


# Application of Post-Processing Methods on the Velocity Statistics Measured at Different Sampling Frequencies Using Acoustic Doppler Velocimeter

Farzin Homayounfar<sup>1</sup>, Babak Khorsandi<sup>2\*</sup>

1- PhD Candidate, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Tehran (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran.

\* [b.khorsandi@aut.ac.ir](mailto:b.khorsandi@aut.ac.ir)

Received: 13 November 2020, Accepted: 27 January 2021  J. Hydraul. Homepage: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

## Abstract

**Introduction:** In analyzing of hydraulic phenomena and turbulent flow problems, the most appropriate solution is to use physical and laboratory models. Due to the effects of precise measurement in the experimental works, in the turbulent flow fields, accurate measurement of velocity components helps to a better understanding of flow dynamics. Acoustic Doppler velocimetry (ADV) is a velocity measurement instrument and is among the most widely used methods in various hydraulic engineering applications both in the laboratory and field. The ADV instrument measures both of the mean and fluctuating characteristics of all three components of the velocity field. The most important reasons for using the ADV as a priority to other velocity measurement techniques are the portability of the device, the ability to measure turbid current, and the three-dimensional velocity measurement. Due to the presence of noise and spikes in ADV's velocity measurements, statistical parameters of velocity may be affected. For this reason, the post-processing of velocity measurements of acoustic Doppler velocimetry is essential in the hydraulic based research. Most of the studies in this field have been carried out within the channel, where the turbulence intensity is relatively low. So, it is necessary to evaluate the efficiency of the proposed methods in the flows, especially with high turbulence intensity.

**Methodology:** The experiments were carried out at the hydraulic laboratory of the civil engineering department of Amirkabir University. To minimize wall effects, experiments were conducted in a  $1 \times 1.7 \times 0.54$  m<sup>3</sup> upstream basin connected to a 6-m-long flume filled with water. An axisymmetric turbulent jet with a circular cross-section with 1cm diameter was emitted into the upstream basin with quiescent water. The jet was fed from a constant-head tank. A Georg Fischer d32 (Schaffhausen, Switzerland) DN 25 flowmeter with a measurement accuracy of 1% (of full-scale value) maintained to adjust the jet flow with a Reynolds number of 10000. The temperature of the water in the jet and that of the water in the basin were the same because the jet was fed from the water of the flume. The velocity field was measured using Nortek Vectrino Plus ADV at two sampling frequencies of 25 and 200 Hz in the self-similarity region. The instrument's probe consisted of four ceramic receivers and one ceramic transmitter connected to the electronics housing by a stem. To validate the ADV measurements, experiments were carried out in the self-similar zone of an axisymmetric

turbulent jet issued into quiescent water. Different types of spike removal and noise reduction filters, such as Goring and Nikora (spike removal), Hurther and Lemmin, and Khorsandi et al. (noise reduction), as well as their combination, have been used to improve the velocity statistics measured at different sampling frequencies. Results were compared with the measurements conducted using other techniques in past research such as Panchapakesan and Lumley (1993), Darisse et al. (2015), and Hussein et al. (1994).

**Results and Discussion:** ADV measurement verification shows that the amounts of spreading rate (S) and decay rate (B) of the jet are in a good agreement with previous studies that used different types of velocity measurement tools. Results highlight that changing sampling frequency does not significantly affect the amounts of decay rate and spreading rate. It is observed that the spike effect on the mean axial velocity is negligible. Evaluation of the velocity variance for the different ADV sampling frequencies reveals that noise causes a difference in the velocity measurement by different sampling frequencies. Applying different filters to velocity measurement data shows that Khorsandi et al. filter has the best agreement with the previous study. Results also show that Khorsandi et al. filter less dependent on the sampling frequency changing. In the near field of the jet nozzle, a combination of spike and noise post-processing filters has more efficiency on 200Hz sampling frequency data. This can be attributed to the presence of more spikes and noise in the area with more turbulence intensity. Applying combinations of both noise and spike post-processing filters improve the accuracy of the results.

**Conclusion:** Results revealed that the velocity variances measured at the higher sampling frequency were overestimated when compared to those measured at the lower sampling frequency. Post-processing of the data resulted in a better agreement of the statistics measured at different sampling frequencies. The application of combinations of both noise and spike filters are more effective than just using one filter. Finally, for the post-processing of velocity field measurements or near boundary flow measurements with low-quality data, the application of both the noise and spike filters is recommended.

**Keywords:** Acoustic Doppler velocimetry, Noise, Sampling frequency, Spike, Turbulent jet.



© 2021 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.  
This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

# تأثیر اعمال فیلترهای پس‌پردازش بر میدان سرعت جت آشفته اندازه‌گیری شده با بسامدهای نمونه‌برداری مختلف به‌وسیله سرعت‌سنج صوتی داپلر

فرزین همایونفر<sup>۱</sup>، بابک خورسندی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

\* b.khorsandi@aut.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۲۳، پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۰۸ و ب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

**چکیده:** سرعت‌سنج صوتی داپلر به‌عنوان یک ابزار اندازه‌گیری سرعت، در ارزیابی‌های هیدرولیک آزمایشگاهی و میدانی استفاده می‌شود. با توجه به اینکه فراسنجه‌های آماری سرعت اندازه‌گیری شده به‌وسیله سرعت‌سنج صوتی داپلر ممکن است تحت تأثیر عامل‌های خطا از جمله نویز و اسپایک قرار گیرند، بنابراین پس‌پردازش داده‌ها ضروری می‌باشد. در این پژوهش به‌منظور ارزیابی دقت دستگاه سرعت‌سنج صوتی داپلر، آزمایش‌هایی بر روی یک جت آشفته متقارن محوری منتشر شده در محیط ساکن، با عدد رینولدز ۱۰۰۰۰ انجام شد. میزان میدان سرعت به‌وسیله سرعت‌سنج و کترینو پلاس با بسامدهای نمونه‌برداری ۲۵ و ۲۰۰ هرتز در ناحیه خودمتشابه جت متقارن محوری اندازه‌گیری شدند. به‌منظور اصلاح سرعت اندازه‌گیری شده، از روش‌های مختلف پس‌پردازش حذف نویز و اسپایک و ترکیب آنها استفاده شد. میزان تأثیر روش‌های مختلف حذف اسپایک و نویز بر داده‌های اندازه‌گیری شده سرعت (در بسامدهای مختلف نمونه‌برداری) در جت آشفته متقارن محوری در جهت‌های محوری و شعاعی ارزیابی شد. به‌منظور ارزیابی میزان کارایی و دقت، نتایج با داده‌های اندازه‌گیری شده پژوهش‌های معتبر پیشین مقایسه شد. نتایج نشان داد استفاده از بسامد بیشتر در اندازه‌گیری سرعت‌سنج صوتی داپلر، باعث افزایش نویز و در نتیجه افزایش واریانس سرعت می‌شود. اعمال روش‌های پس‌پردازش حذف نویز و اسپایک باعث بهبود کیفیت داده‌ها و همچنین سازگاری واریانس سرعت اندازه‌گیری شده با بسامدهای نمونه‌برداری متفاوت شد. درنهایت توصیه می‌شود در پژوهش‌هایی مانند اندازه‌گیری‌های میدانی یا نزدیک مرزهای جریان که داده‌های اندازه‌گیری شده دارای کیفیت کمتری هستند از ترکیب فیلترها حذف نویز و اسپایک برای رسیدن به داده‌های با دقت بالاتر استفاده کرد.

**کلید واژگان:** اسپایک، جت آشفته، سرعت‌سنج صوتی داپلر، بسامد نمونه‌برداری، نویز.

## ۱- مقدمه

دینامیکی جریان کمک می‌کند. سرعت‌سنج صوتی داپلر<sup>۱</sup> یکی از مهم‌ترین ابزار اندازه‌گیری سرعت جریان در کارهای میدانی و آزمایشگاهی می‌باشد. از مهم‌ترین علت‌های که استفاده از سرعت‌سنج صوتی داپلر را نسبت به دیگر روش‌های اندازه‌گیری سرعت در نخستویت قرار داده است، قابلیت جابه‌جایی دستگاه، توانایی اندازه‌گیری جریان کدر و اندازه‌گیری سه بعدی سرعت جریان با دقت مناسب می‌باشد. این علت‌ها باعث شده است از سرعت‌سنج صوتی داپلر به‌ویژه در ارزیابی‌های میدانی و

در تحلیل بسیاری از پدیده‌های پیچیده هیدرولیکی و مسئله‌های حاکم بر جریان‌های آشفته، مناسب‌ترین راه حل ممکن استفاده از مدل‌های فیزیکی و آزمایشگاهی است. در پژوهش‌های آزمایشگاهی، اندازه‌گیری دقیق متغیرهای آزمایش دارای اهمیت بالایی است. لذا استفاده از ابزارهای مناسب و کاربردی برای اندازه‌گیری دقیق ویژگی‌های جریان مهم است. در میدان جریان آشفته اندازه‌گیری دقیق مؤلفه‌های سرعت به شناخت بهتر رفتار

<sup>1</sup> Acoustic Doppler velocimeter

پدیده هم‌اثرسازی سیگنال به علت اختلاف حالت (فاز) ناواقعی بین سیگنال رفت و برگشتی ایجاد می‌شود. احتمال رخداد خطای ناشی از پدیده هم‌اثرسازی سیگنال در سرعت‌سنج صوتی داپلر در سه حالت بیشتر است: نخست اینکه سرعت جریان از محدوده سرعت مجاز تعیین شده برای دستگاه تجاوز کند، دوم اینکه شدت آشفتگی جریان زیاد باشد و سوم اینکه محل اندازه‌گیری سرعت در نزدیکی مرزهای سخت (دیواره‌ها) باشد. در نزدیکی دیواره‌ها به علت انعکاس بخشی از امواج صوتی به وسیله مرز سخت، اندازه‌گیری سرعت سیال با دشواری روبه‌رو می‌شود (Goring and Nikora, 2002). در کارهای آزمایشگاهی وجود ذرات معلق کافی برای بازتاب موج‌های صوتی که به وسیله سرعت‌سنج صوتی داپلر به حجم نمونه برداری ارسال شده باعث کاهش اسپایک می‌شود. وجود اسپایک به‌طور معمول با کاهش شاخص نسبت سیگنال به نویز<sup>۳</sup> (SNR) همراه است.

(Goring and Nikora, 2002) روشی برای حذف اسپایک ارائه دادند. در دیدگاه پایه این روش در فضای فازی داده‌های درست به‌صورت یک گروه/خوشه هستند و همه داده‌های بیرون از این گروه/خوشه، اسپایک می‌باشند. ایشان برای اصلاح داده‌های نادرست ناشی از هم‌اثرسازی سیگنال از روش آستانه فضای فازی<sup>۴</sup> استفاده کردند. بعدها Wahl (2003) به‌منظور بهبود بیشتر کیفیت داده‌های اندازه‌گیری شده با اعمال تغییر در روش گورینگ و نیکورا فیلتر (صافی) اصلاحی جدیدتری را معرفی کرد. در ادامه (Cea et al. (2007)، Doroudian et al. (2010) و Parsheh et al. (2010) به صورت جداگانه به ارائه فیلترهایی برای بهبود بیشتر کیفیت داده‌های اندازه‌گیری شده و حذف اسپایک‌ها پرداختند و نتایج آن‌ها در پژوهش‌های داخلی و خارجی استفاده شده است (Khosronejad et al. 2016). Safarzadeh et al. (2016). بعدها روش گورینگ و نیکورا برای بهبود کیفیت داده‌هایی که تحت تأثیر اسپایک بوده‌اند در نرم‌افزار WinADV کاربردی شده و تا به امروز استفاده شده است. محققان روش‌هایی پیرامون حذف اثر داپلر نویز از نتایج اندازه‌گیری‌های سرعت‌سنج صوتی داپلر ارائه کرده‌اند که در ادامه به‌صورت خلاصه آورده شده است. نخستین ارزیابی پیرامون حذف داپلر نویز از نتایج اندازه‌گیری سرعت‌سنج داپلر صوتی

آزمایشگاهی هیدرولیکی بیشتر استفاده شود. همچنین عدم نیاز به واسنجی دستگاه از دیگر فواید مهم سرعت‌سنج صوتی داپلر نسبت به دیگر روش‌های اندازه‌گیری سرعت می‌باشد.

سرعت‌سنج صوتی داپلر از طریق ارسال موج صوتی از یک فرستنده به سمت یک حجم نمونه برداری به شکل استوانه (با قطر ۶ میلی‌متر و ارتفاع قابل تنظیم) که در فاصله ۵ سانتی‌متر از فرستنده واقع شده است. با دریافت امواج برگشتی به وسیله سه شاخک گیرنده، سرعت ذرات درون حجم نمونه برداری را اندازه‌گیری می‌کند. وجود فاصله ۵ سانتی‌متر بین حجم نمونه برداری و فرستنده دستگاه، میزان تأثیرگذاری ابزار بر میدان جریان را به کمترین می‌رساند. درکل عملکرد این ابزار بر مبنای پدیده داپلر شیفت (تغییر بسامد امواج رفت و برگشتی به واسطه برخورد با ذرات درون حجم نمونه برداری) است. به طوری که فرض می‌شود ذرات درون حجم نمونه برداری با سرعت موضعی جریان حرکت می‌کنند و همین سرعت موضعی جریان درون حجم نمونه برداری باعث ایجاد اختلاف بسامد در امواج صوتی ارسالی و دریافتی می‌شود (Goring and Nikora, 2002).

پژوهش‌هایی پیرامون مقایسه نتایج سرعت اندازه‌گیری شده به وسیله سرعت‌سنج صوتی داپلر با دیگر ابزار اندازه‌گیری سرعت توسط (Voulgaris and Lohrmann and Cabrera (1994)، Hurther and Lemmin (2008)، Trowbridge (1998)، Nikora and Goring, (1998) و Khorsandiet al. (2012) انجام شده است. نتایج نشان‌دهنده دقت مناسب سرعت‌سنج صوتی داپلر در اندازه‌گیری میزان سرعت میانگین و تأثیر بیشتر نویز بر فراسنجه‌های آشفتگی جریان (مانند واریانس سرعت و انرژی جنبشی آشفتگی) می‌باشد. از این رو به‌منظور بهبود دقت نتایج شناخت عامل‌های ایجاد خطا و استفاده از روش‌های پس‌پردازش برای افزایش دقت اندازه‌گیری‌ها بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. محققان بسیاری به ارزیابی داده‌های خام خروجی از دستگاه سرعت‌سنج صوتی داپلر پرداخته‌اند. در پژوهش‌های انجام شده دو عامل داپلر نویز<sup>۱</sup> و پدیده هم‌اثرسازی سیگنال یا اسپایک<sup>۲</sup> به‌عنوان منشأ عمده خطای ایجاد شده در داده‌های اندازه‌گیری شده به وسیله سرعت‌سنج صوتی داپلر شناخته شده است (Lane et al., 1998 و Goring and Nikora, 2002).

<sup>3</sup> Signal to noise

<sup>4</sup> Phase space thresholding method (PSM)

<sup>1</sup> Doppler noise

<sup>2</sup> Spike

بیشتر بررسی‌های انجام شده در این زمینه در جریان درون آبراهه بوده که شدت آشفستگی پایین می‌باشد. ارزیابی کارایی روش‌های ارائه شده در جریان‌های متفاوت به‌ویژه با شدت آشفستگی بالا ضروری می‌باشد. در این تحقیق تلاش شده است اثربخشی روش‌های مطرح پس‌پردازش حذف نویز و اسپایک ارائه شده در بررسی‌های پیشین و همچنین استفاده ترکیبی از آن‌ها بر روی اندازه‌گیری‌های سرعت‌سنج صوتی داپلر (در بسامدهای نمونه‌برداری متفاوت) در میدان سرعت یک جت آشفته متقارن محوری، ارزیابی شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- فیلترهای پس‌پردازش

برابر با بررسی منبع‌های صورت پذیرفته دو عامل داپلر نویز و پدیده هم‌اثرسازی سیگنال یا اسپایک به‌عنوان منشأ عمده خطای ایجاد شده در داده‌های اندازه‌گیری شده به‌وسیله سرعت‌سنج صوتی داپلر شناخته شده‌اند. فیلتر گورینگ و نیکورا<sup>۲</sup> به منظور حذف تأثیر اسپایک در داده‌های اندازه‌گیری شده سرعت توسط سرعت‌سنج صوتی داپلر استفاده می‌شود. دیدگاه پایه این روش فنی بر مبنای استفاده از آستانه فضای فازی داده‌ها می‌باشد. این فیلتر (صافی) برای شناسایی اسپایک، از مشتق‌گیری سیگنال استفاده می‌کند. با مشتق‌گیری از یک سیگنال، بسامدهای بالای موجود در سیگنال تشدید پیدا کرده و به‌آسانی قابل شناسایی می‌باشند. در این روش دوره (سری) زمانی نوسان‌های سرعت و همچنین مشتق‌های نخست و دوم آن در فضای سه‌بعدی که به فضای فازی معروف است ترسیم می‌شوند. مجموعه داده‌های درست به شکل یک بیضی‌گون نمایان می‌شوند (ویژگی‌های بیضی‌گون وابسته به میزان میانگین و انحراف معیار داده‌های دوره زمانی است) و داده‌هایی که از بیضی‌گون فاصله دارند، داده‌های نادرست به‌شمار آمده و می‌بایست اصلاح یا حذف شوند. نمونه‌ای از فضای فازی برای مؤلفه‌های طولی نوسانی سرعت در شکل (۱) قابل مشاهده می‌باشد. در روش فازی با مشتق‌گیری از یک سیگنال، مؤلفه‌های نوسان‌ها تشدید شده و داده‌های نادرست نمایان می‌شوند. در روش فازی، دوره زمانی میزان نوسانی سرعت ( $u$ ) به همراه

توسط (Garbini et al. (1982) در سال ۱۹۸۲ صورت پذیرفت. ایشان به‌منظور کاهش خطای داپلر از روش همبستگی دو نقطه‌ای سیگنال‌های دریافتی به‌وسیله یک حسگر مشخص از دو حجم نمونه‌برداری مجاور هم استفاده کردند. مبنای نظری روش ایشان وجود همبستگی بین داده‌های اندازه‌گیری شده به‌وسیله یک حسگر در دو حجم نمونه‌برداری مجاور هم بوده و کاهش میزان همبستگی نشان‌دهنده وجود نویز است.

(Hurth and Lemmin (2001) فیلتری برای حذف نویز از واریانس سرعت ارائه دادند. فیلتر ایشان برای نوع خاصی از دستگاه سرعت‌سنج صوتی داپلر که دارای دو حسگر گیرنده موج در جهت Z می‌باشد معتبر است.

(Khorsandi et al. (2012) به‌منظور صحت‌سنجی استفاده از سرعت‌سنج صوتی داپلر برای اندازه‌گیری جریان‌های آشفته، آزمایش‌هایی را بر روی یک جت آشفته متقارن محوری انجام دادند. به‌منظور ارزیابی میزان دقت عملکرد سرعت‌سنج صوتی داپلر، نتایج با داده‌های اندازه‌گیری شده به‌وسیله سیم داغ متحرک<sup>۱</sup> و نتایج معتبر پژوهش‌های پیشین ارزیابی شد. بعدها ارزیابی‌های مختلفی پیرامون حذف اثر داپلر نویز از داده‌های اندازه‌گیری شده به‌وسیله سرعت‌سنج داپلر صوتی انجام گرفته است که می‌توان به ارزیابی‌های (Moeini and Hejazi et al. (2016) et al. (2020) اشاره کرد.

جت آشفته یک جریان کلاسیک مکانیک سیال‌ها می‌باشد که ارزیابی‌های زیادی پیرامون ارزیابی میدان حاصل از انتشار آن صورت پذیرفته است. با توجه به شدت بالای آشفستگی جریان در جت آشفته، استفاده از این جریان برای صحت‌سنجی سرعت-سنج صوتی داپلر مناسب می‌باشد. در بیشتر پژوهش‌های صورت پذیرفته در زمینه صحت‌سنجی سرعت‌سنج صوتی داپلر، این دستگاه در جریان درون آبراهه ارزیابی شده است که از شدت آشفستگی زیادی ندارد. لذا استفاده از جریان جت‌های آشفته گزینه مناسبی برای صحت‌سنجی سرعت‌سنج صوتی داپلر در اندازه‌گیری جریان‌های آشفته است.

تاکنون بررسی‌های مختلفی به ارزیابی دقت سرعت‌سنج داپلر صوتی در اندازه‌گیری سرعت میانگین و واریانس سرعت پرداخته و روش‌های پس‌پردازش حذف اسپایک و نویز داپلر ارائه کرده‌اند.

<sup>1</sup> Flying hot-film anemometry

<sup>2</sup> Goring and Nikora

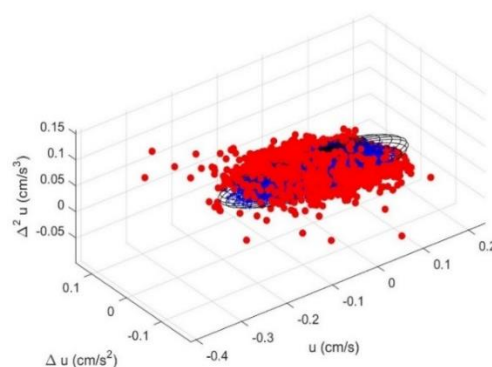
۱. زمان حضور ذرات معلق درون حجم کنترل، ۲. حرکت تصادفی ذرات معلق در ابعادی کوچکتر از اندازه حجم نمونه برداری، ۳. انحراف حسگرهای فرستنده و گیرنده امواج از جهت‌های صحت‌سنجی شده اشاره کرد (Voulgaris and Trowbridge, 1998).

داپلر نویز یک موج سفید می‌باشد که بر خلاف میزان سرعت میانگین، باعث تأثیرگذاری در فراسنجه‌های آشفتگی می‌شود، به طوری که تحت تأثیر داپلر نویز واریانس سرعت به صورت ناواقعی افزایش یافته و در نتیجه انرژی جنبشی آشفتگی بیشتر از میزان واقعی به دست می‌آید (Hurth and Lemmin, 2001). یکی از فیلترهای پس‌پردازشی که در این پژوهش برای حذف تأثیر نویز استفاده شده است فیلتر هرتر و لمین<sup>۱</sup> (Hurth and Lemmin, 2001) می‌باشد و برای نوع خاصی از دستگاه سرعت‌سنج صوتی داپلر که دارای دو حسگر گیرنده موج در جهت Z می‌باشد معتبر است. این فیلتر بر مبنای فرض ناهمبسته<sup>۲</sup> بودن سیگنال نویز ثبت شده از دو حسگر مختلف است. لذا با توجه به اندازه‌گیری همزمان سرعت راستای Z به وسیله دو حسگر مختلف، کوواریانس برابر واریانس حقیقی است  $\langle w_1 w_2 \rangle = \langle w_{T1}^2 \rangle = \langle w_{T2}^2 \rangle$  که  $w_1$  و  $w_2$  میزان‌های سرعت نوسانی ناشی از اندازه‌گیری حسگرهای جهت Z و  $w_{T1}$  و  $w_{T2}$  میزان‌های حقیقی سرعت نوسانی راستای Z می‌باشند. در ادامه با فرض اینکه همبستگی بین میزان‌های سرعت و نویز صفر است، با کسر میزان‌های کوواریانس از واریانس داده‌های اندازه‌گیری (شامل داپلر نویز است)، واریانس نویز سرعت به دست آمد.

$$\langle \sigma_w^2 \rangle = \langle w_{Measured}^2 \rangle - \langle w_1 w_2 \rangle \quad (1)$$

در عبارت بالا،  $\sigma_w$  میزان‌های نویز راستای Z و  $w_{Measured}$  میزان‌های سرعت نوسانی در راستای Z می‌باشند. با فرض مطلوب بودن حسگرهای دریافت‌کننده سیگنال، فرض شده است واریانس نویز در محورهای بای‌استاتیک دستگاه یکسان است. میزان‌های واریانس نویز به وسیله ماتریس انتقال برای سرعت‌های راستای X و Y محاسبه شد و در نهایت برای محاسبه میزان‌های حقیقی واریانس سرعت در راستای X و Y، میزان‌های واریانس نویز محاسبه شده برای این راستاها از واریانس سرعت‌های اندازه‌گیری شده کاسته می‌شود (Hurth and

مشفق نخست  $(\Delta u)$  و دوم  $(\Delta^2 u)$  آن‌ها در یک فضای سه‌بعدی ترسیم می‌شوند. داده‌های درست به صورت یک بیضی‌گون که ویژگی‌های آن تحت تأثیر میزان میانگین و انحراف معیار داده‌ها می‌باشد قرار می‌گیرند و داده‌های بیرون از بیضی‌گون داده‌های با دقت کمتر می‌باشند. در شکل (۱)، نقطه‌های آبی نشان‌دهنده داده‌های درست و نقطه‌های قرمز رنگ معرف اسپایک هستند. بعدها Wahl (2003) با تغییر در فیلتر گورینگ و نیکورا فیلتر جدیدی به منظور بهبود بیشتر کیفیت داده‌های اندازه‌گیری شده معرفی کرد. در این فیلتر، داده‌های نزدیک به اوج تابع چگالی احتمال تحت تأثیر فیلتر اصلاحی قرار نمی‌گیرند. دلیل اعمال این تغییر در روش گورینگ و نیکورا، حذف چندی از داده‌های درست در اطراف اسپایک‌ها بود. در فیلتر ترکیبی وال و گورینگ و نیکورا، اسپایک‌های حذف شده با نزدیک‌ترین داده‌های درست جایگزین می‌شوند تا پیوستگی دوره زمانی داده حفظ شود (با حذف اسپایک، در دوره زمانی شکاف ایجاد نشود) که این باعث بهبود اسپکتروم برای همه‌ی بسامدها شده است.



**Fig. 1** Phase space of the longitudinal component of velocity measured by acoustic Doppler velocimeter (obtained in the present study)

شکل ۱ فضای فازی مؤلفه طولی سرعت اندازه‌گیری شده به وسیله سرعت‌سنج صوتی داپلر (به دست آمده از این تحقیق)

مهم‌ترین منبع ایجاد نویز در داده‌های اندازه‌گیری شده به وسیله سرعت‌سنج صوتی داپلر، پدیده داپلر نویز است که ناشی از روش فنی اندازه‌گیری می‌باشد (Lohrmann and Cabrera, 1994). داپلر نویز در ابزارهایی که بر مبنای اصل داپلر و برگشت امواج برخوردی به ذرات معلق درون آب کار می‌کنند، تأثیرگذار است. از مهم‌ترین عامل‌های مؤثر در ایجاد پدیده داپلر نویز می‌توان به

<sup>2</sup> Uncorrelatet

<sup>1</sup> Hurth and Lemmin







جدول ۱ مقایسه نتایج به دست آمده در این بررسی با بررسی‌های معتبر پیشین

Table 1 Comparison of the obtained results in the present study with previous valid studies

Parameter	Hussein et al (1994)	Darisse et al (2015)	Panchapakesan and Lumley (1993)	Current study (25Hz)	Current study (200Hz)
Velocimeter	LDA (HCG)	LDA (DLB)	FHWA	ADV	ADV
Re	95500	140000	11000	10000	10000
x <sub>0</sub> /d	4	1.624	0	0.58	0.89
B	5.8	6.2	6.06	5.75	5.27
S	0.094	0.091	0.096	0.087	0.094

پس‌پردازش گورینگ و نیکورا تأثیر زیادی در میزان سرعت میانگین محوری جریان ندارد. لذا مشاهده می‌شود که تأثیر اسپایک بر میزان سرعت میانگین محوری جریان بسیار ناچیز می‌باشد. در ادامه شکل (۵-a) نشان‌دهنده نیمرخ شعاعی واریانس سرعت محوری جت می‌باشد که با مربع سرعت میانگین محوری جت بی‌بعد شده است. همچنین شکل (۵-b)، نمایش‌دهنده تغییر واریانس سرعت بر روی محور جت در راستای پایین‌دست می‌باشد.

مقایسه نتایج در شکل (۵) نشان‌دهنده افزایش میزان واریانس (به علت افزایش نویز) در اثر افزایش بسامد نمونه‌برداری از ۲۵ به ۲۰۰ هرتز می‌باشد. با افزایش بسامد نمونه‌برداری شمار پینگ‌های ۱ میانگین‌گیری شده به‌وسیله دستگاه کاهش یافته که این باعث افزایش نویز داپلر شده و واریانس سرعت را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

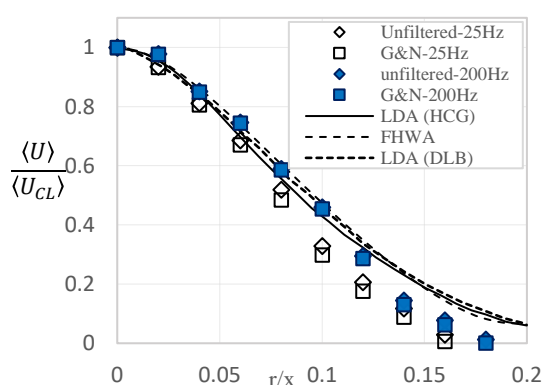


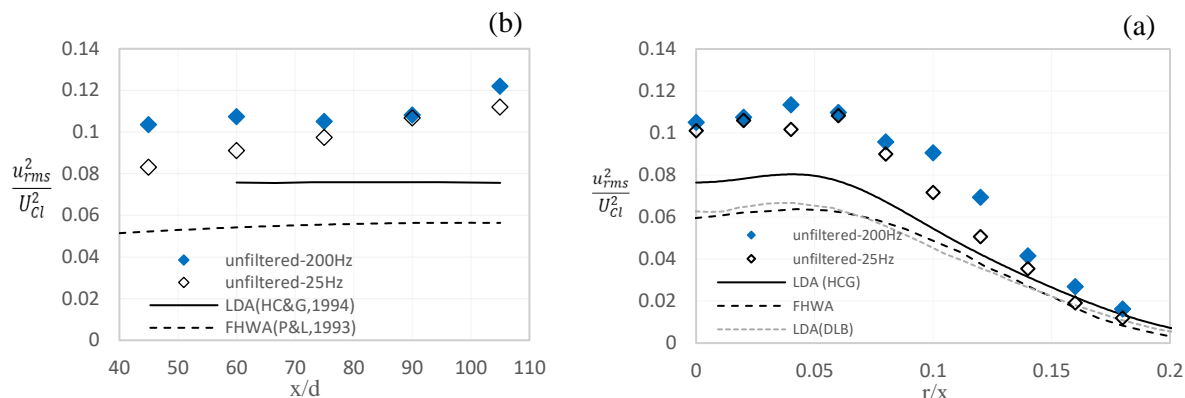
Fig. 4 Normalized axial mean velocity measured at  $\frac{x}{d} = 75$

شکل ۴ نیمرخ شعاعی سرعت محوری جت بی‌بعد شده در فاصله پایین‌دست  $\frac{x}{d} = 75$

نرخ پخش و نرخ استهلاك جریان سازگاری خوبی با بررسی‌های پیشین دارد. همچنین با اعمال فیلتر گورینگ و نیکورا (Goring and Nikora, 2002) بر میزان سرعت اندازه‌گیری شده، فراسنجه‌های نرخ استهلاك سرعت و نرخ پخش جریان به میزان ناچیز (کمتر از ۰.۲٪) تغییر کردند. مقایسه نتایج نشان داد، تغییر بسامد نمونه‌برداری تأثیری چشم‌گیری بر فراسنجه‌های نرخ پخش و نرخ استهلاك جریان ندارد. لذا می‌توان گفت تغییر بسامد نمونه‌برداری بر میزان سرعت میانگین نداشته و نتایج سرعت میانگین اندازه‌گیری شده به‌وسیله سرعت‌سنج صوتی داپلر دارای دقت بالایی می‌باشد. شکل (۴) نیمرخ شعاعی سرعت میانگین محوری را به نمایش می‌گذارد. در این شکل، سرعت محوری با سرعت محوری میانگین روی محور جت (UCL) بی‌بعد شده است. میزان سرعت میانگین اندازه‌گیری شده با بسامدهای ۲۵ و ۲۰۰ هرتز با نتایج به‌دست آمده از بررسی‌های پیشین مقایسه شده‌اند. جهت ارزیابی میزان تأثیرگذاری روش پس‌پردازش گورینگ و نیکورا (G&N) (Goring and Nikora, 2002) بر میزان سرعت میانگین، این فیلتر بر داده‌های اندازه‌گیری شده سرعت میانگین اعمال و نتایج در نمودار ارائه شده است.

با بررسی شکل (۴) سازگاری خوبی بین میزان سرعت میانگین اندازه‌گیری شده به‌وسیله سرعت‌سنج صوتی داپلر با دیگر روش‌های اندازه‌گیری سرعت مشاهده می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که نتایج به‌دست آمده از اندازه‌گیری با بسامدهای مختلف (۲۵Hz و ۲۰۰Hz) تقریباً سازگاری مناسبی دارند و می‌توان گفت میزان سرعت میانگین جریان تاحدودی مستقل از بسامدهای اندازه‌گیری می‌باشد. ارزیابی بیشتر شکل (۴) نشان‌دهنده این موضوع می‌باشد که اعمال روش

<sup>1</sup> Pings



**Fig. 5** Effects of sampling frequency changing on velocity statistical parameters. a. Radial profile of the axial velocity variance normalized by the squared centerline variance normalized by the squared centerline mean velocity, b. axial mean velocity along the jet axis

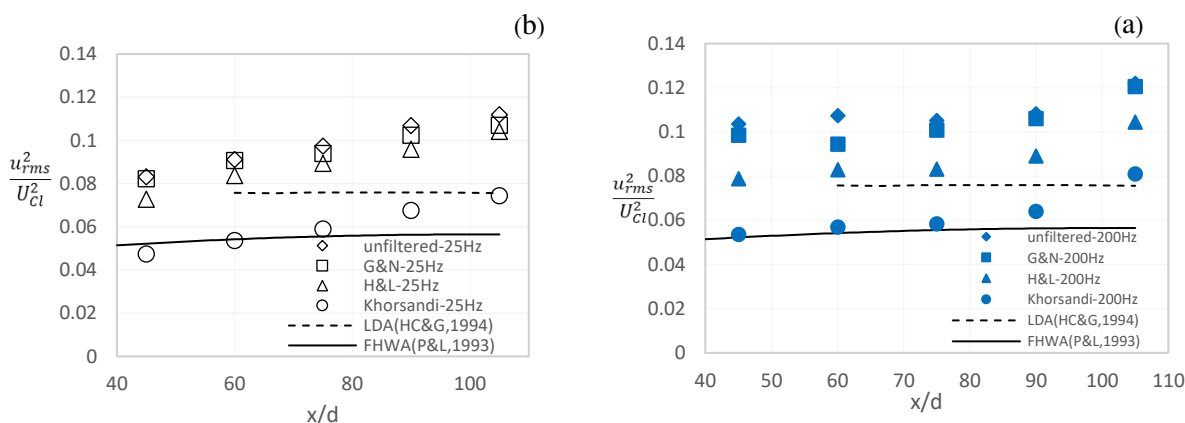
شکل ۵ تأثیر تغییر بسامد نمونه برداری بر فراسنجه‌های آماری سرعت. (a) نیمرخ شعاعی واریانس سرعت محوری جت، (b) مقادیر تغییر واریانس سرعت محوری در راستای محور جت

بیشتر میزان سرعت میانگین محوری در این محدوده می‌باشد. شکل (۶ a-b) واریانس سرعت محوری اندازه‌گیری شده روی محور جت به ترتیب برای بسامدهای ۲۰۰ و ۲۵ هرتز را به نمایش می‌گذارند. تأثیر اعمال فیلترهای حذف نویز و اسپایک (به‌صورت جداگانه) بر فراسنجه بی‌بعد شده واریانس سرعت در راستای محور جت نمایش داده شده است.

با بررسی شکل (۶) مشاهده می‌شود که اعمال فیلتر گورینگ و نیکورا (Goring & Nikora, 2002) بر میزان واریانس سرعت تأثیر چشم‌گیری ندارد. به‌منظور ارزیابی میزان کارایی فیلترها، نتایج اندازه‌گیری به‌وسیله دیگر ابزارهای اندازه‌گیری سرعت در بررسی‌های معتبر پیشین آورده شده است. میزان واریانس سرعت ناشی از اعمال فیلتر خورسندی و همکاران (Khorsandi

همچنین با حرکت به سمت گوشه‌های یا پایین دست جت، اختلاف بین میزان سرعت اندازه‌گیری شده با بسامدهای مختلف کاهش یافته است که این به دلیل کاهش آشفتگی و در نتیجه نویز داپلر در حرکت به سمت پایین دست است. با مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده با نتایج پژوهش‌های پیشین، مشاهده می‌شود که واریانس سرعت به‌وسیله سرعت سنج صوتی داپلر بیش از اندازه برآورد شده که این اختلاف همان‌گونه که در ادامه نشان داده خواهد شد به علت نویز می‌باشد. این در حالی است که روند تغییر داده‌ها همانند داده‌های اندازه‌گیری شده به‌وسیله دیگر ابزارهای اندازه‌گیری سرعت می‌باشد.

در شکل (۵ b-۵)، میزان فراسنجه بی‌بعد شده واریانس سرعت در نقطه‌های پایین دست تر افزایش می‌یابد که این به دلیل استهلاک

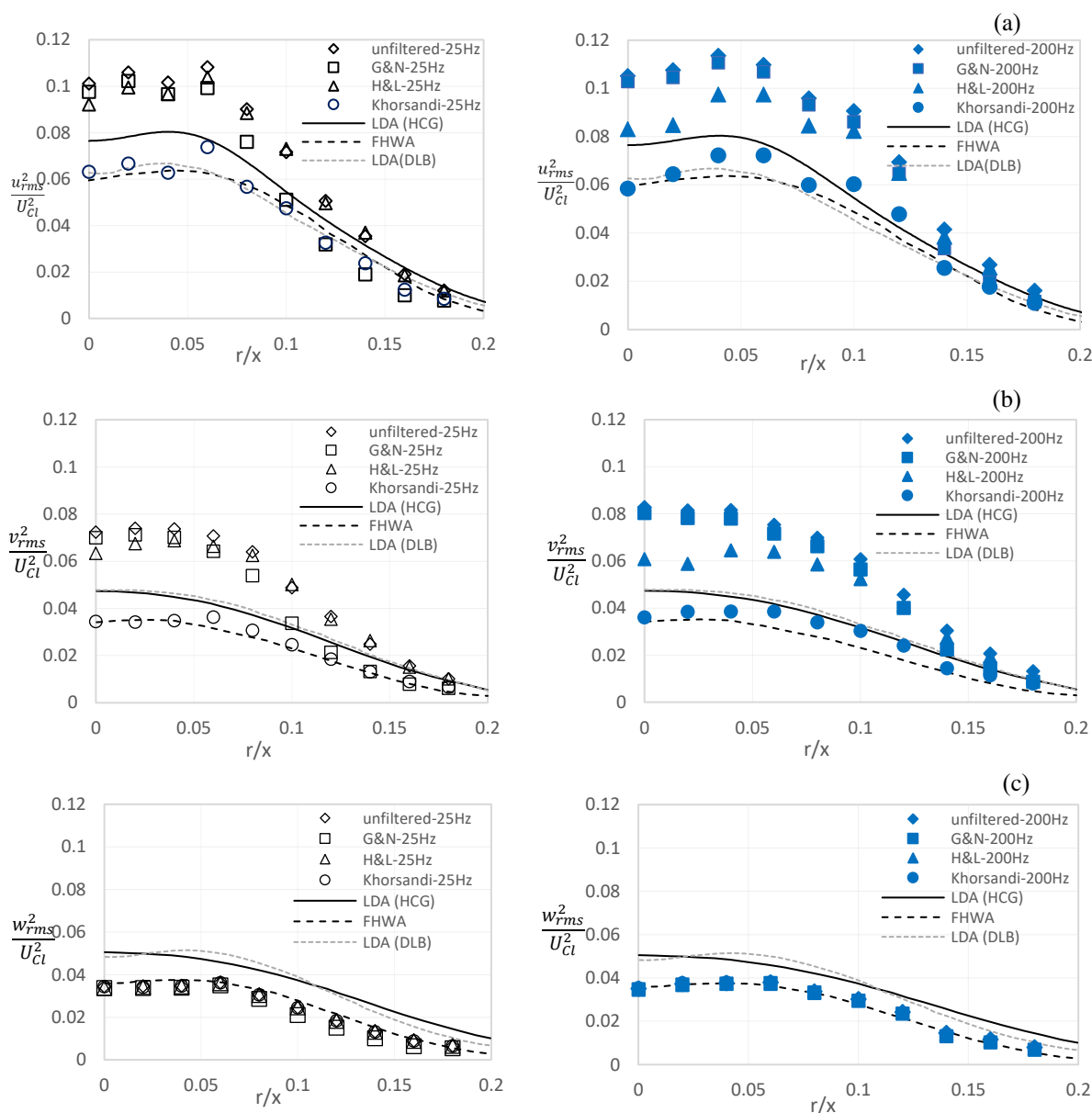


**Fig. 6** Effects of applying different noise and spike post-processing filters on the velocity variance along the jet axis with varying frequencies of sampling a. 200Hz, and b. 25 Hz

شکل ۶ تأثیر اعمال فیلترهای مختلف حذف نویز و اسپایک بر واریانس سرعت جریان در راستای محور جت با بسامدهای نمونه برداری a. ۲۰۰ Hz و b. ۲۵ Hz

محور جت، میزان واریانس سرعت کاهش می‌یابد. ارزیابی نتایج این نمودار نشان می‌دهد، با اعمال فیلتر خورسندی و همکاران (Khorsandi et al., 2012) بر داده‌های سرعت اندازه‌گیری شده، افزون بر دقت مناسب‌تر نتایج نسبت به بررسی‌های پیشین، نتایج ناشی از دو بسامد مختلف اندازه‌گیری باهم سازگاری دارند که نشان از وابستگی کمتر این فیلتر به تغییرپذیری بسامدهای نمونه‌برداری می‌باشد. فیلتر هرتر و لمین (Hurther and Lemmin, 2001) بر روی داده‌های اندازه‌گیری شده با بسامد ۲۰۰ Hz که نویز بیشتری دارد، تأثیرگذارتر است. همچنین اعمال

(et al., 2012) سازگاری خوبی با بررسی‌های پیشین دارد. افزون بر این، پس از اعمال این فیلتر واریانس سرعت اندازه‌گیری شده در بسامدهای ۲۵ و ۲۰۰ هرتز با هم همخوانی پیدا کرده که این نشان می‌دهد اختلاف نتایج در بسامدهای مختلف به علت نویز بوده است. در شکل (a، b، c) نیمرخ‌های شعاعی واریانس سرعت جت آزاد متقارن محوری در محیط ساکن به ترتیب در راستاهای x، y و z نشان داده شده‌اند. شکل‌های سمت راست و چپ به ترتیب نشان‌دهنده بسامد نمونه‌برداری ۲۰۰ Hz و ۲۵ Hz می‌باشند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با فاصله گرفتن از مرکز



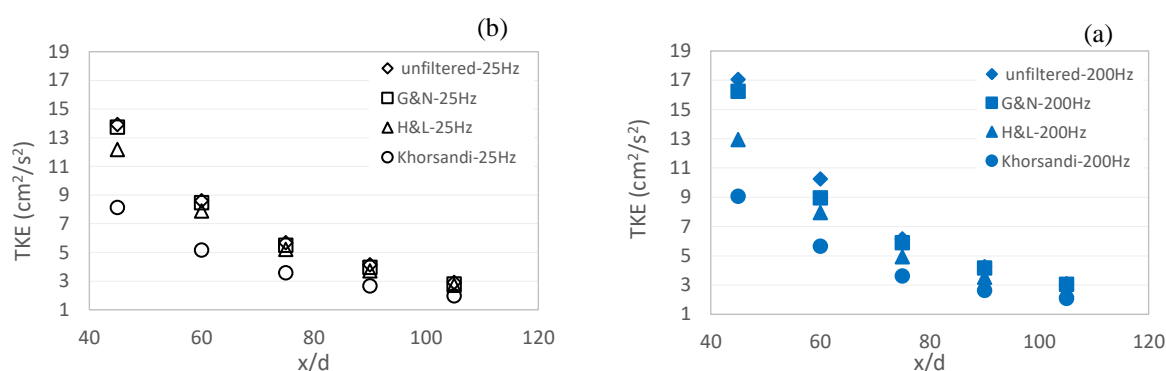
**Fig. 7** Radial profile of the free symmetric jet's axial velocity variance with different sampling frequencies 25Hz and 200Hz, a. Axial velocity (x-direction), b. Radial velocity (r-direction), and c. Vertical velocity (z-direction)

شکل ۷ نیمرخ شعاعی واریانس سرعت جت آزاد متقارن محوری برای بسامدهای اندازه‌گیری ۲۵ Hz و ۲۰۰ Hz، a. سرعت م حوری، b. سرعت جانبی (راستای r)، c. سرعت عمودی (راستای z)

نمایش می‌گذارند. تأثیر اعمال فیلترهای حذف نویز و اسپایک (به‌صورت جداگانه) بر تغییر انرژی جنبشی آشفتگی در راستای محور جت نمایش داده شده است. با حرکت به سمت پایین دست اختلاف بین میزان به‌دست آمده از فیلترهای پس‌پردازش مختلف با هم کمتر می‌شود که این به دلیل کاهش نویز در اثر کاهش آشفتگی جریان است. همچنین مشاهده می‌شود میزان تأثیرگذاری فیلترهای مختلف پس‌پردازش بر داده‌های اندازه‌گیری شده با بسامد اندازه‌گیری ۲۰۰ Hz بیشتر از حالت ۲۵ Hz می‌باشد.

فیلتر گورینگ و نیکورا (Goring and Nikora, 2002) تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر نتایج ندارد که به احتمال بیشتر به علت کیفیت بالای سیگنال و دوری از دیواره‌ها می‌باشد. با توجه به تقارن محوری جریان در انتشار جت، به لحاظ نظری، میزان واریانس سرعت در جهت‌های  $y$  و  $z$  می‌بایست یکسان باشند که عدم یکسان بودن نتایج گویای وجود میزان بیشتر نویز در جهت  $y$  می‌باشد.

شکل ۸ (a و b) تغییرپذیری‌های انرژی جنبشی آشفتگی روی محور جت به ترتیب برای بسامدهای ۲۰۰ و ۲۵ هرتز را به



**Fig. 8** Effects of applying different noise and spike post-processing filters on turbulence kinetic energy along the jet axis using different sampling frequencies of a. 200Hz, and b. 25 Hz

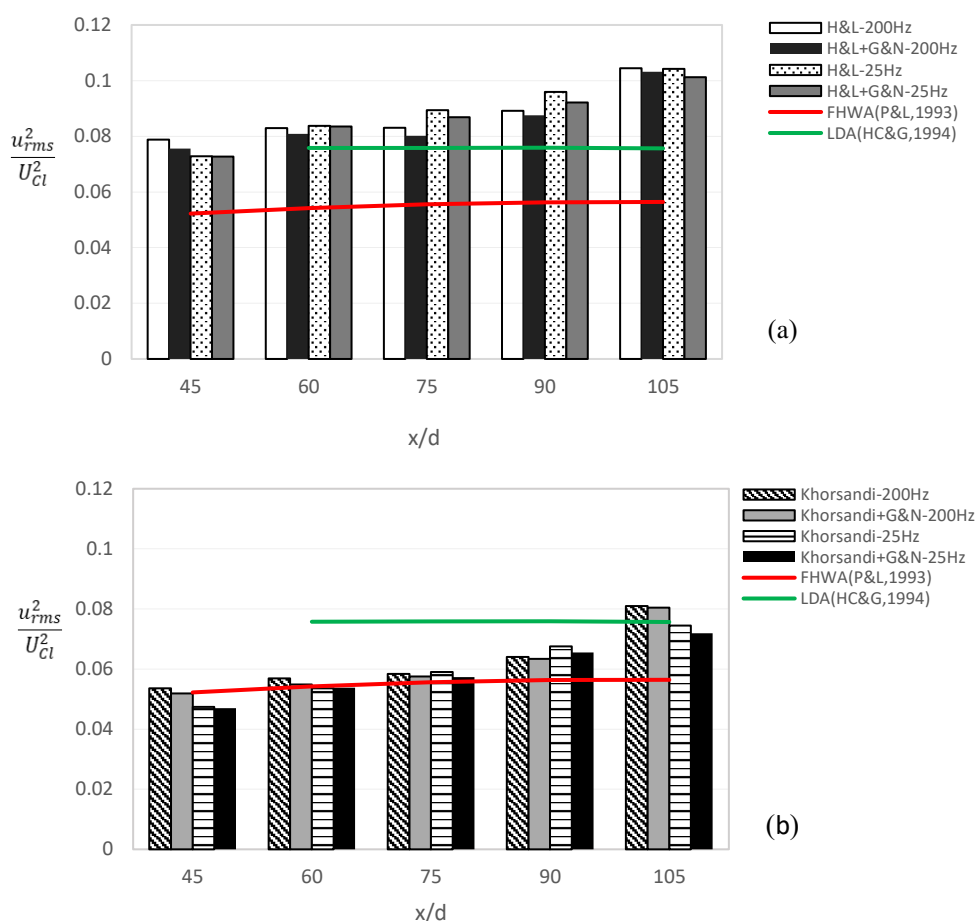
شکل ۸ تأثیر اعمال فیلترهای مختلف حذف نویز و اسپایک بر انرژی جنبشی آشفتگی در راستای محور جت اندازه‌گیری شده با بسامدهای نمونه‌برداری a. ۲۰۰ Hz و b. ۲۵ Hz

هرتز) تأثیر بیشتری نسبت به داده‌های اندازه‌گیری شده با بسامد کمینه (۲۵ هرتز) دارد که می‌توان دلیل این موضوع را وجود اسپایک و نویز بیشتر در ناحیه‌ای با شدت آشفتگی بیشتر دانست. با ارزیابی شکل (۹) مشاهده می‌شود که استفاده ترکیبی از فیلترهای حذف تأثیر نویز و اسپایک باعث بهبود نسبی نتایج شده است. تغییر اندک در اثر استفاده از فیلترهای ترکیبی حذف نویز و اسپایک در مقایسه با یک فیلتر حذف نویز به دلیل کیفیت بالای داده‌های اندازه‌گیری شده می‌باشد. با این وجود توصیه می‌شود در پژوهش‌هایی که داده‌های اندازه‌گیری شده دارای کیفیت کمتری می‌باشند، به‌عنوان نمونه اندازه‌گیری نزدیک دیواره یا اندازه‌گیری میدانی، از ترکیب فیلترها برای رسیدن به نتایج با دقت بالاتر استفاده کرد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق میزان تأثیر روش‌های مختلف پس‌پردازش حذف

شکل (۹) تغییر واریانس سرعت محوری بی‌بعد شده با سرعت میانگین محوری را تحت تأثیر استفاده ترکیبی از فیلتر حذف نویز و اسپایک را به نمایش گذاشته است. شکل (۹-الف و ب) به ترتیب نشان‌دهنده تأثیر ترکیب ۱. فیلتر گورینگ و نیکورا (Goring and Nikora, 2002) با هرتز و لمین (Hurth and Lemmin, 2001) H&L+G&N و ۲. فیلتر گورینگ و نیکورا (Goring and Nikora, 2002) و خورسندی و همکاران (Khorsandi et al. 2012) (Khorsandi+G&N) برای بسامدهای اندازه‌گیری ۲۵ و ۲۰۰ هرتز در محاسبه میزان شدت آشفتگی را به نمایش می‌گذارد. به‌منظور ارزیابی میزان دقت فیلترهای پس‌پردازش حذف نویز و اسپایک، نتایج با داده‌های اندازه‌گیری شده پژوهش‌های معتبر پیشین مقایسه شده است. ارزیابی دقیق‌تر شکل (۹) نشان می‌دهد در فاصله‌های نزدیک‌تر به خروجی نازل استفاده ترکیبی از فیلترهای حذف نویز و اسپایک در داده‌های اندازه‌گیری شده با بسامد بیشینه (۲۰۰



**Fig. 9** Turbulence intensity changes due to filter combinations, a. Hurther and Lemmin filter, and b. Khorsandi et al. filter  
**شکل ۹** تغییر شدت آشفتگی تحت تأثیر استفاده ترکیبی از فیلترها- a. فیلتر هرتر و لمین، b. فیلتر خورسندی و همکاران

در بسامدهای اندازه‌گیری مختلف به علت نویز می‌باشد. همچنین تأثیر فیلتر هرتر و لمین (Hurther and Lemmin, 2001) بر روی داده‌های اندازه‌گیری شده با بسامد ۲۰۰Hz بیشتر است که این هم به علت نویز بیشتر داده‌های اندازه‌گیری شده با بسامد نمونه‌برداری بالاتر می‌باشد. در فاصله‌های نزدیک‌تر به خروجی نازل (در ناحیه خودتشابهی با میزان واریانس بالا) استفاده ترکیبی از فیلترهای حذف نویز و اسپایک باعث تأثیرگذاری بیشتر در داده‌های اندازه‌گیری شده با بسامد بالاتر شده است که این به علت وجود اسپایک و نویز بیشتر در ناحیه‌ای با شدت آشفتگی بیشتر است. توصیه می‌شود در پژوهش‌هایی مانند اندازه‌گیری‌های میدانی یا نزدیک مرزهای جریان، که داده‌های اندازه‌گیری شده کیفیت کمتری دارند، از ترکیب فیلترها حذف نویز و اسپایک برای رسیدن به داده‌های با دقت بالاتر استفاده کرد.

اسپایک و نویز بر داده‌های اندازه‌گیری شده سرعت‌سنج صوتی داپلر در دو بسامد اندازه‌گیری ۲۵ و ۲۰۰ هرتز در یک جت آشفته با عدد رینولدز ۱۰۰۰۰ بررسی و ارزیابی شده است. سه فیلتر گورینگ و نیکورا (Goring and Nikora, 2002)، هرتر و لمین (Hurther and Lemmin, 2001)، خورسندی و همکاران (Khorsandi et al., 2012) و همچنین ترکیب آن‌ها برای پس‌پردازش داده‌های سرعت اندازه‌گیری شده جریان استفاده شده‌اند. مقایسه نتایج اندازه‌گیری شده با بسامدهای مختلف نشان داد که تغییر بسامد نمونه‌برداری تأثیر زیادی بر میزان میانگین سرعت اندازه‌گیری شده نداشته ولی افزایش بسامد باعث افزایش نویز و در نتیجه افزایش واریانس سرعت می‌گردد. اعمال فیلتر حذف نویز خورسندی و همکاران (Khorsandi et al., 2012) بر نتایج نشان داد که اندازه‌گیری‌های واریانس سرعت در بسامدهای نمونه‌برداری مختلف با یکدیگر سازگاری پیدا می‌کنند که این نکته تاییدکننده این است که تفاوت واریانس

Garbini, J.L., Forster, F.K. and Jorgensen, J. (1982). Measurement of fluid turbulence based on pulsed ultrasound techniques. Part 1. Analysis. *Journal of Fluid Mechanics*, 118, 445–470.

Goring, D.G. and Nikora, V.I. (2002). Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data, (January), 117–126.

Hejazi, K., Falconer, R.A. and Seifi, E. (2016). Denoising and despiking ADV velocity and salinity concentration data in turbulent stratified flows. *Flow Measurement and Instrumentation*, 52(August), 83–91.

Hurth, D. and Lemmin, U. (2001). A Correction Method for Turbulence Measurements with a 3D Acoustic Doppler Velocity Profiler. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, (18), 446–458.

Hurth, D. and Lemmin, U. (2008). Improved Turbulence Profiling with Field-Adapted Acoustic Doppler Velocimeters Using a Bifrequency Doppler Noise Suppression Method. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 25, 452–464.

Hussein, J., Cap, S.P. and George, W.K. (1994). Velocity measurements in a high-Reynolds-number, momentum-conserving, axisymmetric, turbulent jet. *Journal of Fluid Mechanics*, 258, 31–75.

Khorsandi, B., Mydlarski, L. and Gaskin, S. (2012). Noise in Turbulence Measurements Using Acoustic Doppler Velocimetry. *J. Hydraul. Eng.*, 138 (October), 829–838.

Khosronejad, A., Hansen, A.T., Kozarek, J.L., Guentzel, K., Hondzo, M., Guala, M., ... and Sotiropoulos, F. (2016). Large eddy simulation of turbulence and solute transport in a forested headwater stream. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 121(1), 146–167.

Lane, S., Biron, P., Bradbrook, K., Butler, J., Chandler, J., Crowell, M., ... and Roy, A. (1998). Three-dimensional measurement of river Channel flow process using acoustic Doppler velocimetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23, 1247–1267.

Lohmann A, Cabrera R, Kraus, N.C. (1994). Acoustic-Doppler velocimeter (ADV) for laboratory use. *Fundamentals and Advancements in Hydraulic Measurements and Experimentation*, ASCE, 351–365.

Moeini, M., Khorsandi, B. and Mydlarski, L. (2020). Effect of Acoustic Doppler Velocimetry Sampling

## ۵- فهرست نشانه‌ها

$B$	نرخ استهلاک سرعت جت
$d$	قطر نازل (cm)
$r$	فاصله شعاعی از جت (cm)
$r_{\frac{1}{2}}$	نیم‌عرض جت (cm)
$S$	نرخ پخش جریان جت
$U$	سرعت میانگین در راستای محور x (m/s)
$u$	سرعت نوسانی در راستای محور x (m/s)
$U_{Cl}$	سرعت میانگین محور جت (m/s)
$U_j$	سرعت جریان خروجی از نازل (m/s)
$v$	سرعت نوسانی در راستای محور r (m/s)
$w_2$ و $w_1$	سرعت نوسانی در راستای محور z (m/s)
	سرعت نوسانی حقیقی در راستای
$w_{T2}$ و $w_{T1}$	محور z (m/s)
$x$	فاصله از نازل جت در جهت جریان
$x_0$	موقعیت مبدأ مجازی جت (cm)
$\sigma_x$	نویز در راستای محور x
$\sigma_v$	نویز در راستای محور r
$\sigma_w$	نویز در راستای محور z
$Re$	عدد رینولدز جریان
$\rho$	چگالی سیال ( $kg/m^3$ )
$\mu$	گرانروی پویایی سیال ( $kg/m.s$ )

## ۶- منبع‌ها

Cea, L., Puertas, J. and Pena, L. (2007). Velocity measurements on highly turbulent free surface flow using ADV. *Experiments in Fluids*, 42(3), 333–348.

Darisse, A., Lemay, J. and Benaïssa, A. (2015). Budgets of turbulent kinetic energy, Reynolds stresses, variance of temperature fluctuations and turbulent heat fluxes in a round jet. *J. Fluid. Mech.*, 774, 95–142.

Doroudian, B., Bagherimiyab, F. and Lemmin, U. (2010). Improving the accuracy of four-receiver acoustic Doppler velocimeter (ADV) measurements in turbulent boundary layer. *Limnology and Oceanography: Methods*, 8(11), 575–591.

Garbini, J. (1982). Measurement of fluid turbulence based on pulsed ultrasound techniques. Part 1. Analysis. *J. Fluid Mech.*, 118, 445–470.

Frequency on Statistical Measurements of Turbulent Axisymmetric Jets. *J. Fluids Eng*, 146(7), 1–17.

Nikora, B.V.I. and Goring, D.G. (1998). ADV measurements of turbulence: Can we improve their interpretation? *J. Hydraul. Eng*, 124, 630–634.

Panchapakesan, N. and Lumley, J.L. (1993). Turbulence measurements in axisymmetric jets of air and helium. Part 1. Air jet. *Journal of Fluid Mechanics*, 246, 197–223.

Parsheh, M., Sotiropoulos, F. and Porté-agel, F. (2010). Estimation of Power Spectra of Acoustic-Doppler Velocimetry Data Contaminated with Intermittent Spikes. *J. Hydraul. Eng*, 136, 368–378.

Pope, S.B. (2000). *Turbulent Flows*. Cambridge University Press.

Safarzadeh, A., Salehi Neyshabouri, S.A.A. and Zarrati, A. R. (2016). Experimental investigation on 3D turbulent flow around straight and T-shaped groynes in a flat bed channel. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(8), p. 04016021.

Voulgaris, G. and Trowbridge, J. (1998). Evaluation of the Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) for Turbulence Measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 15, 272–289.

Wahl, T. (2003). Discussion of “Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data” by Derek G. Goring and Vladimir I. Nikora. *J. Hydraul. Eng*, 128(1), 484–487.