 69-77, 1992 .
- [8] Zhu Y., Antonia R., "Effect of wire separation on X-probe measurements in a turbulent flow", Journal of Fluid Mechanics, vol. 287, pp. 199-223, 1995 .

- Fluids (1994-present), vol. 6, no. 2, pp. 808-814, 1994 .
- [25] Sreenivasan K. R., Antonia R., "The phenomenology of small-scale turbulence", Annual review of fluid mechanics, vol. 29, no. 1, pp. 435-472, 1997 .
- [۲۶] اردكاني محمد علي، "جريان سنج سيم داغ"، نشر دانشگاه صنعتي خواجه نصير الدين طوسي، تهران، آبان ۱۳۸۵.
- [27] Angrilli F., Bergamaschi S., Cossalter V., "Investigation of wall induced modifications to vortex shedding from a circular cylinder, Journal of Fluids Engineering", vol. 104, no. 4, pp. 518-522, 1982 .
- [9] Durst F., Jovanovic J., "Investigations of Reynolds-averaged turbulence quantities", Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences, vol. 451, no. 1941, pp. 105-120, 1995 .
- [10] Durst F., Jovanovic J., Kanevce L., "Probability density distribution in turbulent wall boundary-layer flows", in: Turbulent Shear Flows 5, Eds., pp. 197-220: Springer, 1987 .
- [11] Matović M., "Experimental investigation of free premixed flame flow field, by laser anemometer", Master Thesis, Faculty of Mechanical Engineering in Belgrade, University of Belgrade, 1998 .
- [12] Petrović V. D., "Research of turbulent fluid flow in the free round isothermal jet by hot wire anemometer", Master Thesis, Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade, 1991 .
- [13] Monin A., Yaglom A., Lundgren T., "Statistical Fluid Mechanics", vol. II, Journal of Applied Mechanics, vol. 43, pp. 521, 1976 .
- [14] Osterlund J. M., Johansson A. V., "Turbulence Statistics of Zero Pressure Gradient Turbulent Boundary Layers", unpublished, 2001 .
- [15] Fuss F. K., "The effect of surface skewness on the super/postcritical coefficient of drag of roughened cylinders", Procedia Engineering, vol. 13, pp. 284-289, 2011 .
- [16] Ghorbanian K., Soltani M. R., Manshadi M. D., "Experimental investigation on turbulence intensity reduction in subsonic wind tunnels", Aerospace science and Technology, vol. 15, no. 2, pp. 137-147, 2011 .
- [17] Van Atta C., Antonia R., "Reynolds number dependence of skewness and flatness factors of turbulent velocity derivatives", Physics of Fluids (1958-1988), vol. 23, no. 2, pp. 252-257, 1980 .
- [18] Nelkin M., "Universality and scaling in fully developed turbulence", Advances in physics, vol. 43, no. 2, pp. 143-181, 1994 .
- [19] Champagne F., "The fine-scale structure of the turbulent velocity field", Journal of Fluid Mechanics, vol. 86, no. 01, pp. 67-108, 1978 .
- [20] Tavoularis S., Bennett J., Corrsin S., "Velocity-derivative skewness in small Reynolds number, nearly isotropic turbulence, Journal of Fluid Mechanics, vol. 88, no. 01, pp. 63-69, 1978 .
- [21] Mydlarski L., Warhaft Z., "On the onset of high-Reynolds-number grid-generated wind tunnel turbulence", Journal of Fluid Mechanics, vol. 320, pp. 331-368, 1996 .
- [22] Antonia R., Orlandi P., "Similarity of decaying isotropic turbulence with a passive scalar", Journal of Fluid Mechanics, vol. 505, pp. 123-151, 2004 .
- [23] Gotoh T., Fukayama D., Nakano T., "Velocity field statistics in homogeneous steady turbulence obtained using a high-resolution direct numerical simulation", Physics of Fluids (1994-present), vol. 14, no. 3, pp. 1065-1081, 2002 .
- [24] Mansour N., Wray A., "Decay of isotropic turbulence at low Reynolds number", Physics of