



بررسی برخورد جریان سیال جت آشفته مستطیلی به یک دیواره توسط سرعت سنجی لیزری داپلر- بررسی تجربی و تحلیل خطا

محمود چرمیان¹، احمد رضا عظیمیان^{2*}، ابراهیم شیرانی³، فتحی علوی⁴

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خمینی شهر، خمینی شهر

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی فولاد، فولادشهر

4- استاد، آزمایشگاه لامیج، دانشگاه ولنسیان، ولنسیان، فرانسه

*خمنی شهر، صندوق پستی 84175-119، azimian@iaukhsh.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 08 آذر 1395

پذیرش: 25 دی 1395

ارائه در سایت: 19 فروردین 1396

کلید واژگان:

سرعت سنجی لیزری داپلر

سرعت سنجی تصویری ذرات

برخورد جت آشفته به دیواره

زمان اقامت

جمع آوری داده

چکیده

در این مقاله نتایج حاصل از اندازه گیری آزمایشگاهی کمیت های متوسط و نوسانی جریان برخورد جت آشفته مستطیلی به یک دیواره ثابت توسط روش سرعت سنجی لیزری داپلر گزارش شده است. هدف از انجام این تحقیق بررسی و مقایسه جریان در اعداد رینولدز مختلف و همچنین تعیین تأثیر دو خطای تأثیرگذار آزمایشگاهی یعنی تعداد داده های جمع آوری شده و زمان اقامت ذرات درون حجم اندازه گیری بر سرعت متوسط محاسبه شده است. فاصله نازل تا دیواره 10 برابر عرض نازل در نظر گرفته شده و آزمایش ها برای سه عدد رینولدز 3000، 6000 و 9000 تکرار شده است. نتایج نشان می دهد که تنها رابطه بیان شده برای پیش بینی تعداد داده های مورد نیاز برای اطمینان از استقلال متغیرهای متوسط جریان از تعداد داده های جمع آوری شده کامل نیست و بسته به شدت آشفتگی جریان می تواند کاملاً ناکارآمد باشد، همچنین از زمان اقامت وزنی برای محاسبه سرعت های متوسط استفاده شده و با نتایج حاصل از روش سرعت سنجی تصویری ذرات مقایسه شده است. نتایج حاکی از تطابق خوب نتایج روش سرعت سنجی لیزری داپلر و سرعت سنجی تصویری ذرات با لحاظ کردن اثر زمان اقامت در معادلات برای جریان برخورد جت آشفته به دیواره است. در نهایت سرعت های متوسط و تنش های رینولدز برای مقاطع مختلف جریان و در اعداد رینولدز متفاوت گزارش شده است. نتایج نشان می دهد که رفتار و مقدار سرعت های بی بعد متوسط برای اعداد رینولدز مختلف در بیشتر مقاطع مشابه، حال آن که تنش های اغتشاشی بی بعد دارای مقادیر متفاوت در اعداد رینولدز مختلف است.

Investigation of turbulent slot impinging jet using laser doppler anemometry method- Experimental research and error analysis

Mahmoud Charmiyan¹, Ahmad Reza Azimian^{2*}, Ebrahim Shirani³, Fethi Aloui⁴

1- Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Khomeini Shahr branch, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Foolad Institute of Technology, Fooladshahr, Isfahan, Iran

4- LAMIH, University of Valenciennes and Hainaut-Cambrésis (UVHC), Valenciennes, France.

* P.O.B. 84175-119, Khomani Shahr, Iran, azimian@iaukhsh.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 28 November 2016

Accepted 14 January 2017

Available Online 08 April 2017

Keywords:

Laser Doppler anemometry (LDA)

Particle Image Velocimetry (PIV)

Turbulent Impinging Jet

Residence Time

Data Sampling

ABSTRACT

In this paper, the results obtained from experimental measurements of average and turbulence quantities of a turbulent rectangular impinging jet hitting a fixed wall are reported using the laser doppler anemometry (LDA) method. The nozzle to plate distance is 10 times the nozzle width, and the tests are repeated for three different Reynolds numbers, namely $Re=3000$, 6000 and 9000 . The aim of the current research was to investigate and compare flow in different Re and also to determine the two effective experimental errors on average velocities, namely data sampling and residence time in measurement volume. The results reveal that the previous stated correlation for prediction of the number of data required for ensuring independence of the average flow variables on the number of the sampled data is not sufficient by itself, and depending on the turbulence intensity of the flow, this correlation could become ineffective. Further, in the present study, the residence time is used for calculation of average velocities, and the results are compared with those obtained by particle image velocimetry (PIV) method. The comparison shows good agreement between the results from LDA and PIV when considering effect of residence time within the averaging equations in the former method. The results show that the behavior and quantity of the dimensionless average velocities for various Reynolds numbers are identical at most cross sections of the flow domain while the dimensionless turbulent stresses have different quantities at different values of the Reynolds number.

Please cite this article using:

M. Charmiyan, A. R. Azimian, E. Shirani, F. Aloui, Investigation of turbulent slot impinging jet using laser doppler anemometry method- Experimental research and error analysis, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 92-100, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

1- مقدمه

برخورد جت آشفته به دیواره راهی موثر و بهینه برای انتقال حرارت یا انتقال جرم در کاربری‌های صنعتی را می‌سازد. یک جت سیال با سرعت بالا به یک صفحه به صورت مستقیم در این نوع جریان برخورد می‌کند که قادر است انتقال حرارت یا انتقال جرم بین صفحه و سیال را بسیار افزایش دهد. کاربردهای بسیاری برای برخورد جت به دیواره و اهمیت فرایندهای انتقال در این پدیده در مراجع بیان شده است. از جمله این کاربردها می‌توان به کاربرد فرایند برخورد جت به دیواره در صنعت شکل‌دهی مواد، خنک‌کاری قطعات الکترونیکی، مه‌زدایی با گرم کردن سطوح اپتیکی، خنک‌کاری قطعات توربین، خنک‌کاری قطعات حساس در ماشین‌کاری، جریان‌های اسپری در موتورهای احتراق داخلی، محفظه‌های احتراق و موارد متعدد دیگر اشاره کرد. فرایند برخورد جت سیال آشفته به دیواره برای افزایش انتقال جرم نیز کاربردهایی در صنعت دارد. از جمله این کاربردها می‌توان فرایند خشک کردن مواد و یا پاک‌سازی سطوح از ذرات ریز را نام برد.

انرژی جنبشی اغتشاشی بالا که توسط کرنش‌های عمودی تولید می‌شود، وجود تنش‌های برشی قوی غیر ایزوتروپ، انحنای در خطوط جریان و تشکیل یک لایه مرزی در کنار دیواره که با پدیده جدایش همراه است، جریان برخورد جت به دیواره را تبدیل به یک جریان پیچیده کرده است. به دلیل همین خصوصیات برخورد جت به دیواره موضوع بسیاری از تحقیقات عددی و آزمایشگاهی بوده است [1-3].

دو مورد از معروف‌ترین کارهای آزمایشگاهی انجام شده در زمینه بررسی برخورد جت تکی به دیواره توسط باغن و شیمیزو [4] و کوپر و همکاران [5] انجام شده‌اند. تحقیق نخست در مورد میزان و نحوه انتقال حرارت این دسته جریان‌هاست در صورتی که دومین تحقیق بیشتر بر میدان جریان آشفته برخورد یک جت تکی بر یک صفحه بزرگ متمرکز است. این جت سیال از یک لوله صاف (به قطر D) و به صورت کاملاً توسعه‌افته با عدد رینولدز برابر 2.3×10^4 خارج می‌شود. فاصله مابین خروجی لوله و صفحه برخورد برابر $2D$ در نظر گرفته شده است. کوپر و همکاران [5] از سرعت‌سنجی به روش سیم داغ¹ برای تعیین سرعت‌های متوسط و تنش‌های رینولدز استفاده کردند. با این حال از آن‌جا که سرعت‌سنجی به روش سیم داغ یک روش مزاحم اندازه‌گیری جریان و به صورت نقطه‌ای است در شدت آشفته‌گی‌های بالا خود حسگر سبب تولید آشفته‌گی و خطا می‌کند. با توجه به این نکته کوپر و همکاران [5] در مقاله خود اشاره کردند که مقادیر اندازه‌گیری‌شده توسط ایشان در برخی از نواحی جریان برخورد جت آشفته به دیواره با شدت آشفته‌گی بالا (مانند نواحی نزدیک به ناحیه سکون و همین‌طور لایه برشی آزاد در خروجی جت از لوله) قابل اطمینان نیست. جیز و همکاران [6] جریان برخورد جت آشفته به دیواره را توسط روش سرعت‌سنجی لیزری داپلر² بررسی کردند. ایشان اختلاف بسیار زیادی در نواحی نزدیک دیواره در سرعت‌های متوسط و تنش‌های رینولدز در مقایسه با کار کوپر و همکاران [5] مشاهده کردند. به دلیل آن‌که رزولوشن مکانی برای تعیین تمامی مؤلفه‌های تنش رینولدز در سرعت‌سنجی به روش سیم داغ پایین است و همچنین تعیین ممان‌های اغتشاشی جریان برای جریان‌های با شدت آشفته‌گی بیشتر از 20% عمدتاً سبب ایجاد خطای فراوان می‌شود. این در حالی است که رزولوشن مکانی روش لیزری داپلر بالا و همچنین می‌تواند ممان‌های اغتشاشی جریان را در شدت آشفته‌گی‌های بالا با دقت بسیار بیشتری

اندازه‌گیری کند.

تامرز و همکاران [7] برخورد یک جت دایره‌ای به دیواره را به روش سرعت‌سنجی لیزری داپلر بررسی کردند. ایشان نیز فاصله خروجی جت از نازل تا دیواره را $2D$ و $Re = 2.3 \times 10^4$ در نظر گرفتند و از سیستم یک بعدی مخصوصی برای تعیین ساختارهای نزدیک به دیواره استفاده کردند که امکان تعیین سرعت‌های لحظه‌ای در فاصله $40 \mu m$ از دیواره را مهیا می‌کند. نتایج گزارش‌شده توسط ایشان نیز سرعت‌های متوسط و تنش‌های رینولدز در کل دامنه جریان است.

یکی از اهداف این تحقیق بررسی ساختارهای متوسط و نوسانی برای جریان برخورد یک جت آشفته مستطیلی به دیواره با استفاده از روش سرعت‌سنجی لیزری داپلر که قابلیت اندازه‌گیری میدان سرعت را حتی در نواحی با شدت آشفته‌گی بالا مهیا می‌کند. فاصله زیاد نازل تا صفحه برخورد ($H/e=10$) در تحقیق کنونی سبب آشفته‌شدن تمامی نواحی جریان از جمله هسته پتانسیل جت می‌شود. باید توجه داشت که خطاهای موجود در اندازه‌گیری نیز با وجود شدت آشفته‌گی بالا در جریان افزایش می‌یابد. مطالعات بسیاری برای شناسایی انواع خطاهای موجود در روش سرعت‌سنجی لیزری داپلر برای جریان‌های مختلف انجام شده است [8,9]. ولته و همکاران [10] در سال 2014 انواع روش‌های پس‌پردازش برای کاهش خطاهای داده‌برداری را برای جریان یک جت آزاد و عبور جریان آشفته از روی یک سیلندر مورد بررسی قرار دادند. ایشان میزان خطای موجود در آشمار انرژی جریان آشفته و همچنین ممان‌های اول تا سوم جریان برای انواع روش‌های کاهش خطا را محاسبه کردند.

محققین بسیاری از سیستم‌های متفاوتی برای تعیین کمیت‌های متوسط و نوسانی جریان آشفته از نظر جای‌گذاری حسگرها استفاده کردند. سیستم پراکنش نوری مستقیم³ و سیستم پس‌پراکنش⁴ نوری دو مورد از معروف‌ترین این چینش‌هاست.

سمن [11] و توتیایی [12] از سیستم پراکنش نوری مستقیم برای اندازه‌گیری کمیت‌های متوسط و نوسانی جریان یک جت چرخان استفاده کردند. ایشان از دو عدد حسگر برای دریافت سیگنال‌های ساطع شده از ذرات در دو جهت عمود برهم استفاده کردند. یکی از دشواری‌هایی که در این روش وجود دارد هماهنگی بین حسگرها از نظر زمانی و مکانی است به‌طوری‌که باید داده‌ها در یک زمان واحد و دقیقاً در یک مکان جمع‌آوری شوند. این عامل خود سبب افزایش عدم قطعیت در اندازه‌گیری‌ها می‌شود. ایشان برای اندازه‌گیری سرعت در دو جهت از دو حسگر در صفحات عمود برهم استفاده کردند.

هان و همکاران [13] جریان درون یک کانال و ولته و همکاران [10] جریان یک جت آزاد را با استفاده از سیستم پس‌پراکنش نوری بررسی کردند. در این سیستم احتیاجی به چینش حسگر در سایر قسمت‌ها نیست، بلکه این حسگرها درون محفظه مربوط به پرتوها قرار داده می‌شود. این عمل سبب می‌شود که احتیاجی به هماهنگی بین حسگرها و همچنین تنظیم زوایا بین حسگرها نباشد و یک منبع عدم قطعیت در این روش حذف می‌شود. با این حال شدت نور بازتابیده شده از ذرات کمتر و اندازه‌گیری آن در روش پس‌پراکنش نوری نیاز به حسگرهای دقیق‌تری دارد.

بنا به مطالعات نویسندگان این مقاله تاکنون تحقیقی در مورد وجود و تأثیر خطاهای داده‌برداری برای جریان برخورد جت به دیواره انجام نشده

³ Forward scatter

⁴ Back scatter

¹ Hot wire anemometry

² Laser Doppler Anemometry

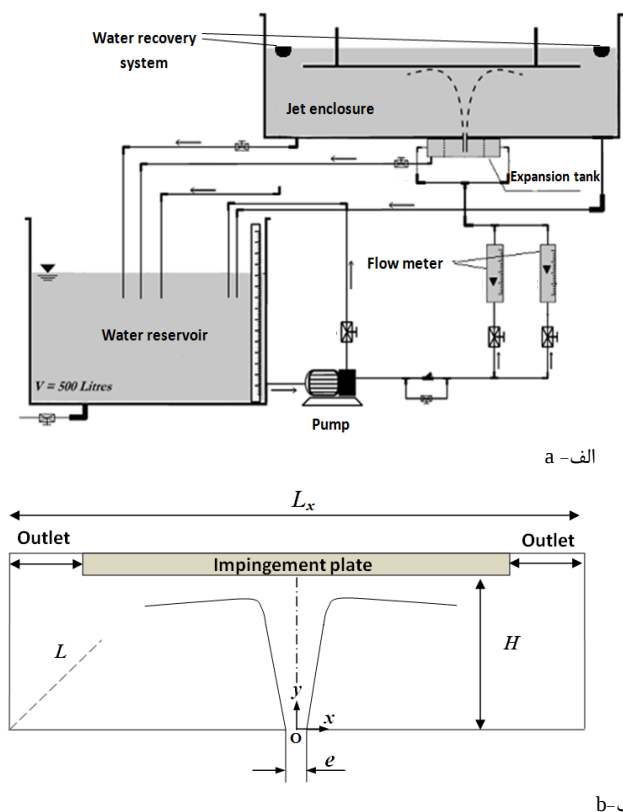


Fig. 1 a) Experimental setup [14] b) Jet impinging enclosure
 شکل 1 الف) تجهیزات آزمایشگاهی [14] ب) محفظه برخورد جت به دیواره

بازتاب‌های نوری از ذرات ریز موجود در جریان از سیستم پس‌پراکنش نوری استفاده شده است. همان طور که پیشتر یاد شد در این سیستم حسگرها درون محفظه مشترک با منابع پرتوها قرار دارند و نیازی به قراردادن حسگرها در خارج از آن نیست.

سیستم لیزر مورد استفاده در این تحقیق دارای دو جفت از پرتوهای عمود برهم است که می‌تواند دو مؤلفه سرعت جریان را اندازه‌گیری کند. طول موج نخستین جفت از پرتوها برابر 660 نانو متر و طول موج جفت پرتو دیگر 785 نانومتر است. فاصله کانونی لنز به کار رفته برابر با 500 میکرومتر و تغییر فرکانس برابر 80 MHz در نظر گرفته شده است. سیگنال‌ها توسط پردازنده سیگنال مدل اف-60 متعلق به شرکت دنتک² پردازش شده است. این پردازنده یکی از قدرتمندترین و سریع‌ترین پردازشگرهای موجود برای تفسیر و محاسبات مربوط به سیگنال‌های جریان‌های پیچیده سیال است. از مزیت‌های این پردازنده نسبت به مدل‌های پیشین می‌توان به توانایی اندازه‌گیری سرعت جریان در سرعت‌ها و آشفتگی‌های بالا توسط تحلیل سیگنال‌های ورودی تا 200 MHz اشاره کرد.

داده‌های اولیه به صورت هم‌زمان و با استفاده از نرم‌افزار تحلیلگر طیف داده‌ها³ تحلیل شده است. برای تغییر مکان دستگاه لیزر از یک سیستم جابه‌جایی الکترونیکی دو بعدی استفاده شده که قابلیت جابه‌جایی خودکار دستگاه توسط فرمان رایانه‌ای را دارد. دقت جابه‌جایی این سیستم برابر 0.1 mm است. تمام آزمایش‌ها در آزمایشگاه کنترل اتوماتیک صنعتی و غیرصنعتی، مهندسی مکانیک و علوم رایانه⁴ واقع در دانشگاه ولسیان¹ و

است. هدف دوم این مقاله معرفی و نشان دادن مهم‌ترین خطاهای اندازه‌گیری یعنی خطای ناشی از تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده و همچنین خطای حاصل از مدت زمان حضور ذرات معلق در حجم اندازه‌گیری برای جریان برخورد جت آشفته به دیواره است.

2- وسایل و تجهیزات آزمایشگاهی

شکل 1-الف طرح‌واره تجهیزات آزمایشگاهی جریان برخورد جت به دیواره را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود این سیستم از بخش‌های مختلفی چون یک مخزن آب، پمپ، دو دی‌سنج، شیرهای کنترل جریان، مخزن انبساط، کانال ورودی جت، صفحه افقی ثابت که جت به آن برخورد می‌کند و سیستم بازیابی آب (که سیال را به درون تانک برگرداند) تشکیل شده است. آب در یک سیکل بسته در گردش است و آب به مخزن انبساط توسط یک الکتروپمپ از یک مخزن پمپ می‌شود. براساس شکل 1-الف آب پیش از ورود به محفظه جت وارد یک تانک انبساط می‌شود. این تانک شامل سه ردیف صفحه شبکه‌ای شکل در دو طرف کانال مستطیلی است که سبب کاهش آشفتگی و یکنواختی جریان حاصل از انتقال سیال توسط پمپ می‌شود، همچنین دو شیر و دو دی‌سنج برای تعیین دبی جریان جت در نظر گرفته شده که بسته به عدد رینولدز انتخابی جریان از یک یا هردو شیر عبور می‌کند.

آب پس از عبور جریان از درون تانک انبساط از درون یک کانال با مقطع مستطیلی موجود در مخزن انبساط عبور می‌کند و وارد محفظه اصلی شده و سپس به صفحه ثابت موجود در بالای این محفظه برخورد می‌کند. در دو طرف صفحه برخورد سیستم بازیابی آب در امتداد عمق محفظه جت قرار داده شده است. با این نوع چینش می‌توان از متقارن بودن جت مستطیلی اطمینان حاصل کرد.

شکل 1-ب ابعاد مربوط به هندسه مسئله را نشان می‌دهد. در این شکل e عرض نازل خروجی جت سیال برابر با 20 میلی‌متر است.

فاصله نازل تا صفحه ثابت (H) 10 برابر عرض نازل (200 میلی‌متر) در نظر گرفته شده است. این انتخاب براساس پژوهشی از مورل و سولیک [15] صورت گرفته است. ایشان نشان دادند که بیشترین شدت اغتشاشی مؤلفه عمودی سرعت در فاصله $H/e=10$ صورت می‌گیرد. از این‌رو در این فاصله می‌توان اطمینان داشت که هسته مرکزی جت در هنگام برخورد آشفته است. عمق محفظه برخورد جت به دیواره (L) 20 برابر عرض نازل (400 میلی‌متر، و این فاصله برای اطمینان از عدم تأثیر دیوارهای جانبی محفظه بر پروفیل سرعت در صفحه مرکزی جت در نظر گرفته شده است.

عدد رینولدز در جریان برخورد جت به دیواره به صورت $Re = U_{jet}e/\nu$ تعرف می‌شود که U_{jet} معرف سرعت متوسط جریان در خروجی نازل (کانال مستطیلی) و ν لزجت سینماتیکی سیال است.

شکل 2 طرح‌واره مراحل و نحوه اندازه‌گیری سرعت جریان در روش سرعت‌سنجی لیزری داپلر یک بعدی را نشان می‌دهد. در این روش از یک جفت باریکه لیزری که به وسیله جداکننده پرتو¹ از پرتو مرجعی جدا شده استفاده می‌شود، به طوری که این دو پرتو تحت زاویه معینی به درون محیط یا همان سیال مورد نظر تابانده می‌شود. در این ناحیه نوارهای تداخلی خطی تشکیل می‌شود که محل تشکیل این نوارها همان ناحیه یا حجم اندازه‌گیری است که توسط آشکارساز نوری دریافت می‌شود. در تحقیق کنونی دو جفت پرتو به صورت عمود بر صفحه مرکزی به جریان تابیده شده و برای جمع‌آوری

² Dantec Dynamics® FlowExplorer™

³ Burst Spectrum Analyzer (BSA)

⁴ Laboratory of industrial and human automation control, mechanical engineering and computer science

¹ Beam splitter

متوسط‌گیری می‌کند. در این زمان سیستم قادر نیست تا داده جدیدی را ثبت کند (یک ذره در هر زمان). علاوه بر این پردازشگر ممکن است به یک زمان بسیار کم برای انتقال داده‌ها نیاز داشته باشد که در این زمان نیز پردازشگر قادر به ثبت داده‌های جدید نیست. این دو عامل سبب می‌شوند که سیستم در زمان‌های بسیار محدودی به نام زمان مرده نتواند داده‌های جدیدی ثبت کند. این زمان از حدود 10 میکرو ثانیه تا چند صد میکرو ثانیه (بنا به نوع جریان) تغییر می‌کند. در سال 2014 بوچهاو و همکاران [9] نشان دادند که برای روش‌های اندازه‌گیری مانند روش سرعت‌سنجی لیزری داپلر (که داده‌برداری به صورت تصادفی صورت می‌گیرد)، این نقص در داده‌برداری می‌تواند به صورت شدیدی اثر معکوسی بر اندازه‌گیری آبخار انرژی داشته باشد. با توجه به چالش‌هایی که در راه عملیات پس‌پردازش سیگنال‌های حاصل از روش سرعت‌سنجی لیزری داپلر موجود است، برای محاسبه تمامی کمیت‌های متوسط و اغتشاشی جریان باید زمان اقامت وزنی⁵ در تمامی محاسبات اعمال شود [10].

4- زمان اقامت وزنی

سرعت با در نظر گرفتن حرکت ذره در فضای لاگرانژی توسط روش سرعت‌سنجی لیزری داپلر در مکان x توسط رابطه (1) محاسبه می‌شود [16].

$$\bar{u}_{io}(x, t) = \iiint_{\text{all space}} u_i(a, t) g(a) w(x - X[a, t]) d^3 \quad (1)$$

در آن $u_i(a, t)$ سرعت i -امین ذره با مکان اولیه a $g(a)$ تابع داده‌برداری است که مشخص می‌کند ذره در مکان a حضور دارد یا خیر. مکان‌های که ذرات حضور دارند با میدان جابه‌جایی آن‌ها $(X[a, t])$ محاسبه می‌شوند. $w(x)$ تابع وزنی که برای حجم کوچکی در اطراف مرکز حجم اندازه‌گیری در مکان x بوده و زمانی که ذره به حجم وارد می‌شود روشن و زمان خارج شدن ذره خاموش می‌شود. این تابع وزنی بدون بعد بوده و بنا به تعریف زمانی که از آن در سراسر حجم انتگرال گرفته شود برابر حجم اندازه‌گیری است (رابطه (2)).

$$V(x) = \iiint_{\text{all spaced}} w(x') d^3 x' \quad (2)$$

در کارهای معدودی اشاره شده است که زمانی که از داده‌برداری تصادفی استفاده شود نتایج غلطی برای ممان‌هایی چون سرعت متوسط به دست می‌آید، مگر آن‌که زمان مرده در داده‌برداری در محاسبات لحاظ شود. برای رفع این مشکل جورج و همکاران [16] رابطه (3) را پیشنهاد کردند.

$$\iiint_{\text{all space}} g(a) w(x - X[a, t]) d^3 a = \mu V \approx \frac{1}{T} \sum_{n=0}^{N-1} \Delta t_n \quad (3)$$

در آن $\mu = g(a)$ تعداد ذرات مورد انتظار در واحد حجم، Δt_n مدت زمان حضور n ذره، T طول زمان داده‌برداری و V حجم اندازه‌گیری است. با در نظر گرفتن روابط (3,1)، سرعت متوسط ذرات در یک نقطه را می‌توان از رابطه (4) محاسبه کرد.

$$\begin{aligned} \bar{u}_{io} &= \iiint_{\text{all space}} u_i(a, t) g(a) w(x - X[a, t]) d^3 a \\ &= \mu V \bar{u}_i \\ &\approx \lim_{\substack{T \rightarrow \infty \\ N \rightarrow \infty}} \frac{1}{T} \left\{ \sum_{n=0}^{N-1} \int_{t_n}^{t_n + \Delta t_n} u_{io}(t) dt \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

⁵ Residence time weighting

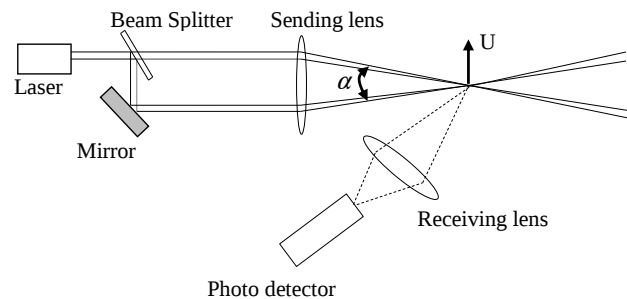


Fig. 2 Schematic of Laser Doppler Anemometry (LDA) process

شکل 2 طرح‌واره مراحل روش سرعت‌سنجی لیزری داپلر

محاسبات مربوط به پس‌پردازش داده‌ها با استفاده از ابررایانه شیخ‌بهایی در دانشگاه صنعتی اصفهان انجام شده است.

3- پس‌پردازش داده‌ها

چالش‌های موجود در تفسیر سیگنال‌ها در روش سرعت‌سنجی لیزری داپلر به قرار زیر است.

داده‌برداری تصادفی² (ولی متناسب با سرعت): داده‌برداری به زمان ورود ذره به نقطه مورد بررسی (حجم مورد اندازه‌گیری) بستگی دارد و این داده‌برداری به صورت غیر یکنواخت است و به سرعت جریان بستگی دارد. به عبارت دیگر فرایند داده‌برداری و داده‌های ثبت‌شده از یکدیگر مستقل نیستند.

خطای سرعت³: از آن‌جا که فرایند داده‌برداری خود به سرعت جریان بستگی دارد، اطلاعات ثبت‌شده می‌تواند به طور چشم‌گیری همراه با خطا باشد. از آن‌جا که در سرعت‌های جریان بیشتر احتمال جمع‌آوری داده‌های بیشتری وجود دارد، خطای داده برداری معمولاً (اما نه همیشه) به سمت سرعت‌های بیشتر است [8]. در حقیقت برای یک زمان اندازه‌گیری مشخص (t_d)، ذرات با سرعت بالاتر به تعداد دفعات بیشتری نسبت به ذرات با سرعت کمتر از یک حجم اندازه‌گیری مشخص عبور می‌کنند؛ بنابراین با استفاده از روش میانگین‌گیری تجمعی از سرعت کل ذرات عبوری از حجم کنترل، سرعت متوسط به دست آمده بیشتر متعلق به ذرات با سرعت بیشتر است، سرعت متوسط جریان بیش از سرعت متوسط واقعی تخمین زده می‌شود.

سیگنال متناوب: در روش سرعت‌سنجی لیزری داپلر تنها زمانی داده‌برداری انجام می‌شود که ذره از داخل حجم اندازه‌گیری عبور کند. این بدین معنی است که بسیاری از اوقات داده‌برداری انجام نمی‌شود. شکل 3 این مطلب را زمانی که یک منحنی پیوسته سرعت موجود است نشان می‌دهد. در این شکل ستون‌های خاکستری نشان‌دهنده سیگنال‌های موجود که توسط دستگاه دریافت شده است.

طبیعت قطع-وصلی داده‌برداری در روش سرعت‌سنجی لیزری داپلر سبب می‌شود که نتوان این سیگنال‌ها را مانند سیگنال‌های آنالوگ تحلیل کرد. در صورتی که سیگنال‌ها در این روش مانند داده‌های به دست آمده از روش‌های با نرخ داده‌برداری یکسان پردازش شود، خطای بسیار زیادی در محاسبه ممان‌های اغتشاشی ایجاد می‌شود.

زمان مرده⁴: روش سرعت‌سنجی لیزری داپلر مانند بیشتر تجهیزات آزمایشگاهی خاصیت جریان را برای یک زمان محدود (یک حجم محدود)

¹ Valenciennes

² Random sampling

³ Velocity bias

⁴ Dead time

کمیت متوسط جریان دارند. این تعداد باید به اندازه کافی زیاد باشند که مقدار خطای حاصل از تعداد داده برداری (رابطه (7)) بیشتر از 2% نباشد [7]. هان و همکاران [13] در سال 2014 رابطه (9) را برای ارتباط بین تعداد داده ها و خطای موجود در داده برداری ارائه کردند و مدعی شدند که با استفاده از این رابطه می توان از صرف زمان بیش از اندازه برای جمع آوری داده های اضافی به صورت رابطه (9) جلوگیری کرد.

$$\varepsilon = 19N^{-0.7} \quad (9)$$

با توجه به اطلاعات نویسندگان مقاله حاضر، این تنها رابطه آزمایشگاهی ارائه شده مابین تعداد داده ها و خطای مربوط به آن است. هان و همکاران [13] کمیت های متوسط و نوسانی جریان داخل یک کانال روباز را توسط روش سرعت سنجی لیزری داپلر مورد بررسی قرار دادند و بیشترین تعداد داده جمع آوری شده را برابر با 2×10^4 در نظر گرفتند. با این حال آنها در مقاله خود اشاره ای به شدت آشفته گی نقاط مورد بررسی نکردند و تأثیر آنرا در نظر نگرفتند.

در پژوهش حاضر، با مقایسه دو رابطه (8) و (9) برای دو نقطه از جریان برخورد جت به دیواره با میزان آشفته گی متفاوت صحت رابطه پیشنهادی توسط هان و همکاران [13] بررسی می شود. برای این کار ابتدا شدت آشفته گی مؤلفه عمودی سرعت به صورت $I_v = \sqrt{v'^2}/V_{\text{mean}}$ تعریف می شود.

سپس دو نقطه بر روی خط مرکزی جت به نام های نقاط 1 و 2 که به ترتیب در فاصله بی بعد y/H برابر با 0.8 و 0.98 از خروجی نازل قرار دارند را در نظر می گیریم. مقدار شدت آشفته گی برای دو نقطه 1 و 2 به ترتیب برابر با 26% و 15% است. تعداد داده های جمع آوری شده برای هر دو نقطه برابر با $N = 4.6 \times 10^4$ است.

شکل 4 خطای محاسبه مؤلفه سرعت عمودی را بر حسب تعداد داده های جمع آوری شده (رابطه (8)) را برای دو نقطه مذکور نشان داده و با رابطه ارائه شده توسط هان و همکاران [13] (رابطه (9)) مقایسه می کند. همانطور که در شکل 4 مشاهده می شود، مقدار خطا در شروع داده برداری بسیار زیاد بوده و با افزایش تعداد داده ها از میزان خطا کاسته می شود.

میزان این خطا برای نقطه 2 که میزان شدت آشفته گی بالاتری دارد بسیار بیشتر از خطا در نقطه 1 است به طوریکه با جمع آوری حدود 4000 داده، خطای داده برداری در نقطه 1 حدود 4% است، در حالیکه خطا در نقطه 2 در

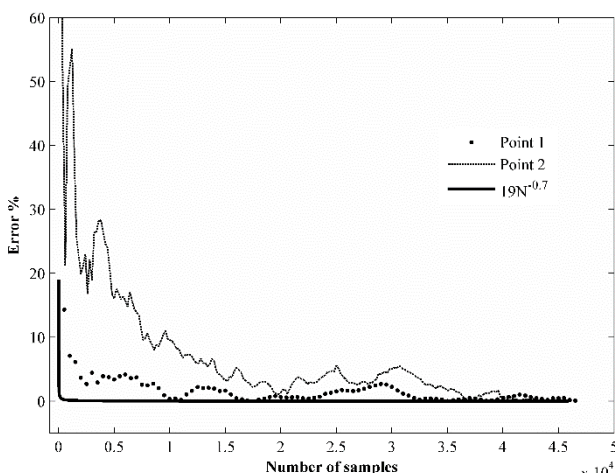


Fig. 4 Averaged velocity error vs. sampled data number comparison to Han et al. [13] correlation

شکل 4 خطای محاسبه سرعت متوسط جریان بر حسب تعداد داده های جمع آوری شده و مقایسه آن با رابطه پیشنهادی هان و همکاران [13] (خط ممتد)

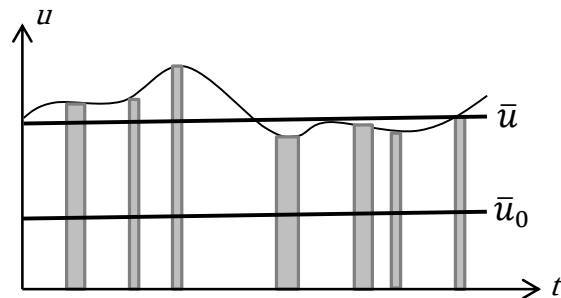


Fig. 3 Schematic of flow velocity curve (u) and random sampled data u_0 (gray bar) [10]

شکل 3 طرحی از منحنی سرعت جریان u و داده برداری متناوب u_0 (میله های خاکستری) [10]

زمانی که فرایند پایا باشد به جای انتگرال زمانی می توان از متوسط تجمعی استفاده کرد. از این رابطه دیده می شود که سرعت متوسط را می توان با رابطه (5) تقریب زد.

$$\bar{u}_i = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} u_i(t_n) \Delta t_n}{\sum_{n=0}^{N-1} \Delta t_n} \quad (5)$$

رابطه (6) با استفاده از روشی مشابه با آنچه در بالا بیان شد برای تخمین واریانس سرعت های لحظه ای به دست می آید.

$$\overline{u_i^2} = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} [u_i(t_n) - \bar{u}_i]^2 \Delta t_n}{\sum_{n=0}^{N-1} \Delta t_n} \quad (6)$$

5- نتایج و بحث

5-1- بررسی تأثیر تعداد داده های جمع آوری شده بر سرعت متوسط

یکی از عوامل ایجاد خطا در داده برداری ناشی از تعداد داده های جمع آوری شده در یک نقطه است. معمولاً بیان می شود که تعداد 10^4 داده برای جریان آشفته در یک نقطه کافی است تا کمیت های متوسط جریان (مانند سرعت متوسط) از تعداد داده ها مستقل شوند [7]. با این حال به نظر می رسد که این تعداد داده برای همه جریان ها درست نباشد و به میزان شدت آشفته گی جریان بستگی دارد.

برای بررسی تأثیر داده های جمع آوری شده بر سرعت متوسط در یک نقطه می توان سرعت متوسط جریان در یک نقطه را بر حسب تعداد داده های مورد بررسی به صورت رابطه (7) تعریف کرد [13].

$$\bar{V}_n = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n} \quad (7)$$

در آن $\bar{V}_n$ مؤلفه عمودی سرعت متوسط، n تعداد داده های به کار رفته در محاسبات سرعت متوسط و v_i مؤلفه عمودی سرعت لحظه ای در لحظه i است.

در این پژوهش برای بررسی خطای حاصل از تعداد داده های برداشت شده از جمعیت داده زیادی (مابین 2×10^4 و 1×10^5) بسته به شدت آشفته گی در هر نقطه استفاده شده است. برای این کار (بسته به سرعت جریان در نقطه مورد نظر) زمان داده برداری برای هر نقطه از 60 ثانیه (در نواحی دور از دیواره برخورد) تا 1000 ثانیه (در نزدیکی دیواره برخورد) در نظر گرفته شده است. برای بررسی خطای حاصل از تعداد داده های جمع آوری شده مقدار خطا به صورت رابطه (8) محاسبه می شود.

$$\varepsilon = \left| \frac{\bar{V}_n - \bar{V}_N}{\bar{V}_N} \right| \times 100\% \quad (8)$$

در آن $\bar{V}_N$ مؤلفه عمودی سرعت محاسبه شده توسط N داده (بیشترین تعداد داده) است. تعداد داده های جمع آوری شده تأثیر بسیاری بر محاسبه

در شکل 6 مشاهده می‌شود آن است که روند کیفی تغییرات سرعت متوسط برای هر دو حالت با و بدون استفاده از زمان اقامت در معادلات شبیه به یکدیگر هستند. تنها در تعداد کم داده‌ها ($n < 10000$) روند تغییرات سرعت برای دو حالت اندکی با یکدیگر متفاوت است.

شکل 7 پروفیل مقدار سرعت متوسط حاصل از دو روش سرعت سنجی تصویری ذرات دو بعدی [14] و سرعت سنجی لیزری داپلر در عدد رینولدز

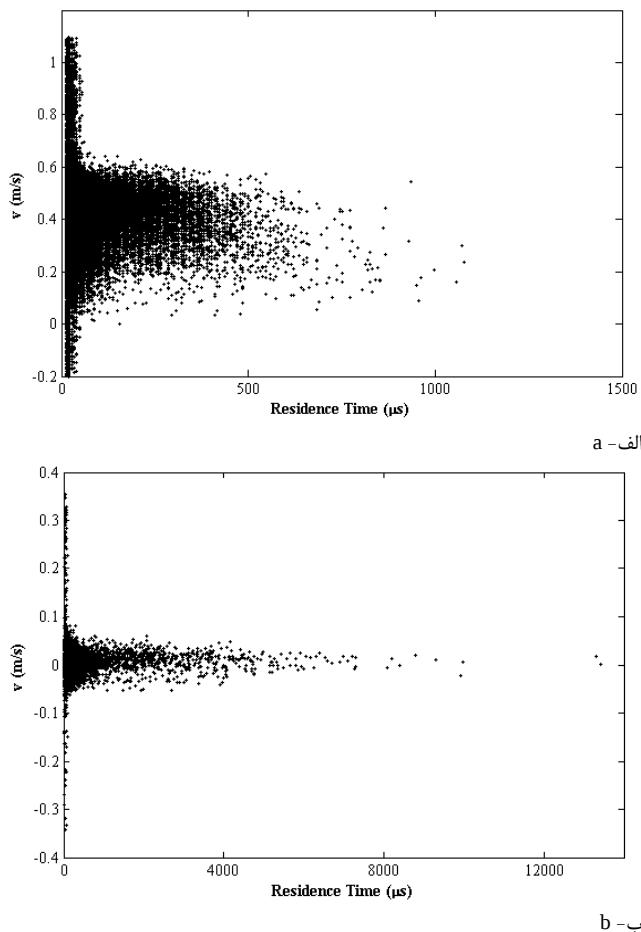


Fig. 5 velocity scattered diagram vs. residence time for two points in $y/H=0.4$ and a) $x/e=0$, b) $x/e=2$

شکل 5 نمودار پراکندگی سرعت‌ها برحسب زمان اقامت ذرات برای دو نقطه در $x/e=2$ و الف) $x/e=0$ و ب) $y/H=0.4$

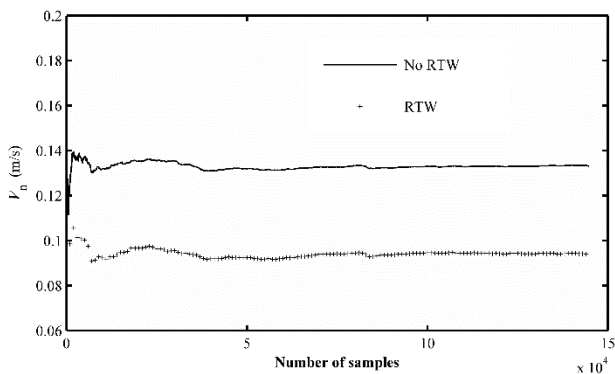


Fig. 6 The calculated averaged velocity with and without using residence time weighting (RTW)

شکل 6 سرعت متوسط محاسبه شده از روش سرعت سنجی لیزری داپلر با و بدون استفاده از زمان اقامت وزنی

حدود 30% است. نکته‌ای که در شکل 4 به وضوح مشاهده می‌شود، اختلاف بسیار زیاد خطای محاسبه شده در این پژوهش با مقدار محاسبه شده از رابطه (9) ارائه شده توسط هان و همکاران [13] است. این اختلاف تا تعداد داده حدود 3×10^4 برای نقطه 1 (خطا 2.53%) و 3.5×10^4 برای نقطه 2 (خطا 2.5%) ادامه دارد.

براساس شکل 4 برای این دو نقطه خطای کمتر از 2% زمانی اتفاق می‌افتد که تعداد داده‌های جمع‌آوری شده بیشتر از 4×10^4 باشد. مقایسه خطای حاصل از تعداد داده‌های جمع‌آوری شده (برحسب %) برای دو نقطه 1 و 2 و خطای پیش‌بینی شده توسط هان و همکاران [13] در جدول 1 آمده است.

2-5- تأثیر اعمال تابع وزنی در محاسبه سرعت‌های متوسط

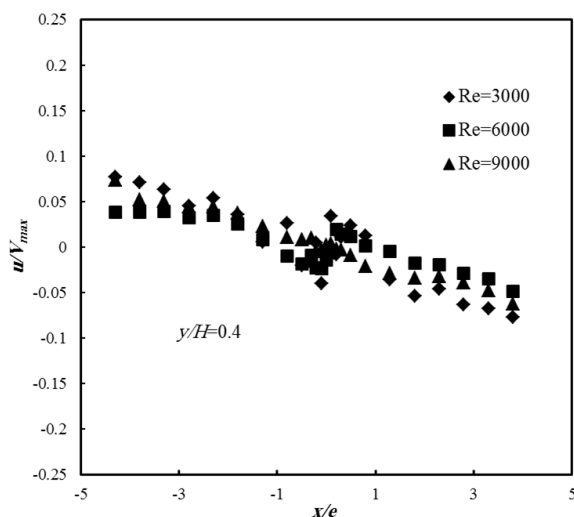
زمان اقامت ذرات درون حجم مورد اندازه‌گیری نیز می‌تواند سبب ایجاد خطا در محاسبه کمیت‌های متوسط و نوسانی شود. هنگامی اهمیت در نظر گرفتن زمان اقامت بیشتر می‌شود که سرعت متوسط جریان کم و در نتیجه زمان اقامت ذرات افزایش یابد. شکل 5 پراکندگی سرعت متوسط ذرات موجود در حجم اندازه‌گیری برحسب زمان اقامت ذرات را نشان می‌دهد.

شکل 5-الف مربوط به یک حجم اندازه‌گیری در فاصله بی بعد $y/H=0.4$ از خروجی نازل و بر خط مرکزی جت با سرعت متوسط 0.45 m/s و شکل 5-ب مربوط به نقطه‌ای با فاصله افقی $x/e=2$ از خط مرکزی جت و سرعت متوسط عمودی 0.02 m/s است.

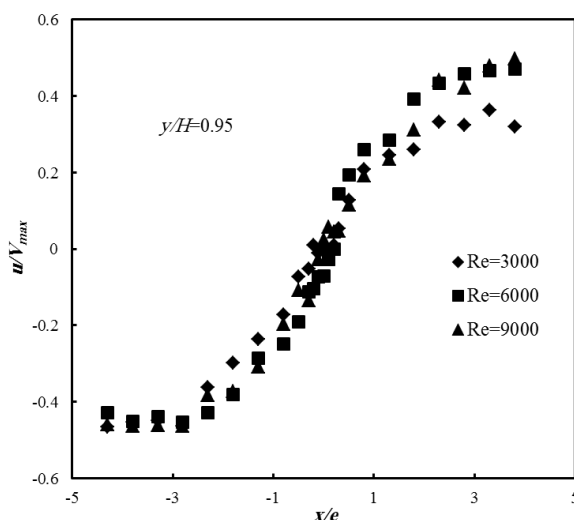
شکل 5-الف نشان می‌دهد زمانی که سرعت متوسط جریان زیاد است، بیشتر ذرات دارای زمان اقامت کمتر از 500 μs و هنگامی که سرعت متوسط جریان در یک نقطه کم است سهم ذرات با زمان اقامت کمتر بسیار رشد می‌کند (شکل 5-ب). شکل 5-الف همچنین نشان می‌دهد که ذرات با سرعت بیشتر (نزدیک به 1 m/s) زمان اقامت کمتری در مقایسه با ذرات با سرعت‌های کمتر دارند. در شکل 5-ب (مربوط به سرعت متوسط کمتر) مشاهده می‌شود که تعداد ذرات با سرعت اقامت کمتر از 100 μs بسیار ناچیز بوده و در عوض زمان اقامت ذرات با سرعت نزدیک به صفر تا حدود 8000 μs به طول می‌انجامد. با توجه به موارد یادشده می‌توان نتیجه گرفت که اهمیت در نظر گرفتن زمان اقامت در معادلات (مانند رابطه 5) زمانی افزایش می‌یابد که سرعت متوسط جریان کمتر باشد. شکل 6 سرعت متوسط جریان را در یک نقطه با سرعت متوسط 0.096 m/s برای دو حالت با استفاده از تابع وزنی زمان اقامت (رابطه 5) و بدون آن (متوسط‌گیری تجمعی) برحسب تعداد داده‌های جمع‌آوری شده نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل 6 مشاهده می‌شود استفاده از متوسط‌گیری تجمعی برای سرعت متوسط در این نقطه حدود 30% خطا (در $n > 10 \times 10^4$) به همراه دارد. نکته دیگری که

جدول 1 مقایسه خطای داده برداری (بر حسب %) برای دو نقطه 1 و 2 و رابطه (9)
Table 1 Comparison of data sampling error (%) at points 1, and point 2 and equation (9)

تعداد داده‌ها	خطا در نقطه 1	خطا در نقطه 2	$19N^{-0.7}$
5000	5.30	17.50	0.245
10000	3.01	10.53	0.151
20000	2.10	2.56	0.092
30000	2.53	5.23	0.069
40000	0.72	0.98	0.057
45000	0.05	0.12	0.053



الف - ا



ب - ب

Fig. 8 Transverse profiles of the transversal mean velocity component (u) for three different Reynolds number at a) the end of potential core ($y/H=0.4$) b) near the impingement plate ($y/H=0.95$)

شکل 8 پروفیل مؤلفه افقی سرعت متوسط در دو مقطع عرضی و برای سه عدد رینولدز مختلف (الف) در انتهای هسته پتانسیل جت ($y/H=0.4$)، (ب) در نزدیکی دیواره برخورد ($y/H=0.95$)

عمودی افزایش می‌یابد به طوری که در فاصله $y/H=0.95$ از خروجی نازل سرعت بی‌بعد عمودی در خط مرکزی جت (برای رینولدزهای مختلف) حدود $0.3 V_{max}$ بوده و جت تا فاصله حدود $x/e=4$ گسترش می‌یابد (شکل 9-ب). براساس شکل 9-ب در عدد رینولدز 3000 پروفیل سرعت عمودی در نزدیکی دیواره بیشتر گسترده شده است. دلیل این امر را می‌توان در کمتر بودن شدت برخورد جریان جت به دیواره و در نتیجه برگشت آهسته‌تر جریان به سمت پایین دانست.

4-5- تنش‌های آشفتگی جریان

شکل 10 تنش رینولدز مؤلفه عمودی جریان به صورت بی‌بعد ($I_v = \sqrt{v'^2}/V_{mean}$) را بر دو مقطع افقی $y/H=0.4$ (شکل 10-الف) و $y/H=0.95$ (شکل 10-ب) را برای دو عدد رینولدز 6000 و 9000 نشان می‌دهد. براساس شکل 10-الف در فواصل دورتر از دیواره برخورد بیشترین

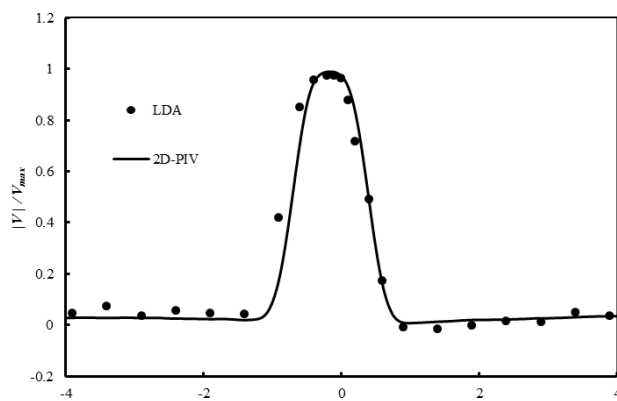


Fig. 7 comparison of measured mean velocity magnitude using 2D PIV [14] and LDA with RTW at $y/H=0.17$ ($Re=6000$)

شکل 7 مقایسه پروفیل مقدار سرعت‌های متوسط حاصل از دو روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات دوبعدی [14] و سرعت‌سنجی لیزری داپلر با در نظر گرفتن زمان اقامت در $(Re=6000) y/H=0.17$

6000 و بر خط افقی $y/H=0.17$ نشان می‌دهد. میزان حداکثر عدم قطعیت در این تحقیق در روش سرعت‌سنجی لیزری داپلر برای سرعت‌های متوسط 2% و برای تنش‌های رینولدز 4% است.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود نتایج سرعت‌های متوسط از روش سرعت‌سنجی لیزری داپلر با در نظر گرفتن زمان اقامت (رابطه 5) تطابق خوبی را با نتایج حاصل با سرعت‌سنجی تصویری ذرات دوبعدی دارند که نشان‌دهنده دقت عملیات پس‌پردازش داده‌های راندوم با استفاده از زمان اقامت وزنی است.

3-5- سرعت‌های متوسط

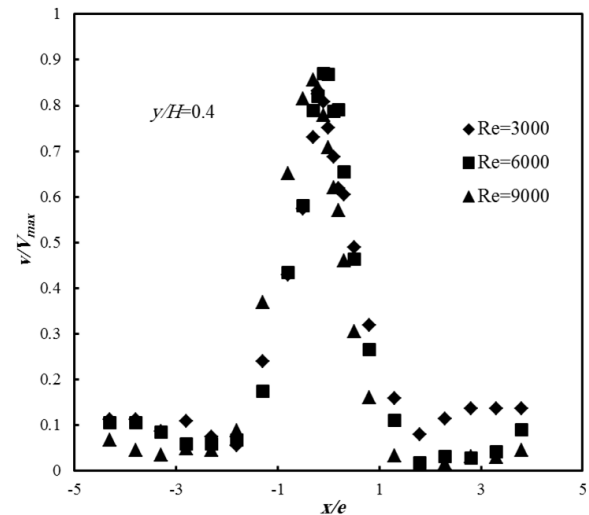
شکل‌های 8 و 9 به ترتیب پروفیل‌های سرعت‌های افقی و عمودی بی‌بعد متوسط برای جریان برخورد جت به دیواره برای سه عدد رینولدز 3000، 6000 و 9000 را نشان می‌دهند. این نتایج برای 2 مقطع افقی در هر عدد رینولدز جمع‌آوری و پس‌پردازش شده است.

در هر مقطع به طور متوسط 26 نقطه برای داده‌برداری انتخاب شده است که تمرکز این نقاط در نزدیکی خط مرکزی جت بیشتر است. برای رسم نمودارهای شکل‌های 8 و 9، سرعت‌های لحظه‌ای با فرکانس داده‌برداری بین 1 kHz تا 2 kHz (بسته به سرعت متوسط جریان) جمع‌آوری شده است. مؤلفه افقی سرعت به‌ویژه در نزدیکی خط مرکزی جت ($x/e=0$) در ناحیه جت آزاد براساس شکل 8-الف بسیار کم و نزدیک به صفر است. در این ناحیه سرعت افقی جت در سمت چپ خط مرکزی مثبت و در سمت راست آن منفی است. دلیل این امر کشیده شدن جریان اطراف جت به داخل جریان جت است. با نزدیک شدن به دیواره برخورد، جریان به سمت طرفین جت مرکزی جت منحرف شده، مؤلفه افقی سرعت متوسط رفته‌رفته افزایش یافته تا در نهایت سرعت افقی جریان به $0.55 V_{max}$ (در $y/H=0.95$) می‌رسد. سرعت‌های افقی بی‌بعد در نزدیکی دیواره برای اعداد رینولدز مختلف رفتار به نسبت مشابهی دارند.

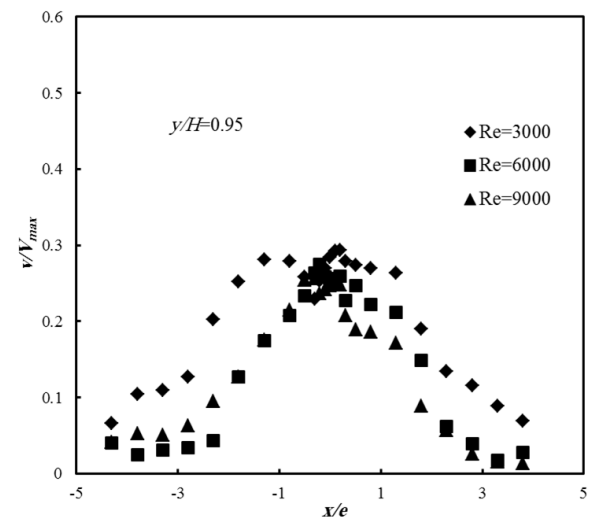
شکل 9-الف و 9-ب مؤلفه سرعت عمودی جریان در دو مقطع عرضی را نشان می‌دهند. مؤلفه عمودی سرعت در خط مرکزی جت در فواصل دورتر از صفحه برخورد ($y/H=0.4$) بسیار زیاد ($0.9 V_{max}$) است و ناحیه تأثیر سرعت جت تا حدود $x/e=1$ گسترش یافته است. با نزدیک شدن جت به دیواره برخورد از مؤلفه عمودی سرعت متوسط کاسته شده و ناحیه تأثیر سرعت

6- نتیجه‌گیری

در این مقاله از روش تجربی سرعت‌سنجی به روش سرعت‌سنجی لیزری داپلر برای تعیین مؤلفه‌های افقی و عمودی سرعت متوسط و همچنین تنش‌های رینولدز در جریان برخورد جت آشفته به دیواره استفاده شده است. آزمایش‌ها برای جت با سه عدد رینولدز 3000، 6000 و 9000 انجام شده و فاصله خروجی نازل تا دیواره برخورد 10 برابر عرض نازل در نظر گرفته شده است. در این مقاله تأثیر تعداد داده‌های جمع‌آوری‌شده در روش سرعت‌سنجی لیزری داپلر بر خطای به‌وجودآمده در سرعت متوسط جریان بررسی شد. نتایج حاکی از آن است که تعداد داده‌ها در هر نقطه باید متناسب با شدت آشفتگی جریان در آن نقطه افزایش یابد تا خطای اندازه‌گیری زیر 2% حاصل شود. در رابطه تخمین خطای داده‌برداری ارائه‌شده توسط هان و همکاران [13] کمیت شدت آشفتگی در نظر گرفته نشده بود و همین امر سبب می‌شود رابطه ایشان خطاهای ناشی از داده‌برداری را تا 30% کمتر از مقدار



الف- a



ب- b

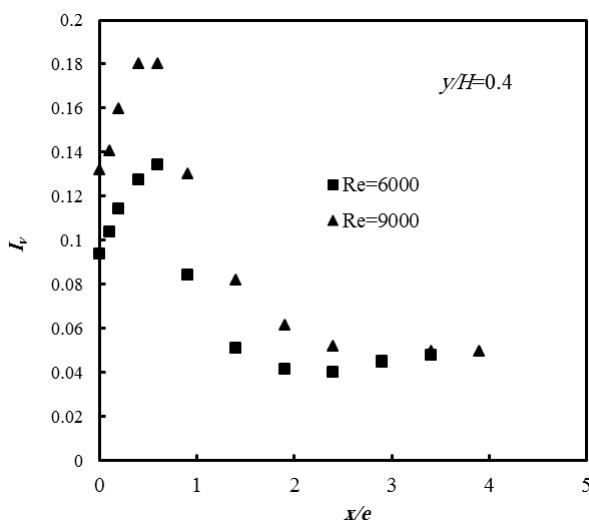
Fig. 9 Transverse profiles of the longitudinal mean velocity component (v) for three different Reynolds number at a) the end of potential core ($y/H=0.4$) b) near the impingement plate ($y/H=0.95$)

شکل 9 پروفیل مؤلفه عمودی سرعت متوسط در دو مقطع عرضی و برای سه عدد رینولدز مختلف در الف) انتهای هسته پتانسیل جت ($y/H=0.4$) ب) نزدیکی دیواره برخورد ($y/H=0.95$)

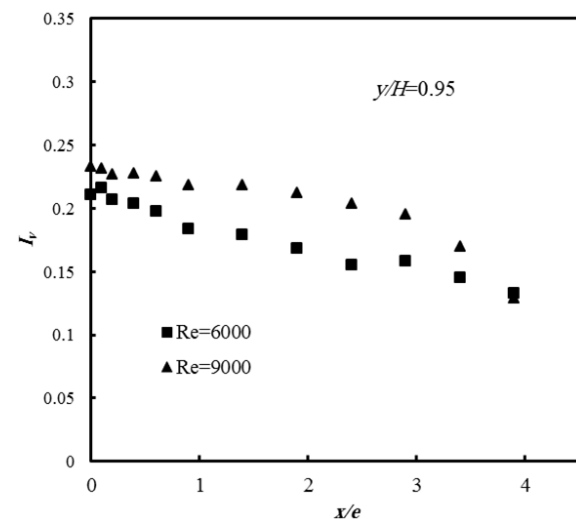
مقدار آشفتگی جریان در ناحیه لایه برشی جت (محدوده نزدیک به $x/e=0.5$) واقع است و با فاصله گرفتن از خط مرکزی جت از مقدار تنش‌های آشفتگی کاسته می‌شود.

در نزدیکی دیواره (شکل 10-ب) مقدار تنش‌های آشفتگی در نزدیکی خط مرکزی جت افزایش یافته و بیشترین مقدار را به خود اختصاص می‌دهد که دلیل این امر وجود کرنش‌های فشاری زیاد در نزدیکی ناحیه سکون و تأثیر آن بر جریان جت است. لایه مرزی جت دیواره با فاصله گرفتن از خط مرکزی جت در مجاورت دیواره تشکیل شده و سبب وجود آشفتگی زیاد در این نواحی می‌شود.

همانطور که در شکل‌های 10-الف و 10-ب نشان داده شده الگوی رفتاری تنش‌های رینولدز برای دو عدد رینولدز 6000 و 9000 یکسان، هر چند که مقدار آن در جریان با رینولدز 9000 بیشتر است.



الف- a



ب- b

Fig. 10 Transverse profiles of the longitudinal dimensionless Reynolds stress term for two different Reynolds numbers at a) the end of potential core ($y/H=0.4$) b) near the impingement plate ($y/H=0.95$)

شکل 10 پروفیل تنش آشفتگی جریان در دو مقطع عرضی و برای دو عدد رینولدز مختلف در الف) انتهای هسته پتانسیل جت ($y/H=0.4$) ب) نزدیکی دیواره برخورد ($y/H=0.95$)

واقعی (برای تعداد داده 4000) تخمین زند. در بسیاری از تحقیقات پیشین حداکثر داده جمع‌آوری شده در یک نقطه برابر 2×10^4 در نظر گرفته شده، در حالی که در بررسی حاضر در نقاط با میزان آشفته‌گی بالا (بیش از 26%) حداقل داده مورد نیاز برابر 4×10^4 گزارش شده است.

در ادامه از زمان اقامت وزنی برای محاسبه مقادیر سرعت متوسط استفاده شد و تأثیر در نظر گرفتن این کمیت برای یک نقطه بر خط مرکزی جت و یک نقطه با فاصله $x/e=2$ از خط مرکزی جت در ناحیه جت آزاد مطالعه شد. نتایج نشان داد که اهمیت در نظر گرفتن زمان اقامت ذرات در حجم مورد اندازه‌گیری در مکانی با سرعت متوسط بالا کمتر است. در این حالت بیشتر ذرات دارای زمان اقامت کمتر است، ولی در نقاط با فاصله از خط مرکزی (سرعت متوسط در آن‌جا کم است) در نظر نگرفتن زمان اقامت می‌تواند در محاسبه سرعت متوسط تا 30% خطا همراه داشته باشد.

سرعت‌های متوسط به‌دست‌آمده با استفاده از زمان اقامت در معادلات، تطابق خوبی با نتایج حاصل از روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات دوبعدی [14] دارد، همچنین جهت بررسی ساختارهای متوسط و نوسانی جریان در اعداد رینولدز مختلف، سرعت‌های متوسط جریان برخورد جت به دیواره برای سه عدد رینولدز یادشده در مقاطع مختلف جریان (26 نقطه در هر مقطع عرضی) اندازه‌گیری ارائه شده و رفتار جریان بررسی شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که الگوی رفتار جریان در اعداد رینولدز مختلف در نزدیکی دیواره شبیه به یکدیگر است، هر چند که با افزایش عدد رینولدز مقدار تنش آشفته‌گی در تمام نواحی به خصوص در لایه برشی جت افزایش می‌یابد.

7- فهرست علائم

e	عرض نازل (mm)
g	تابع داده‌برداری
H	فاصله نازل تا صفحه برخورد (mm)
I	تنش رینولدز بدون بعد
L	عمق محفظه برخورد (mm)
n	تعداد داده‌ها
Re	عدد رینولدز
T	مدت زمان داده‌برداری
u_i	مؤلفه بردار سرعت لحظه‌ای در جهت i (ms^{-1})
w	تابع وزنی

علائم یونانی

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

بالانویس‌ها

متوسط‌گیری زمانی	—
نوسانات	'

زیرنویس‌ها

شمارنده	i
مقدار متوسط زمانی	mean

8- تشکر و قدردانی

نویسندگان برخورد لازم می‌دانند که از مدیریت و عوامل آزمایشگاه کنترل اتوماتیک صنعتی و غیرصنعتی، مهندسی مکانیک و علوم رایانه واقع در دانشگاه ولانسیس کشور فرانسه برای همکاری در این پروژه و در اختیار قرار دادن امکانات آزمایشگاهی و همچنین مرکز ابررایانه شیخ‌بهایی دانشگاه صنعتی اصفهان برای مرحله پردازش داده‌ها کمال تشکر و قدردانی را انجام دهد.

9- مراجع

- [1] B. Weigand, S. Spring, Multiple jet impingement— a review, *Heat Transfer Research*, Vol. 42, No. 2, pp. 101-142, 2011.
- [2] R. Viskanta, Heat transfer to impinging isothermal gas and flame jets, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 6, No. 2, pp. 111-134, 1993.
- [3] N. Zuckerman, N. Lior, Jet impingement heat transfer: Physics, correlations, and numerical modeling, *Advances in heat transfer*, Vol. 39, pp. 565-631, 2006.
- [4] J. Baughn, S. Shimizu, Heat transfer measurements from a surface with uniform heat flux and an impinging jet, *Heat Transfer*, Vol. 111, No. 4, pp. 1096-1098, 1989.
- [5] D. Cooper, D. Jackson, B. E. Launder, G. Liao, Impinging jet studies for turbulence model assessment—I. Flow-field experiments *Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, No. 10, pp. 2675-2684, 1993.
- [6] L. F. Geers, M. J. Tummers, K. Hanjalić, Experimental investigation of impinging jet arrays, *Experiments in fluids*, Vol. 36, No. 6, pp. 946-958, 2004.
- [7] M. J. Tummers, J. Jacobse, S. G. J. Voorbrood, Turbulent flow in the near field of a round impinging jet, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, No. 23-24, pp. 4939-4948, 2011.
- [8] H.-E. Albrecht, N. Damaschke, M. Borys, C. Tropea, Laser Doppler and phase Doppler measurement techniques, Second Edition, pp. 337-405, Berlin, Springer, 2013.
- [9] P. Buchhave, C. M. Velte, W. K. George, The effect of dead time on randomly sampled power spectral estimates, *Experiments in Fluids*, Vol. 55, No. 2, pp. 1-8, 2014.
- [10] C. M. Velte, W. K. George, P. Buchhave, Estimation of burst-mode LDA power spectra, *Experiments in Fluids*, Vol. 55, No. 3, pp. 1-20, 2014.
- [11] R. Semaan, *Experimental investigations of swirling jets*, PhD Thesis, University of Wyoming, Ann Arbor, 2010.
- [12] S. Toutiaei, *Experimental investigation of turbulent swirling jets*, PhD Thesis, University of Wyoming, Ann Arbor, 2014.
- [13] Y. Han, S.-Q. Yang, N. Dharmasiri, M. Sivakumar, Effects of sample size and concentration of seeding in LDA measurements on the velocity bias in open channel flow, *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 38, No. 0, pp. 92-97, 8//, 2014.
- [14] A. Koched, M. Pavageau, F. Aloui, Vortex structure in the wall region of an impinging plane jet, *Applied Fluid Mechanics*, Vol. 4, No. 2 -s 1, pp. 61-69, 2011.
- [15] S. Maurel, C. Solliec, A turbulent plane jet impinging nearby and far from a flat plate, *Experiments in Fluids*, Vol. 31, No. 6, pp. 687-696, 2001.
- [16] W. K. George, Quantitative measurement with the burst-mode laser Doppler anemometer, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 1, No. 1, pp. 29-40, 1988.