



Research Paper

Effect of Duration and Frequency of Acoustic Doppler Velocimetry Measurement on Calculation of Turbulent Flow Characteristics

Mohammad Reza Maddahi¹ and Majid Rahimpour^{2*}

¹PhD Scholar, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

²Assoc. Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

Article information

Received: August 12, 2021

Revised: August 31, 2021

Accepted: September 01, 2021

Keywords:

Reynolds Shear Stress
Shear Velocity
Turbulence Intensity
Velocity Profile

*Corresponding author:

rahimpour@uk.ac.ir



Abstract

Acoustic Doppler velocimetry (ADV) is one of the most suitable devices for measuring flow characteristics. Determination of measurement frequency and duration, in a way that the results are calculated with the lowest error, is very important. The goal of this study was to determine the optimum measurement frequency and duration to save money and time. 3D instantaneous subcritical flow characteristics are measured at 200, 100, 25, and 5Hz frequencies for a duration of 3 minutes, in a laboratory flume with an aspect ratio of less than 5. Then, 3D averaged velocities, shear velocity, turbulence intensity, and Reynolds shear stress are calculated. Results show that the reduction of error is independent of the number of measured data and its dependence is on the data collection duration and frequency. For measurements of 3D averaged velocity components, the appropriate measurement frequency and duration are 1Hz and 50 seconds, respectively. To determine the shear velocity, using logarithmic law, reducing the frequency and duration, results in a maximum error of 13%. For calculation of turbulent flow characteristics, like turbulence intensity and Reynolds shear stress, the measurement frequency, and duration of up to 25Hz and 50-70sec, respectively, results in an error of less than 10%.

© Authors, Published by **Environment and Water Engineering** journal. This is an open-access article distributed under the CC BY (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Introduction

Measurements of flow characteristics play a vital role in understanding the effects of different parameters on the flow and the validation of numerical models. One of the most important devices for this purpose is ADV. ADVs are capable to measure instantaneous 3D flow velocity fluctuations and the price of this device is less than other devices. ADVs are point measurement devices and based on sampling

frequency and duration, the number of measured samples changes. There is no systematic study up to date, to investigate the effect of measurement duration and sampling frequency on measurement values of mean flow velocities and turbulence characteristics. Therefore, the goal of this study was to investigate the effect of different sampling frequencies and measurement duration on the accuracy of measured hydraulic parameters.



Materials and Methods

Measurements were conducted in a straight and rectangular symmetrical channel, horizontal bed slope and flat bed. The Froude and Reynolds numbers during the test are 0.11 and 69400, respectively, which indicate subcritical hydraulic conditions and turbulent flow. The width-to-depth ratio of the flow was equal to 2.3, which indicates the presence of secondary flows. The in-depth profiles were measured in three directions and at 28 depths. The ADV used in this study was a Vectrino type manufactured by Nortek. The minimum and maximum sampling frequency was 1 and 200 Hz, respectively. The sampling frequency, duration of measurements, and the number of instantaneous data collected in this study are presented in Table 1.

Table 1 Frequency, duration, and the number of measured data

Frequency (Hz)	Duration (min)	Measured data
200	3.0	36000
200	2.0	24000
200	1.0	12000
200	0.5	6000
100	3.0	18000
100	2.0	12000
100	1.0	6000
100	0.5	3000
25	3.0	4500
25	2.0	3000
25	1.0	1500
25	0.5	750
5	3.0	900
5	2.0	600
5	1.0	300
5	0.5	150
1	3.0	180
1	2.0	120
1	1.0	60
1	0.5	30

Results

Results show that for a sampling duration of 3 minutes, reducing the sampling frequency to 100, 25, and 5 Hz causes an error of less than 1% in the average longitudinal velocities for all depths. This error is around 2% for a sampling frequency of 1 Hz at some depths. Reducing the measurement duration to 2 minutes for all sampling frequencies causes an error of less than 2%. By reducing the measurement duration to 1 minute, the error is $\pm 4\%$. For a measurement duration of 30 s, sampling frequencies of 200, 100, 25, and 5 Hz result in an error of less than 4%, and at a sampling frequency of 1 Hz, the error increases to 6%. The results show that for

measurements of longitudinal velocities, the data collected in 30 seconds and with a sampling frequency of 1 Hz is acceptable and has a maximum error of 6%, especially in the depths near the bed.

For transverse velocity, the sampling frequencies of 200, 100, and 25 Hz and the duration of measurements of 3- and 2-min result in a small error, while the further reduction of sampling frequencies and duration causes a very large error.

For vertical velocities, in a measurement duration of 3 minutes, reducing the sampling frequency to 100 Hz does not change the vertical velocity values. The sampling frequency of 25 Hz results in a maximum of 5% error in some depths near the bed. The error increases to 10 and 30% for sampling frequencies of 5 and 1 Hz, respectively. Reducing the data acquisition time to two minutes for 200 and 100 Hz frequencies causes an error of 15%. Further reduction of the sampling frequency to 1 Hz increases the error to 40%. Reducing the acquisition time to 1 minute, even for a frequency of 200 Hz, results in an error of 25% occurring near the surface. The error at sampling frequencies of 100 and 25 Hz is equal to 30 and 40% and frequencies of 5 and 1 Hz are more than 50%. Further reduction of the data acquisition time to 30 seconds will cause a large error and it will reach from 30% for 200 Hz frequency to more than 50% for lower frequencies.

In general, the dimensionless velocity profiles in three directions follow the pattern of secondary flows. The longitudinal velocity distribution is logarithmic and the maximum velocity is below the water surface and at 0.7 water depth, the transverse velocity fluctuates around zero and the vertical velocity also has downward velocity values.

For the calculation of shear velocities using the logarithmic law method, reducing the sampling frequency and duration of data collection causes a maximum error of 6 and 13%, respectively. Results showed that the error reduction is independent of the number of collected data and its dependence is first on the duration of data collection and then on the sampling frequency. With 2 minutes of measurement at sampling frequencies of 200, 100, 25, and 5 Hz, the percentage of error in determining the shear velocity using the logarithmic law method reaches less than 2%.

For the calculation of turbulent intensities, reducing the sampling frequency and measurement duration have no effect on its distribution. However, For the three frequencies of 200, 100, and 25 Hz, the error tends to zero as the data collection time increases, but the data collected at 5 and 1 Hz have an error, even with 3 min of data collection. This error is 7 and 20% in the longitudinal direction, 2 and 15% in the transverse direction, and 6 and 9% in the vertical direction for frequencies of 5 and 1 Hz, respectively. Therefore, a measurement frequency of up to 25 Hz is required to measure the turbulent intensities.

Conclusions

One of the goals of this study is to investigate the effect of reducing the sampling frequency and duration of ADV on the measured values of flow characteristics. In this way, the minimum sampling frequency and duration of acceptable data collection has been determined, and due to this, it saves the costs of hydraulic laboratories, for preparing ADV and reducing the duration of experiments. The results of this research are as follows.

To measure the average 3D flow velocities, devices with a sampling frequency of 1 Hz are

also suitable and the duration of data collection is at least 50 s.

To determine the shear velocity using logarithmic law, reducing the data collection frequency and duration causes an error of 13%.

To measure and calculate turbulent flow components such as turbulence intensity and Reynolds shear stress, a measurement frequency of up to 25 Hz is required. The minimum measurement duration for an error of less than 10% is between 50 and 70 s.

Error reduction for all parameters is independent of the number of collected data and its dependence is first on the duration of data collection and then on the frequency of data collection.

Data Availability

The data can be sent by email by the corresponding author upon reasonable request.

Conflicts of Interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.



ISSN: 2476-3683

محیط زیست و مهندسی آب

Homepage: www.jewe.ir

مقاله پژوهشی

تأثیر مدت زمان و فرکانس اندازه گیری سرعت سنج صوتی بر محاسبه مشخصات جریان آشفته

محمدرضا مداحی^۱ و مجید رحیم پور^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
^۲ دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخ دریافت: [۱۴۰۰/۰۵/۲۱]

تاریخ بازنگری: [۱۴۰۰/۰۷/۰۸]

تاریخ پذیرش: [۱۴۰۰/۰۷/۱۰]

واژه های کلیدی:

نیمرخ سرعت

سرعت برشی

شدت آشفته گی

تنش برشی رینولدز

*نویسنده مسئول:

rahimpour@uk.ac.ir

دستگاه سرعت سنج صوتی یکی از مناسب ترین دستگاه ها برای اندازه گیری مشخصات جریان است. تعیین مدت زمان و فرکانس مناسب برداشت داده به نحوی که پارامترهای مختلف با کم ترین درصد خطا محاسبه شوند، اهمیت بالایی دارد. هدف این پژوهش تعیین حداقل فرکانس و مدت زمان داده برداری برای تعیین پارامترهای هیدرولیکی بود تا موجب صرفه جویی در هزینه تهیه دستگاه ها و مدت زمان انجام آزمایش شود. بدین منظور، مشخصات سه بعدی و لحظه ای جریان زیر بحرانی، با فرکانس های ۲۰۰، ۱۰۰، ۲۵، ۵ و ۱ Hz و مدت زمان ۳ min در کانالی با نسبت عرض به عمق جریان کوچکتر از ۵ اندازه گیری و مقادیر متوسط سرعت های طولی، عرضی، عمودی، تنش برشی، شدت آشفته گی و تنش برشی رینولدز محاسبه شد. نتایج نشان داد کاهش درصد خطا مستقل از تعداد داده های برداشت شده است و وابستگی آن به مدت زمان و فرکانس برداشت داده، است. برای اندازه گیری مقادیر متوسط سرعت، دستگاه های با فرکانس ۱ Hz و مدت زمان داده برداری حداقل ۵۰ s مناسب است. برای تعیین سرعت برشی به روش قانون لگاریتمی، کاهش فرکانس و مدت زمان داده برداری باعث ایجاد خطای حداکثر ۱۳٪ می شود. برای اندازه گیری مؤلفه های آشفته جریان مانند شدت آشفته گی و تنش برشی رینولدز، فرکانس اندازه گیری تا ۲۵ Hz مناسب است و حداقل مدت زمان داده برداری برای درصد خطای کمتر از ۱۰٪ بین ۵۰ تا ۷۰ s است.

۱- مقدمه

برای بررسی عمیق تر پارامترهای مؤثر بر جریان و همچنین واسنجی مدل های عددی، اندازه گیری دقیق مشخصات هیدرولیکی جریان ضروری است. یکی از ابزارهای بسیار مفید در تعیین مشخصات جریان، سرعت سنج داپلر صوتی (ADV)^۱ است. ADV سرعت لحظه ای جریان در دو یا سه جهت را در زمان های مختلف به صورت پیوسته اندازه گیری می کند. این اندازه گیری ها در مطالعات خصوصیات جریان های آشفته، اندازه گیری های لایه مرزی،

برای بررسی عمیق تر پارامترهای مؤثر بر جریان و همچنین واسنجی مدل های عددی، اندازه گیری دقیق مشخصات هیدرولیکی جریان ضروری است. یکی از ابزارهای بسیار مفید در تعیین مشخصات جریان، سرعت سنج داپلر صوتی

^۱Acoustic Doppler Velocimeter

می‌شود. (Afzalimehr et al. (2012) در مطالعه خود برای اندازه‌گیری مشخصات جریان در جریان‌های تند و کند شونده باوجود پوشش گیاهی، از ADV با فرکانس اندازه‌گیری ۲۰۰ Hz استفاده کردند. برای کاهش مدت‌زمان اندازه‌گیری، با پردازش داده‌های برداشت‌شده به مدت ۲۰ min از یک عمق جریان، به این نتیجه دست یافتند که مقادیر متوسط سرعت جریان در مدت‌زمان ۲ min از لحاظ آماری مستقل از زمان می‌شود. در این مطالعه پارامترهای آماری ذکر نشده است. علاوه بر این، تأثیر مدت‌زمان بر مشخصات آشفته جریان نیز بررسی نشده است. (Kabiri et al. (2017) به مقایسه نیم‌رخ سرعت در جهت طولی جریان، برداشت‌شده در دو زمان ۵ min و ۲ min، به این نتیجه رسیدند که مقادیر سرعت متوسط دارای اختلاف بسیار اندکی با یکدیگر می‌باشند، از این‌رو، مدت‌زمان ۲ min را برای فرکانس اندازه‌گیری ۲۰۰ Hz پیشنهاد دادند. (Afzalimehr et al. (2020) نیز برای اندازه‌گیری مشخصات جریان در رودخانه با استفاده از ADV، از فرکانس اندازه‌گیری ۲۰۰ Hz و مدت‌زمان ۲ min استفاده کردند.

مطالعات مربوط به بررسی تأثیر فرکانس و مدت‌زمان اندازه‌گیری بر تمامی مشخصات جریان محدود است. از جمله این مطالعات می‌توان به (Stone and Hotchkiss (2007) اشاره کرد که با دستگاهی با فرکانس اندازه‌گیری ۵۰ Hz در رودخانه‌ای درشت‌دانه، به این نتیجه رسیدند که حداقل ۱۰۰ داده‌برداری موجب ثبت مقادیر صحیح متوسط سرعت در جهت اصلی جریان می‌شود. در این مطالعه، مقادیر متوسط سرعت در جهات عرضی و عمقی و همچنین مشخصات آشفته جریان مانند توزیع تنش برشی رینولدز و شدت آشفته‌گی موردبررسی قرار نگرفت. (Kachouyinejad et al. (2013) نیز در مطالعه خود دریافتند که تغییر فرکانس داده‌برداری تأثیری بر میزان داده پرت اندازه‌گیری شده نداشته، اما تغییر فرکانس و زمان داده‌برداری تأثیر زیادی بر مقادیر متوسط سرعت طولی در اعماق نزدیک بستر داشت. در این مطالعه اطلاعاتی از مقدار بهینه فرکانس و مدت‌زمان داده‌برداری، همچنین تأثیر این دو پارامتر بر مؤلفه‌های آشفته جریان ارائه نداد. (Moieni et al. (2020) در جریان‌های جت به بررسی تأثیر فرکانس داده‌برداری بر مقادیر آماری پرداخته و مدت‌زمان داده‌برداری را موردبررسی قرار ندادند. (Homayounfar and Khorsandi (2021) نیز

اندازه‌گیری‌های مشخصات جریان در نزدیکی بستر و مطالعات رسوبی کاربرد فراوانی دارد. ADV مزایای فراوانی نسبت به سایر دستگاه‌های اندازه‌گیری مشخصات جریان دارد (Khorsandi 2016). برداشت مشخصات سه‌بعدی جریان به‌صورت لحظه‌ای موجب برتری این دستگاه نسبت به مولینه شده و قیمت پایین آن موجب برتری نسبت به دستگاه‌های مشابه مانند سرعت‌سنج لیزری^۱، LDV و سرعت‌سنج ذرات توسط عکس^۲، PIV، شده است. ADV نخستین بار در سال ۱۹۹۴ ارائه شد (Kraus et al. 1994). پس از آن، در بسیاری از آزمایشگاه‌های هیدرولیک و مهندسی رودخانه در مطالعات زیادی از آن استفاده شد. علاوه بر این، در سال‌های اخیر ADV در رودخانه‌های ایران نیز مورد استفاده قرار گرفته است و مشخصات آشفته جریان بر روی شکل‌های بستر رودخانه‌ها، مشخصات جریان اطراف تخته‌سنگ غیرمستغرق و تأثیر پوشش گیاهی بر روی شکل‌های بستر رودخانه‌ها موردبررسی قرار گرفته است (Fazel et al. 2018; Afzalimehr et al. 2019b; Afzalimehr et al. 2019a). منابع ذکر شده اولین مطالعاتی است که از ADV مقیاس آزمایشگاهی در رودخانه‌های بزرگ ایران استفاده شده است.

دستگاه سرعت‌سنج ADV به‌صورت نقطه‌ای عمل کرده و سرعت لحظه‌ای جریان را در کسری از ثانیه، متناسب با فرکانس^۳ اندازه‌گیری، ثبت می‌کند. بنابراین با افزایش مدت‌زمان^۴ اندازه‌گیری در هر عمق، تعداد داده لحظه‌ای اندازه‌گیری شده نیز افزایش می‌یابد. در مطالعات مختلف، از ADV با فرکانس و مدت‌زمان اندازه‌گیری متفاوت استفاده شده است. از آن جمله می‌توان به مطالعه Song and Chiew (2001) اشاره کرد. آنها برای اندازه‌گیری مشخصات آشفته جریان در یک کانال آزمایشگاهی، از ADV با فرکانس اندازه‌گیری ۵۰ Hz و مدت‌زمان برداشت داده ۲ min استفاده کردند. (Dey et al. (2011) نیز برای اندازه‌گیری مشخصات آشفته جریان در نزدیکی بستر با رسوبات غیر چسبنده، از ADV با فرکانس اندازه‌گیری ۱۰۰ Hz و در مدت‌زمان ۵ min استفاده کردند. بدیهی است که این مدت‌زمان اندازه‌گیری برای هر عمق جریان در هر نی‌مرخ سرعت موجب افزایش بسیار زیاد زمان و هزینه داده‌برداری

²Laser Doppler Velocimeter

³Particle Image Velocimeter

⁴Frequency

⁵Duration

Nortek است. این دستگاه شامل چهار سنجنده رو به پایین و اطراف است و مقادیر سرعت در سه راستای طولی، عرضی و عمودی را با دقت 1 mm/s اندازه‌گیری می‌کند. حداقل و حداکثر فرکانس برداشت داده در این دستگاه به ترتیب ۱ و 200 Hz است. فرکانس، مدت‌زمان اندازه‌گیری و تعداد داده لحظه‌ای برداشت‌شده در این پژوهش در جدول (۱) نشان داده شده است. فرکانس 200 Hz به معنای برداشت 200 داده لحظه‌ای سرعت در مدت 1 s است. بنابراین در هر دقیقه 12000 داده با فرکانس 200 Hz اندازه‌گیری می‌شود. شکل (۱) نیز نمایی از ADV داخل جریان حین اندازه‌گیری، نمای داخلی و بستر به همراه نمای جانبی کانال آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.



شکل ۱- کانال آزمایشگاهی و موقعیت سرعت‌سنج ADV داخل جریان در حال اندازه‌گیری

Fig. 1 Laboratory flume and ADV inside water during measurements

داده‌های برداشت‌شده با SNR^2 و ضریب همبستگی (COR)^۳ کم‌تر از 15 dB و 70% حذف می‌شود (Guo and Julien 2001). تمامی اندازه‌گیری‌ها در مرکز کانال انجام شده است. مقادیر اندازه‌گیری شده در این پژوهش، سرعت لحظه‌ای جریان در سه راستای موازی جریان^۴، عمود بر جهت جریان در صفحه افقی^۵ و عمود بر راستای جریان در صفحه عمودی^۶ است. پس از برداشت سرعت لحظه‌ای،

به بررسی فیلترهای متفاوت و تأثیر آن‌ها بر داده‌های برداشت‌شده در فرکانس‌های مختلف پرداخته‌اند.

بنابراین، سابقه پژوهش‌های انجام‌شده تاکنون نشان می‌دهد، مطالعات کمی وجود دارد که تأثیر کاهش فرکانس و مدت‌زمان اندازه‌گیری را بر روی تمامی پارامترهای هیدرولیکی جریان، از جمله مشخصات آشفته جریان، به‌طور جامع مورد بررسی قرار دهد. علاوه بر این، دستگاه‌های سرعت‌سنج صوتی توسط شرکت‌های مختلف، با قابلیت‌ها و قیمت‌های متفاوت عرضه می‌شوند که یکی از مهم‌ترین پارامترها در تعیین قیمت این دستگاه‌ها، فرکانس اندازه‌گیری آن‌هاست. بنابراین بررسی تأثیر کاهش فرکانس اندازه‌گیری بر مقادیر مشخصات جریان می‌تواند موجب صرفه‌جویی بسیار در هزینه آزمایشگاه‌های هیدرولیک و مهندسی رودخانه شود. از سوی دیگر، از آنجاکه برداشت اطلاعات به‌وسیله ADV به‌صورت نقطه‌ای است، یافتن زمان بهینه اندازه‌گیری در هر فرکانس، موجب کاهش بسیار زیاد مدت‌زمان انجام آزمایش‌ها نیز می‌شود. بنابراین، هدف اصلی این پژوهش این است که تأثیر تغییر فرکانس و مدت‌زمان اندازه‌گیری بر مقادیر مشخصات آشفته جریان بررسی شود و به‌این‌ترتیب مدت‌زمان مناسب برای اندازه‌گیری در هر فرکانس ارائه گردد.

۲- مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در یک کانال مستقیم و مستطیلی متقارن، شیب بستر افقی و بستر صاف، با فرض جریان دائمی و یکنواخت انجام شده است. عدد فرود و رینولدز در زمان آزمایش به ترتیب $0/11$ و 69400 است که بیانگر شرایط هیدرولیکی زیربحرانی و جریان آشفته است (Nezu and Nakagawa 1993). عرض کانال و عمق جریان در زمان داده‌برداری به ترتیب برابر 80 و $34/7 \text{ cm}$ است. بنابراین، نسبت عرض به عمق جریان^۱ در زمان آزمایش برابر $2/3$ است که بیان‌گر وجود جریان‌های ثانویه است (Nezu and Nakagawa 1993). فاصله انجام آزمایش از ابتدای کانال به نحوی انتخاب شد که جریان به‌طور کامل توسعه‌یافته باشد. نیمرخ تغییرات عمقی سرعت در سه راستا و در 28 عمق اندازه‌گیری شد. تغییرات سرعت طولی جریان از بستر تا سطح آب حدود $0/189$ تا $0/262 \text{ m/s}$ است. ADV مورد استفاده در این پژوهش از نوع Vectrino ساخت شرکت

¹Aspect ratio

²Sound-Noise ratio

³Correlation

³Longitudinal velocity

⁴Transverse velocity

⁵Vertical velocity

به‌منظور بررسی مشخصات آشفته جریان، شدت آشفتگی^۱ در هر عمق از روابط (۷) تا (۹) و با محاسبه ریشه میانگین مربعات (RMS)^۲ نوسانات سرعت تعیین می‌شود.

$$RMS u' = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (u'_i)^2}{N}} \quad (۷)$$

$$RMS v' = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (v'_i)^2}{N}} \quad (۸)$$

$$RMS w' = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (w'_i)^2}{N}} \quad (۹)$$

برای تعیین سرعت برشی جریان از دو روش قانون لگاریتمی^۳ و روش مشخصات لایه‌مرزی (BLCM)^۴ استفاده شده است. قانون لگاریتمی به‌صورت رابطه (۱۰) است.

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{y}{K_s} \right) + B \quad (۱۰)$$

که U_* ، k ، y ، K_s و B به ترتیب سرعت برشی، ثابت ون کارمن برابر ۰/۴، عمق جریان که در آن سرعت U اندازه‌گیری شده است، ارتفاع زبری و ثابت انتگرال است. روش مشخصات لایه‌مرزی نیز مطابق رابطه (۱۱) ارائه شده است (Afzalimehr and Anctil 2000).

$$U_* = \frac{(\delta_* - \theta) U_{\max}}{c \delta_*} \quad (۱۱)$$

که θ_* ، δ_* ، U_{\max} و c به ترتیب ضخامت جابجایی لایه‌مرزی، ضخامت اندازه حرکت لایه‌مرزی، حداکثر سرعت اندازه‌گیری شده در یک نیم‌رخ و ضریب تجربی برابر ۴/۴ است (Afzalimehr and Anctil 2000). ضخامت جابجایی لایه‌مرزی و ضخامت اندازه حرکت لایه‌مرزی از روابط (۱۲) و (۱۳) تعیین می‌شود.

$$\delta_* = \int_0^h \left(1 - \frac{U}{U_{\max}} \right) dy \quad (۱۲)$$

مقادیر سرعت متوسط و نوسانات سرعت در هر جهت با استفاده از روابط (۱) تا (۶) محاسبه می‌شود (Nezu and Nakagawa 1993).

جدول ۱- فرکانس، مدت‌زمان و تعداد داده اندازه‌گیری شده

Table 1 Frequency, duration, and the number of measured data

Frequency (Hz)	Duration (min)	Measured data
200	3.0	36000
200	2.0	24000
200	1.0	12000
200	0.5	6000
100	3.0	18000
100	2.0	12000
100	1.0	6000
100	0.5	3000
25	3.0	4500
25	2.0	3000
25	1.0	1500
25	0.5	750
5	3.0	900
5	2.0	600
5	1.0	300
5	0.5	150
1	3.0	180
1	2.0	120
1	1.0	60
1	0.5	30

$$U = \frac{\sum_{i=1}^N u_i}{N} \quad (۱)$$

$$V = \frac{\sum_{i=1}^N v_i}{N} \quad (۲)$$

$$W = \frac{\sum_{i=1}^N w_i}{N} \quad (۳)$$

$$U' = u_i - U \quad (۴)$$

$$V' = v_i - V \quad (۵)$$

$$W' = w_i - W \quad (۶)$$

که U ، V ، W ، u_i ، v_i ، w_i ، U' ، V' ، W' و N به ترتیب متوسط سرعت طولی، متوسط سرعت عرضی، متوسط سرعت عمودی، سرعت طولی لحظه‌ای، سرعت عرضی لحظه‌ای، سرعت عمودی لحظه‌ای، نوسانات سرعت در راستای طولی، نوسانات سرعت در راستای عرضی، نوسانات سرعت در راستای عمودی و تعداد داده برداشت‌شده در هر عمق است.

¹Turbulence intensity

²Root mean square

³Log-law

⁴Boundary layer characteristics method



۱ و ۳ و ۵ min نشان می‌دهد. هم‌چنین درصد خطای ایجادشده با تغییر فرکانس و مدت‌زمان برداشت داده‌ها نیز در این شکل مشخص است. درصد خطا برای فرکانس‌های ۱۰۰ Hz و مدت‌زمان داده‌برداری ۲ min، به دلیل تأثیر کم آن‌ها بر مقادیر اندازه‌گیری شده، نشان داده نشده است. در این پژوهش فرض بر این است که مقادیر محاسبه‌شده در فرکانس و مدت‌زمان ۲۰۰ Hz و ۳ min، مقادیر صحیح هر پارامتر است و درصد خطای سایر فرکانس‌ها و مدت‌زمان اندازه‌گیری براساس مقادیر ثبت‌شده در فرکانس ۲۰۰ Hz و مدت‌زمان ۳ min محاسبه‌شده. درصد خطای پارامتر A از رابطه (۱۵) محاسبه شد که اندیس c نشان‌دهنده مقدار محاسبه‌شده و اندیس r معرف مقدار صحیح پارامتر موردنظر است.

$$ErrorA = 100 \times \frac{A_c - A_r}{A_r} \quad (15)$$

شکل (۲) نشان می‌دهد برای مدت‌زمان برداشت ۳ min کاهش فرکانس اندازه‌گیری به ۲۵، ۱۰۰ و ۵ Hz موجب ایجاد خطای کم‌تر از ۱٪ در مقادیر سرعت متوسط طولی برای همه اعماق می‌شود. این خطا برای فرکانس ۱ Hz در بعضی اعماق نزدیک ۲٪ می‌شود. کاهش مدت‌زمان داده‌برداری به ۲ min برای همه فرکانس‌ها موجب بروز خطای کم‌تر از ۲٪ می‌شود. با کاهش مدت‌زمان داده‌برداری به ۱ min، مقادیر خطا در محدوده ۴٪ \pm تغییر خواهد کرد. برای مدت‌زمان ۳۰ s، فرکانس‌های ۲۰۰، ۱۰۰ و ۵ Hz هرگز موجب بروز خطای کم‌تر از ۴٪ می‌شود و در فرکانس ۱ Hz این خطا به حدود ۶٪ افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد در مطالعاتی که هدف تعیین سرعت طولی جریان است، داده‌های برداشت‌شده در ۳۰ s و با فرکانس ۱ Hz نیز قابل قبول بوده و دارای حداکثر خطای ۶٪ مخصوصاً در اعماق نزدیک بستر است. (Kachouyinejad et al. (2013) نیز به این نتیجه دست یافتند که تغییر فرکانس و مدت‌زمان داده‌برداری تأثیر بیشتری بر مقادیر سرعت در نزدیکی بستر خواهد داشت. یکی از دلایل این امر را می‌توان وجود نویز بالاتر، تأثیر لایه مرزی و زبری در نزدیکی بستر دانست.

شکل (۳) نیمرخ‌های بی‌بعد سرعت در راستای y را برای فرکانس و مدت‌زمان اندازه‌گیری ۲۰۰ و ۱ هرتز و ۳ و ۵ min نشان می‌دهد. درصد خطا برای فرکانس‌های ۱۰۰

$$\theta = \int_0^h \frac{U}{U_{\max}} \left(1 - \frac{U}{U_{\max}} \right) dy \quad (13)$$

که، h عمق جریان است. یکی دیگر از پارامترهای بسیار مهم در مطالعات هیدرولیکی، نیمرخ توزیع تنش برشی رینولدز است. توزیع تنش برشی رینولدز علاوه بر تعیین سرعت برشی جریان، دارای کاربردهای بسیار فراوان در مطالعات رسوبی و تحلیل جریان‌های آشفته از طریق انجام آنالیزهای متفاوت، مانند آنالیز کوادرنانت^۱، است. تنش برشی رینولدز در هر عمق از رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود. در این پژوهش مقادیر تنش برشی رینولدز فقط در صفحه xz محاسبه و بررسی شده است.

$$\frac{-u'w'}{-u'w'} = \frac{\sum_{i=1}^N (u'_i w'_i)}{N} \quad (14)$$

۳- یافته‌ها و بحث

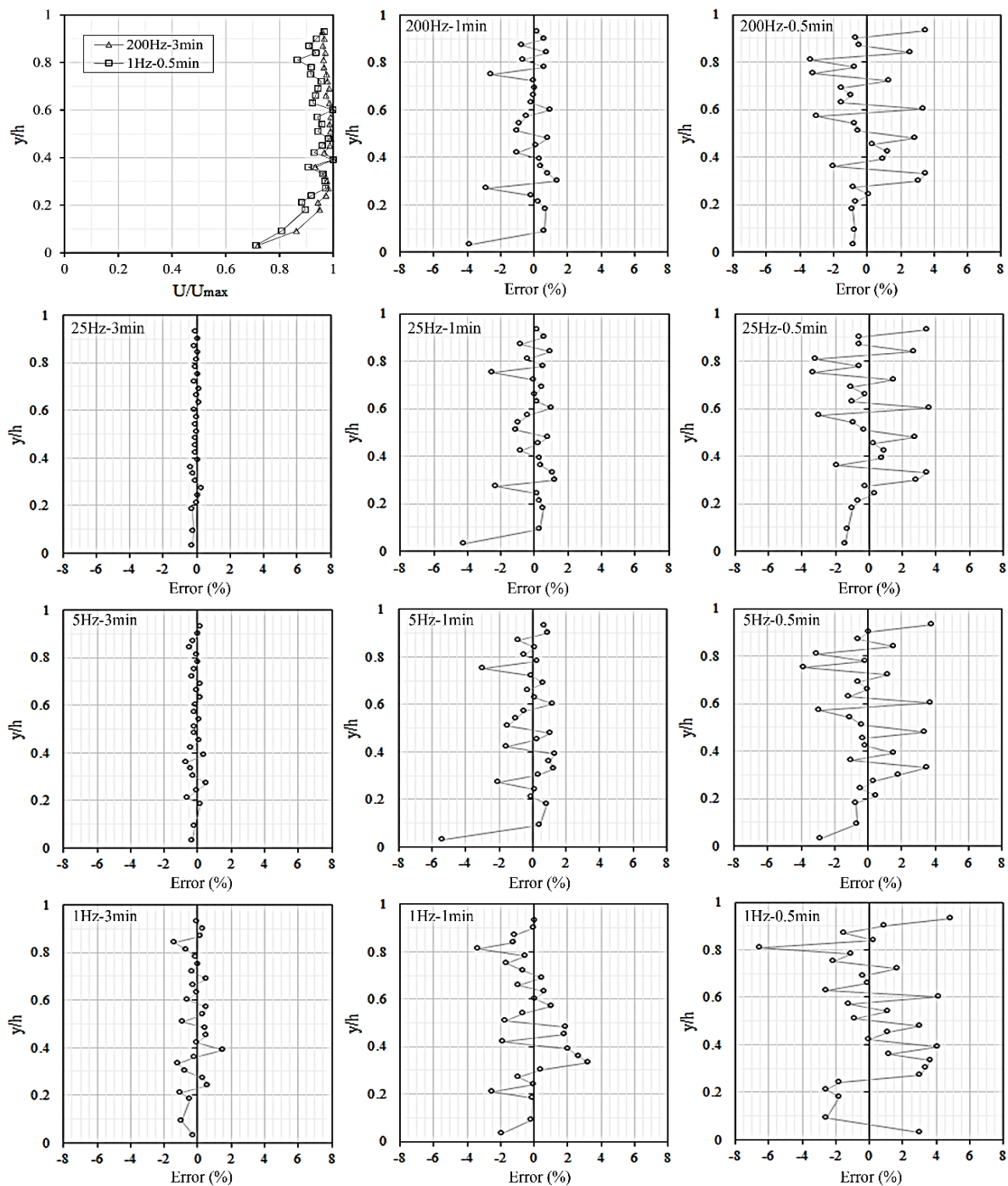
۳-۱- نیمرخ سرعت

با توجه به نسبت عرض به عمق و سه‌بعدی بودن جریان، گردابه‌هایی عمود بر جهت طولی جریان در راستای عرضی و عمودی تشکیل می‌شود. بنابراین جریان از سمت دیواره‌های عمودی کانال به سمت سطح آب رفته و سپس به مرکز کانال منتقل می‌شوند، پس از آن در مرکز کانال رو به پایین حرکت می‌کنند. بنابراین سرعت‌های اندازه‌گیری شده در مرکز کانال‌هایی با جریان ثانویه، دارای سرعت عمودی منفی است که نشان‌دهنده حرکت جریان از سطح آب به سمت بستر کانال است. هم‌چنین، نوسانات سرعت در راستای عرضی در مرکز کانال نیز صفر است. بنابراین برخلاف توزیع لگاریتمی نیمرخ سرعت در راستای طولی جریان، حداکثر سرعت زیر سطح آب و در عمق نسبی حدود ۰/۶ تا ۰/۸ از بستر رخ می‌دهد که به آن پدیده دیپ^۲ می‌گویند (Auel et al. 2014; Demiral et al. 2020). بنابراین انتظار می‌رود نیمرخ‌های سرعت اندازه‌گیری شده در این پژوهش نیز دارای توزیع متناسب با تئوری جریان‌های سه‌بعدی باشند. شکل (۲) نیمرخ‌های بی‌بعد سرعت در راستای x را برای فرکانس و مدت‌زمان اندازه‌گیری ۲۰۰ و ۳

¹ Quadrant analysis

² Dip phenomenon

و مدت‌زمان داده‌برداری ۲ min، به دلیل تأثیر کم آن‌ها بر مقادیر اندازه‌گیری شده، نشان داده نشده است.



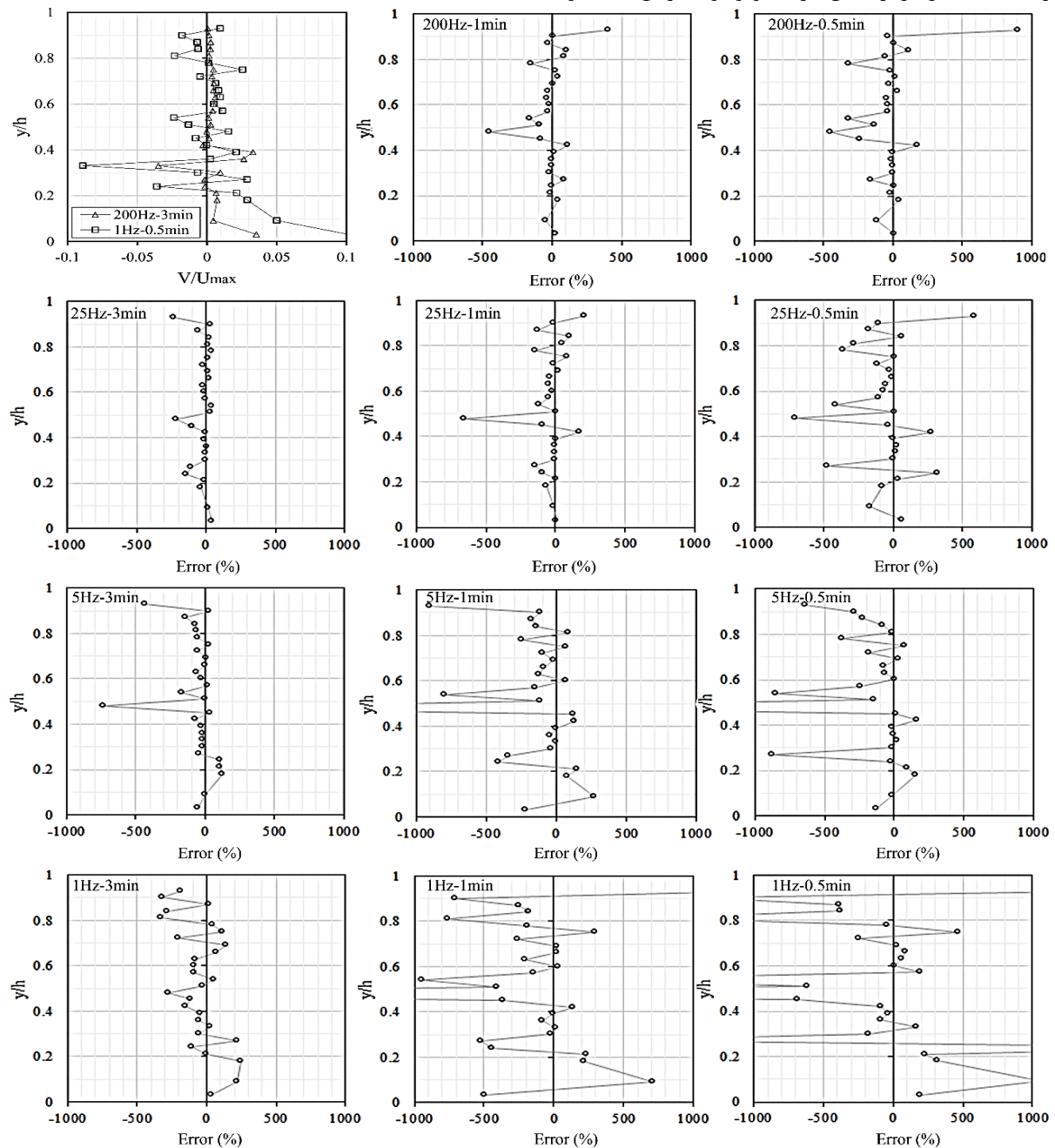
شکل ۲- درصد خطای اندازه‌گیری سرعت طولی در عمق‌های مختلف برای فرکانس‌های ۲۰۰، ۲۵، ۵ و ۱ Hz و مدت زمان برداشت ۳، ۱ و ۰/۵ min

Fig. 2 The error of longitudinal velocity measurements at different depth at sampling frequencies of 200, 25, 5 and 1 Hz and durations of 3, 1 and 0.5 minutes

برداشت نیم‌رخ در مرکز کانال است که سرعت متوسط عرضی در آن صفر است. بررسی سری زمانی داده‌های سرعت عرضی نشان می‌دهد علی‌رغم صفر بودن سرعت متوسط، نوسانات سرعت در این راستا بسیار زیاد است. بنابراین هرگونه کاهش داده برداشت‌شده، به دلیل کاهش فرکانس یا

درصد خطای سرعت عرضی جریان در شکل (۳) نشان می‌دهد تنها فرکانس‌های ۲۰۰، ۱۰۰ و ۲۵ Hz و مدت‌زمان داده‌برداری ۳ و ۲ min موجب بروز خطای کمی شده، درحالی‌که کاهش بیش‌تر این فرکانس‌ها و مدت‌زمان، موجب بروز خطای بسیار زیادی می‌شود. یکی از دلایل این امر،

مدت زمان برداشت، موجب بروز خطای بسیار زیادی در مقادیر متوسط سرعت عرضی خواهد شد. این نتایج از نیمرخ برداشت شده در مرکز کانال باریک و وجود جریان های ثانویه به دست آمده است، بنابراین انتظار می رود در نواحی دورتر از مرکز کانال، این درصد خطا کاهش یابد.



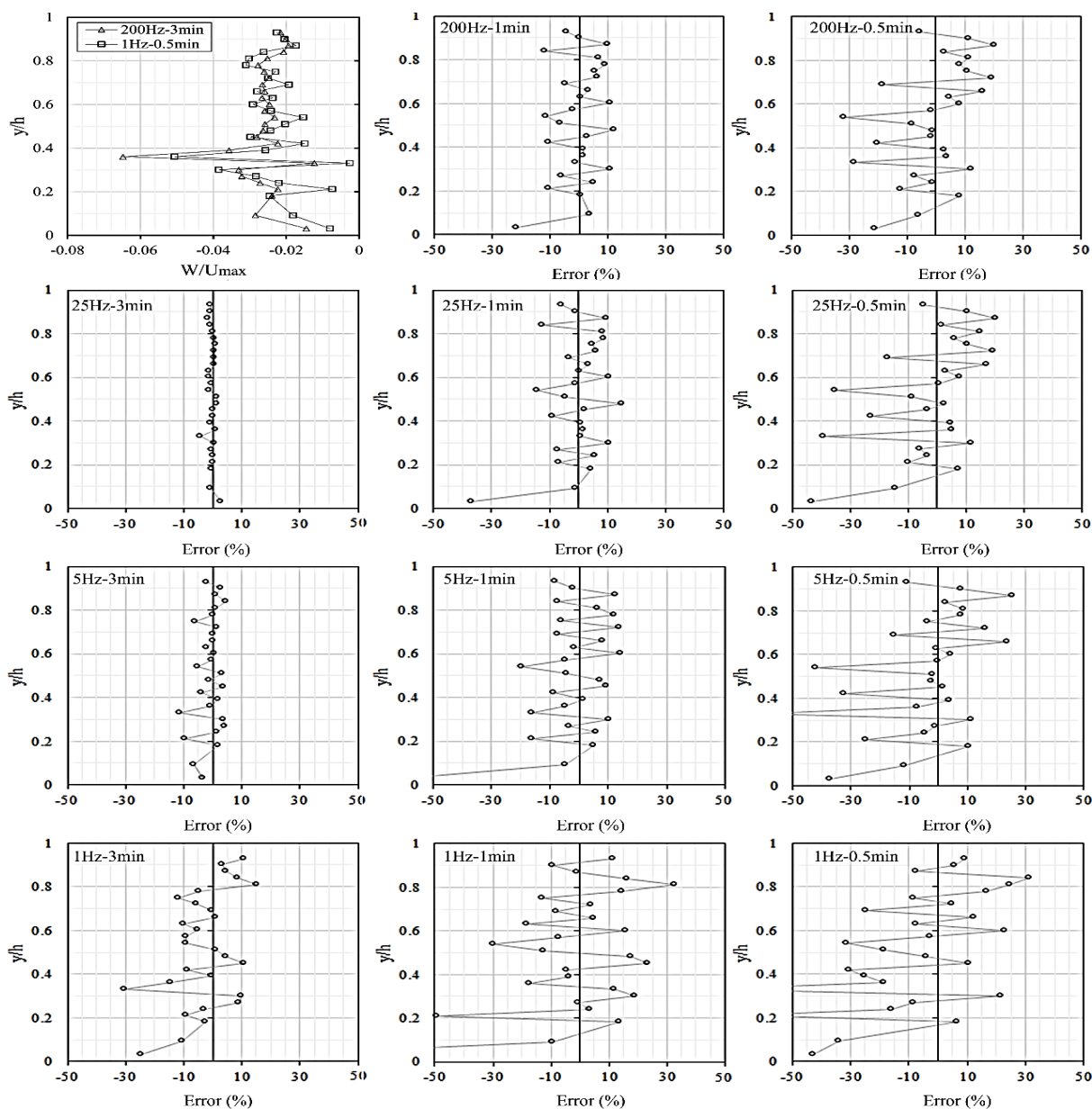
شکل ۳- درصد خطای اندازه گیری سرعت عرضی در عمق های مختلف برای فرکانس های ۲۰۰، ۲۵، ۵ و ۱ Hz و مدت زمان برداشت ۱، ۳ و ۵ min

Fig. 3 The error of transversal velocity measurements at different depth at sampling frequencies of 200, 25, 5 and 1 Hz and durations of 3, 1 and 0.5 minutes

شکل (۴) درصد خطای سرعت عمودی را نشان می دهد. برای مدت زمان ۳ min، کاهش فرکانس داده برداری به ۱ Hz تغییر می دهد. در مقادیر سرعت عمودی ایجاد نمی کند. فرکانس ۲۵ Hz نیز موجب بروز حداکثر ۵٪ خطا در برخی اعماق نزدیک بستر می شود. این درصد خطا برای فرکانس

شکل (۴) نیمرخ های بی بعد سرعت در راستای z را برای فرکانس و مدت زمان اندازه گیری ۲۰۰ و ۱ Hz و ۳ و ۱ min نشان می دهد. درصد خطا برای فرکانس های ۱۰۰ و ۲۰۰ Hz به دلیل تأثیر کم آن ها بر مقادیر اندازه گیری شده، نشان داده نشده است.

بود. خطای ایجادشده برای نزدیک‌ترین عمق به بستر در فرکانس‌های ۱۰۰ و ۲۵ Hz برابر ۳۰٪ و ۴۰٪ و فرکانس‌های ۵ و ۱ Hz بیش‌تر از ۵۰٪ است. برای سایر اعماق این اعداد به ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۵۰٪ می‌رسد. کاهش بیش‌تر مدت‌زمان داده‌برداری به ۳۰ s باعث بروز خطای زیادی شده و از ۳۰٪ برای فرکانس ۲۰۰ Hz تا بیش از ۵۰٪ برای فرکانس‌های کم‌تر خواهد رسید.



شکل ۴- درصد خطای اندازه‌گیری سرعت عمودی در عمق‌های مختلف برای فرکانس‌های ۲۰۰، ۲۵، ۵ و ۱ Hz و مدت‌زمان برداشت ۳، ۱ و ۰/۵ min

Fig. 4 The error of longitudinal velocity measurements at different depth at sampling frequencies of 200, 25, 5 and 1 Hz and durations of 3, 1 and 0.5 minutes

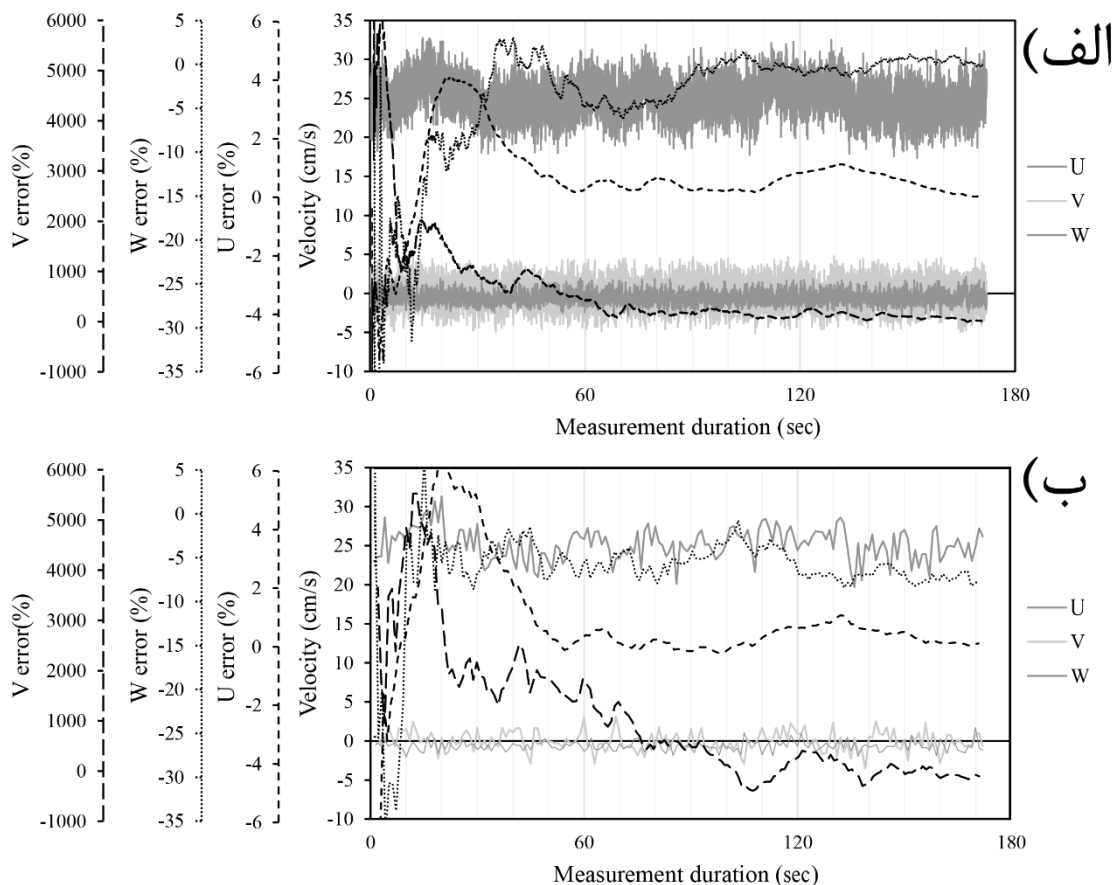
آب قرار گرفته است، سرعت عرضی حول صفر نوسان می‌کند و سرعت عمودی نیز دارای مقادیر سرعت رو به پایین بوده که نشان‌دهنده الگوی حرکت جریان‌های ثانویه در مرکز

به‌طور کلی، نیم‌رخ‌های بی‌بعد سرعت در سه راستا مطابق الگوی جریان‌های ثانویه است. توزیع سرعت طولی به‌صورت لگاریتمی بوده و حداکثر سرعت زیر سطح آب و در ۰/۷ عمق

عمودی، بعد از سپری شدن ۳۰ s، درصد خطای سرعت متوسط عمودی به کم‌تر از ۵٪ رسیده و با افزایش زمان داده‌برداری، این مقدار به سمت صفر میل می‌کند. این روند برای فرکانس ۱ Hz متفاوت بوده و افزایش داده‌برداری تا ۳ min دقیقه نیز موجب کاهش درصد خطای سرعت متوسط عمودی به کم‌تر از ۱۰٪ نمی‌شود. دلیل آن، بزرگ‌تر بودن فرکانس نوسانات راستای عمودی سرعت است که کاهش فرکانس داده‌برداری موجب عدم ثبت این نوسانات و به سبب آن افزایش درصد خطا می‌شود. این درصد خطا برای سرعت عرضی بسیار بزرگ‌تر بوده و دلیل آن نوسانات حول صفر است.

کانال و مشابه نتایج سایر پژوهشگران است (Nezu and Albayrak and Lemmin 2011; Auel et al. 2014; Demiral et al. 2020).

برای بررسی بیشتر، شکل (۵) سری زمانی سرعت‌های طولی، عرضی و عمودی را نشان می‌دهد. درصد خطای متوسط سرعت طولی در هر دو فرکانس ۲۰۰ و ۱ Hz کمتر از ۶٪ است. در فرکانس ۲۰۰ Hz، با افزایش مدت‌زمان برداشت داده تا حدود ۳۰ ثانیه، درصد خطا افزایش یافته و دلیل آن روند تغییرات سرعت لحظه‌ای است. بعد از زمان ۳۰ ثانیه درصد خطا کاهش یافته و بعد از حدود ۵۰ ثانیه، به کمتر از ۱٪ می‌رسد. مشابه همین روند نیز برای فرکانس ۱ هرتز وجود دارد. در فرکانس ۲۰۰ Hz و برای سرعت



شکل ۵- مقادیر لحظه‌ای و درصد خطای متوسط سرعت در سه راستای طولی، عرضی و عمودی برداشت‌شده در $y/h=0.9$ برابر 0.9 در فرکانس‌های: الف- ۲۰۰ و ب- ۱ Hz

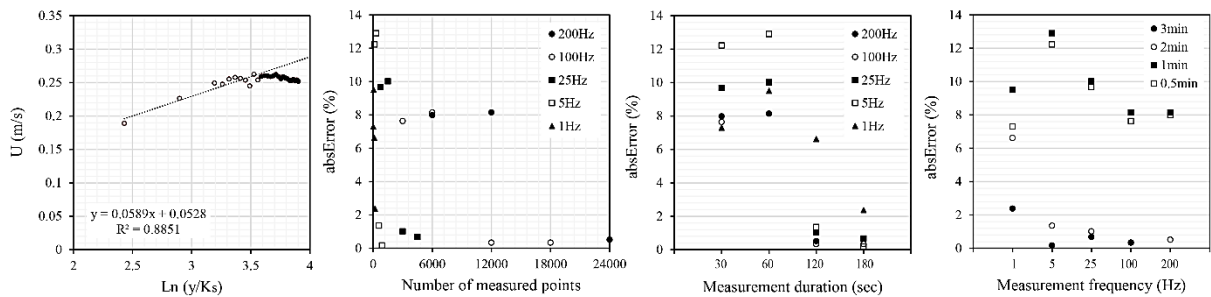
Fig. 5 Instantaneous and error of average velocity in longitudinal, transversal and vertical directions measured at $y/h=0.9$ for: a) frequency of 200, and b) 1 Hz

برشی به روش لگاریتمی را نشان می‌دهد. سرعت برشی برای نی‌مرخ برداشت‌شده برابر 0.235 m/s محاسبه شد. کاهش فرکانس و مدت‌زمان داده‌برداری موجب بروز حداکثر خطای ۶ و ۱۳٪ به ترتیب در تعیین سرعت متوسط طولی و سرعت برشی به روش قانون لگاریتمی می‌شود. شکل (۶) نشان

۳-۲- سرعت برشی

سرعت برشی یک عامل بسیار مهم در برآورد پارامترهای هیدرولیکی است و کاربرد بسیار زیادی در مطالعات مختلف دارد. برای تعیین سرعت برشی، از سرعت طولی جریان در اعماق مختلف استفاده می‌شود. شکل (۶) نحوه تعیین سرعت

می‌دهد کاهش درصد خطا مستقل از تعداد داده‌های برداشت‌شده است و وابستگی آن ابتدا به مدت‌زمان داده‌برداری و سپس به فرکانس برداشت داده است. شکل (۶) روش قانون لگاریتمی به کم‌تر از ۲٪ می‌رسد.



شکل ۶- محاسبه سرعت برشی به روش قانون لگاریتمی و درصد خطای ایجادشده با کاهش فرکانس و مدت‌زمان داده‌برداری
Fig. 6 Calculation of shear velocity using log-law and corresponding error, when reducing measurement frequency and duration

جدول ۲- مقادیر سرعت برشی محاسبه‌شده به دو روش مشخصات لایه‌مرزی و قانون لگاریتمی در فرکانس و مدت‌زمان برداشت متفاوت

Table 2 Shear velocity calculated by BLCM and log-law in different measurement duration and frequencies

Frequency (Hz)	Duration (min)	U_{*BLCM} (m/s)	$U_{*log-law}$ (m/s)	BLCM error (%)	Log-law error (%)
200	3.0	0.0597	0.0235	-	-
200	2.0	0.0599	0.0237	0.4	0.5
200	1.0	0.0601	0.0255	0.7	8.1
200	0.5	0.0615	0.0254	3.1	8.0
100	3.0	0.0596	0.0235	0.0	-0.3
100	2.0	0.0599	0.0236	0.5	0.3
100	1.0	0.0600	0.0255	0.7	8.1
100	0.5	0.0616	0.0253	3.2	7.6
25	3.0	0.0597	0.0237	0.0	0.7
25	2.0	0.0599	0.0238	0.5	1.0
25	1.0	0.0601	0.0259	0.8	10.0
25	0.5	0.0617	0.0258	3.3	9.7
5	3.0	0.0599	0.0236	0.4	0.2
5	2.0	0.0602	0.0239	1.0	1.3
5	1.0	0.0605	0.0266	1.4	12.9
5	0.5	0.0617	0.0264	3.5	12.2
1	3.0	0.0606	0.0241	1.5	2.4
1	2.0	0.0612	0.0251	2.5	6.6
1	1.0	0.0609	0.0258	2.0	9.5
1	0.5	0.0621	0.0253	4.1	7.3

صحیح ضریب c ، می‌توان از روش مشخصات لایه‌مرزی برای داده‌های برداشت‌شده در فرکانس و مدت‌زمان اندازه‌گیری کم‌تر استفاده کرد. لازم به ذکر است که در ادامه این مقاله، برای بی‌بعد سازی مقادیر شدت آشفتگی و تنش برشی رینولدز، از تنش برشی محاسبه‌شده به روش قانون لگاریتمی استفاده شده است.

۳-۳- شدت آشفتگی

توزیع شدت آشفتگی و مقایسه آن با توزیع جهانی شدت آشفتگی برای هر سه مؤلفه در شکل (۷) نشان داده شده است. خطوط رسم شده در شکل (۷) الف توزیع جهانی شدت آشفتگی هستند که از روابط (۱۶) تا (۱۸) به‌دست‌آمدند

جدول (۲) نیز مقادیر سرعت برشی محاسبه‌شده به دو روش تئوری مشخصات لایه‌مرزی و قانون لگاریتمی را نشان می‌دهد. سرعت برشی محاسبه‌شده به روش مشخصات لایه‌مرزی ۲/۵ برابر بیش‌تر از قانون لگاریتمی برآورد شده است. یکی از مهم‌ترین دلایل این اختلاف توسعه روش مشخصات لایه‌مرزی و ضریب c آن برای رودخانه‌های درشت‌دانه است. بنابراین کاربرد این روش در کانال‌های باریک با بستر صاف نیازمند انجام مطالعات بیش‌تر است. باین‌حال جدول (۲) نشان می‌دهد که این روش تأثیر کم‌تری از کاهش فرکانس و مدت‌زمان داده‌برداری نسبت به روش قانون لگاریتمی می‌پذیرد. بنابراین در صورت تعیین

موجب افزایش شدت آشفتگی همزمان بافاصله گرفتن از سطح آب می‌شود (Demiral et al. 2020). یکی دیگر از دلایل انحراف، عدد فرود جریان است. سایر محققین نیز در اعداد فرود متفاوت، نوساناتی در توزیع شدت آشفتگی برای مؤلفه عمودی گزارش کرده‌اند (Demiral et al. 2020). با توجه به تشابه توزیع شدت آشفتگی در فرکانس ۳۰۰ Hz و مدت‌زمان ۳ min داده‌برداری با نتایج سایر پژوهشگران، می‌توان از صحت داده‌های برداشت‌شده اطمینان داشته و تأثیر کاهش فرکانس و مدت‌زمان داده‌برداری را بررسی کرد. شکل (۷) نشان می‌دهد که کاهش فرکانس و مدت‌زمان داده‌برداری، اگرچه موجب ایجاد خطا می‌شود، ولی روند این تغییرات مشابه توزیع جهانی آن است. بنابراین در مطالعاتی که هدف آن بررسی کیفی روند توزیع شدت آشفتگی است، کاهش فرکانس و مدت‌زمان داده‌برداری تأثیر کمی دارد. اما در پژوهش‌هایی که هدف مقایسه کمی مقادیر شدت آشفتگی است، خطای به وجود آمده قابل قبول نیست.

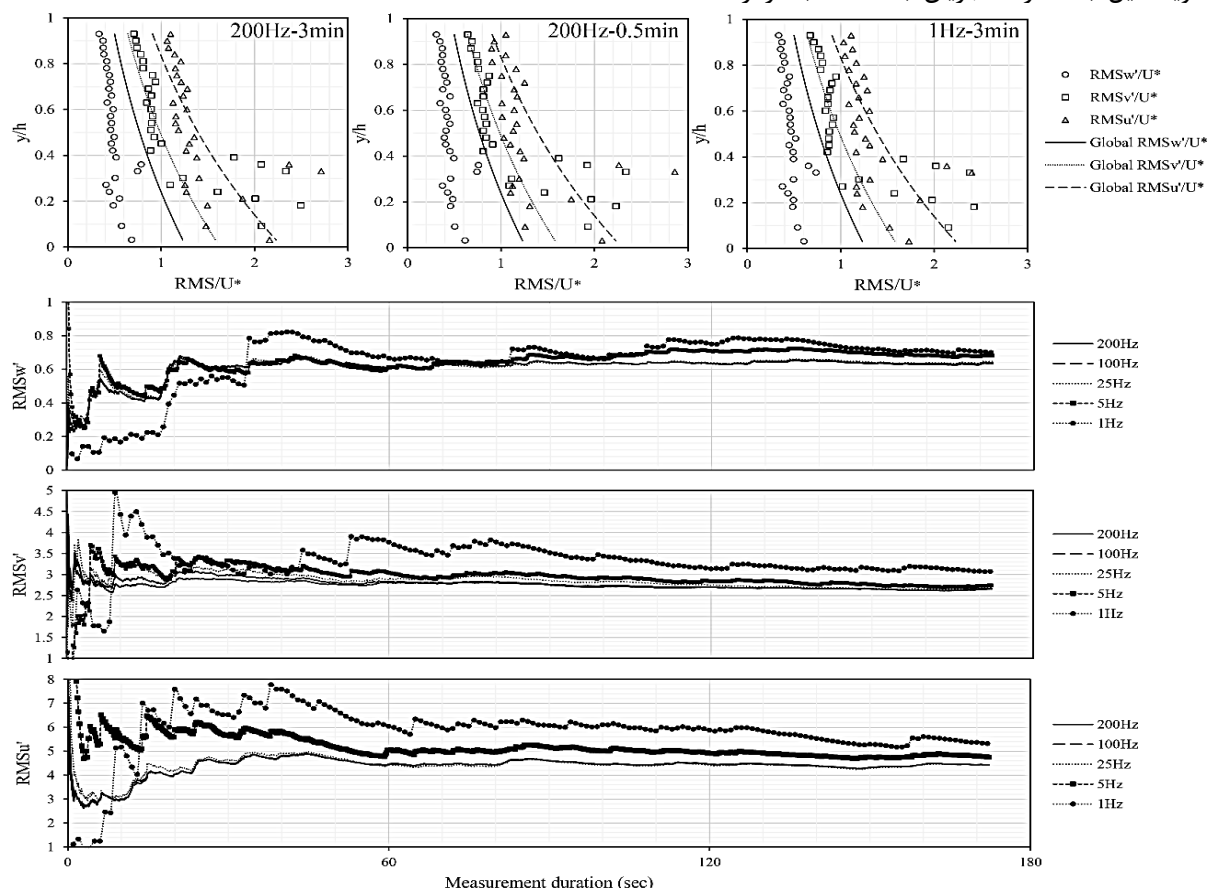
(Nezu and Nakagawa 1993). نقاط رسم شده مقادیر اندازه‌گیری شده در این پژوهش است.

$$\frac{RMSu'}{U_*} = 2.3 \exp\left(-\frac{y}{h}\right) \quad (16)$$

$$\frac{RMSv'}{U_*} = 1.63 \exp\left(-\frac{y}{h}\right) \quad (17)$$

$$\frac{RMSw'}{U_*} = 1.27 \exp\left(-\frac{y}{h}\right) \quad (18)$$

توزیع شدت آشفتگی هنگام کاهش فرکانس و مدت‌زمان داده‌برداری در راستای طولی و عرضی و در ناحیه خارجی جریان مشابه توزیع جهانی ارائه‌شده توسط Nezu and Nakagawa (1993) است. نمودارها در ناحیه داخلی جریان، دارای انحراف از توزیع جهانی می‌باشند. در مورد شدت آشفتگی در راستای عمودی نیز، توزیع آن به صورت خطی بوده و از روند توزیع جهانی فاصله دارد. دلیل انحراف از روند جهانی، وجود جریان‌های ثانویه است. جریان‌های ثانویه میل به انحراف جریان به سمت بستر را داشته که



شکل ۷- توزیع شدت آشفتگی در سه راستای طولی، عرضی و عمودی برای فرکانس‌های ۲۰۰ و ۱ Hz و مدت‌زمان داده‌برداری ۳ و min و ۰/۵ و سری زمانی تغییرات شدت آشفتگی برای فرکانس‌های مختلف در عمق نسبی ۰/۷۵

Fig. 7 Turbulence intensity distribution in Longitudinal, transverse and vertical directions in 200 and 1 Hz measurement frequencies as well as 3min and 0.5 min duration and time series of turbulence intensity for different measurement frequencies at $y/h=0.75$

شود که موجب صرفه‌جویی بسیار زیادی در زمان آزمایش‌ها می‌شود.

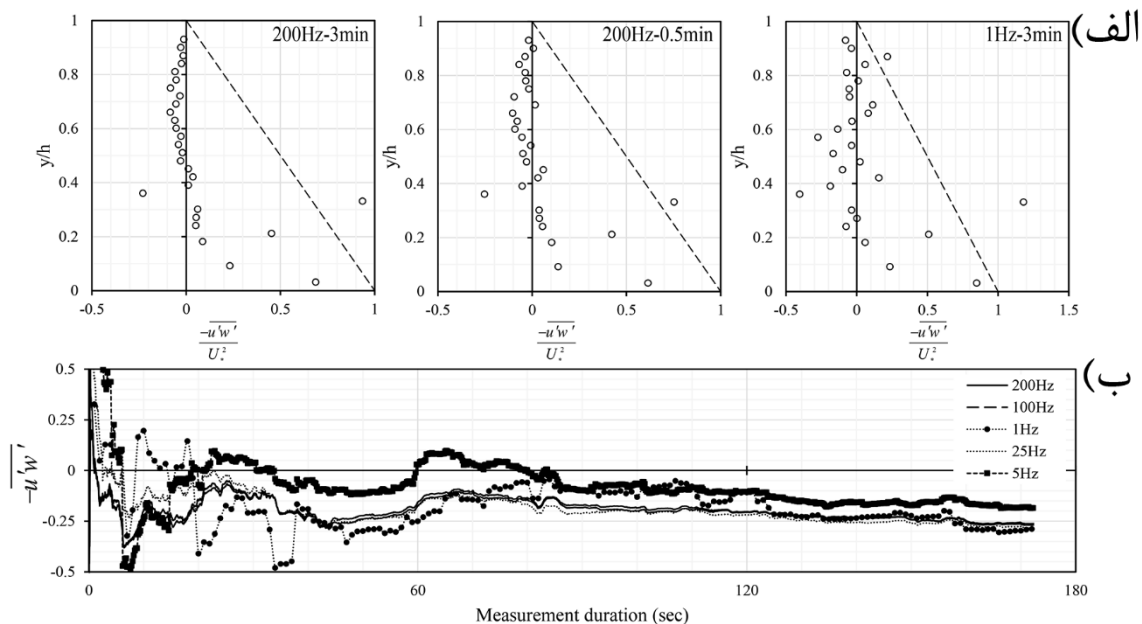
۳-۴- تنش برشی رینولدز

از آنجاکه تنش برشی رینولدز کاربرد زیادی در مطالعات رسوبی دارد، تعیین دقیق آن از اهمیت بالایی برخوردار است. توزیع جهانی بدون بعد تنش برشی رینولدز از مقدار ۱ در بستر شروع شده و به مقدار صفر در سطح آب می‌رسد و به‌صورت رابطه (۱۹) است (Nezu and Nakagawa, 1993).

$$\frac{-u'w'}{U_*^2} = \left(1 - \frac{y}{h}\right) - V_t \quad (19)$$

که، V_t پارامتر لزجت و قابل چشم‌پوشی است. عوامل مختلف مانند وجود جریان‌های ثانویه، باعث انحراف توزیع تنش برشی رینولدز از توزیع جهانی آن می‌شود (Demiral et al., 2020). شکل (۸) نشان می‌دهد تنش برشی رینولدز در بستر نزدیک ۱ بوده و در عمق نسبی ۰/۴ به صفر می‌رسد، پس از آن منفی شده و در عمق نسبی ۰/۷ تا نزدیک سطح آب صفر است که دلیل آن منفی بودن گرادیان سرعت به دلیل وجود پدیده دیپ در این اعماق است.

شکل (۷) تغییرات شدت آشفتگی با افزایش مدت‌زمان داده‌برداری در هر فرکانس را برای داده‌های برداشت‌شده در عمق نسبی ۰/۷۵ نشان می‌دهد. برای سه فرکانس ۲۰۰، ۱۰۰ و ۲۵ Hz، با افزایش مدت‌زمان داده‌برداری، درصد خطا به سمت صفر میل می‌کند، اما داده‌های برداشت‌شده با فرکانس ۵ و ۱ Hz، حتی با برداشت ۳ min اطلاعات، دارای درصد خطا می‌باشند. این درصد خطا برای راستای طولی برابر ۷ و ۲۰٪، راستای عرضی برابر ۲ و ۱۵٪ و راستای عمودی برابر ۶ و ۹٪ به‌ترتیب برای فرکانس‌های ۵ و ۱ Hz است. بنابراین برای اندازه‌گیری شدت آشفتگی، فرکانس اندازه‌گیری تا ۲۵ Hz مناسب است. این نتایج مشابه نتایج به‌دست‌آمده بر اساس فرکانس Nyquist در رودخانه‌های شنی است که حدود فرکانس اندازه‌گیری را برابر ۲۵ Hz تعیین کرده است (Afzalimehr et al., 2020). شکل (۷) نشان می‌دهد حداقل مدت‌زمان داده‌برداری برای درصد خطای کم‌تر از ۱۰ در فرکانس‌های ۲۰۰، ۱۰۰ و ۲۵ Hz، بین ۵۰ تا ۷۰ s است. اگرچه سایر محققین مدت‌زمان داده‌برداری ۱۰۰ و ۱۲۰ s را برای سرعت متوسط جریان بیان کرده‌اند، این مقدار زمان می‌تواند تا ۵۰ s نیز انتخاب



شکل ۸- الف- توزیع تنش برشی رینولدز برای فرکانس‌های ۲۰۰ و ۱ Hz و مدت‌زمان داده‌برداری ۳ و ۰/۵ min و ب- سری زمانی تغییرات تنش برشی رینولدز برای فرکانس‌های مختلف در عمق نسبی ۰/۷۵

Fig. 8 a) Reynolds shear stress distribution in 200Hz and 1Hz measurement frequencies as well as 3min and 0.5min duration and b) time series of Reynolds shear stress for different measurement frequencies at $y/h=0.75$

با این حال تأثیر کاهش فرکانس بر مقدار تنش برشی رینولدز در هر عمق بیشتر از تأثیر کاهش مدت‌زمان اندازه‌گیری است. سری زمانی تغییرات تنش برشی در عمق نسبی ۰/۷۵

با کاهش فرکانس و مدت‌زمان داده‌برداری در شکل (۸)، توزیع تنش برشی رینولدز دارای نوسان شده، اما توزیع کلی آن مشابه فرکانس ۲۰۰ Hz و مدت‌زمان ۳ min است.

در فرکانس‌های مختلف نیز نشان می‌دهد مقدار تنش برشی بی‌بعد رینولدز در فرکانس‌های ۲۰۰، ۱۰۰، ۲۵ و ۵ Hz پس از گذشت مدتی از شروع داده‌برداری به سمت مقدار واقعی آن میل کرده، اما در فرکانس ۱ Hz با افزایش مدت‌زمان داده‌برداری میزان اختلاف با مقدار واقعی دارای نوسانات بسیار زیادی دارد. از سوی دیگر، با افزایش مدت‌زمان داده‌برداری تا ۳ min در فرکانس ۵ Hz، میزان اختلاف به صفر نرسیده و درصد خطای نهایی محاسبه‌شده برابر ۳۰٪ است. ولی فرکانس‌های ۲۰۰، ۱۰۰ و ۲۵ Hz، میزان اختلاف بعد از ۳ min برابر صفر می‌شود و خطوط بر یکدیگر منطبق می‌شوند. از این‌رو فرکانس‌های تا ۲۵ Hz مناسب برداشت و محاسبه تنش برشی رینولدز است. شکل (۸) نشان می‌دهد برای این فرکانس‌ها، اندازه‌گیری تا ۲ min موجب کاهش درصد خطا تا کم‌تر از ۱۰٪ است. لازم به ذکر است که نتایج ذکرشده مربوط به پروفیل اندازه‌گیری شده در کانال آزمایشگاهی با بستر صاف است.

۴- نتیجه‌گیری

از اهداف این پژوهش، بررسی تأثیر کاهش فرکانس و مدت‌زمان داده‌برداری ADV بر مقادیر اندازه‌گیری شده مشخصات جریان است. بدین ترتیب، حداقل فرکانس و مدت‌زمان داده‌برداری موردقبول تعیین‌شده و به سبب آن موجب صرفه‌جویی در هزینه‌های آزمایشگاه‌های هیدرولیک، برای تهیه ADV و کاهش مدت‌زمان انجام آزمایش‌ها می‌شود. نتایج حاصل از این پژوهش به‌صورت زیر است.

۱- برای اندازه‌گیری مقادیر متوسط سرعت، دستگاه‌های با فرکانس ۱ Hz نیز مناسب و مدت‌زمان داده‌برداری حداقل ۵ s است.

۲- برای تعیین سرعت برشی به روش قانون لگاریتمی، کاهش فرکانس و مدت‌زمان داده‌برداری باعث ایجاد خطای ۱۳٪ است. دلیل این امر استفاده از اعماق نزدیک بستر برای محاسبه سرعت برشی است و درصد خطا در نزدیکی بستر برای همه پارامترها بیش‌تر است.

۳- برای اندازه‌گیری و محاسبه مؤلفه‌های آشفته جریان مانند شدت آشفتگی و تنش برشی رینولدز، فرکانس اندازه‌گیری تا

۲۵ Hz مناسب است. حداقل مدت‌زمان داده‌برداری برای خطای کم‌تر از ۱۰٪ نیز بین ۵۰ تا ۷۰ s است.

۴- کاهش خطا برای همه پارامترها مستقل از تعداد داده‌های برداشت‌شده است و وابستگی آن ابتدا به مدت‌زمان داده‌برداری و سپس به فرکانس برداشت داده است.

از محدودیت‌های این پژوهش، انجام آزمایش‌ها در شرایط بستر صاف و آزمایشگاهی است. بنابراین برای استفاده از ADV در شرایط پیچیده و یا رودخانه‌ها، انتخاب حداقل مدت‌زمان داده‌برداری ارائه‌شده در این پژوهش باید با احتیاط صورت پذیرد. منابع خطای احتمالی در انجام این پژوهش وجود نویز زمان داده‌برداری است. اگرچه با استفاده از فیلترهای اشاره‌شده، نویزهای احتمالی حذف گردیده است. حال آنکه برای بررسی عمیق‌تر، انجام آنالیز اسپکترا که علاوه بر اینکه معرف خوبی برای توزیع گردابه‌ها با ابعاد مختلف است، وجود نویز توسط عوامل خارجی مانند نوسانات برق را نیز شناسایی می‌کند، ضروری است. همچنین نکته مهم در استفاده از آنالیز اسپکترا، فرکانس اندازه‌گیری دستگاه است. در نمودار اسپکترا، محور افقی تا نصف فرکانس اندازه‌گیری قابلیت نمایش را دارد، بنابراین با کاهش فرکانس، علی‌رغم افزایش مدت‌زمان داده‌برداری نیز، انجام این آنالیز غیرممکن خواهد بود. از آنجاکه ADV قابل‌استفاده در رودخانه نیز می‌باشد، با توجه به نتایج این پژوهش، مبنی بر قابل‌قبول بودن کاهش فرکانس در مقادیر اندازه‌گیری شده جریان، می‌توان با تهیه دستگاه‌های باقیمت پایین‌تر، از آن‌ها در رودخانه‌ها نیز استفاده کرد.

دسترسی به داده‌ها

داده‌های برداشت‌شده در این پژوهش به‌صورت نمودار ارائه‌شده است. علاوه بر این، داده‌های خام حسب درخواست منطقی، از طریق نویسنده مسئول از طریق ایمیل قابل‌ارسال است.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که، هیچ‌گونه تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

References

Afzalimehr, H. and Anctil, F. (2000). Accelerating shear velocity in gravel-bed

channels. *Hydrol. Sci. J.*, 45(1), 113-124. DOI: 10.1080/02626660009492309



- Afzalimehr, H., Najafabadi, E. F. and Gallichand, J. (2012). Effects of accelerating and decelerating flows in a channel with vegetated banks and gravel bed. *Int. J. Sediment Res.*, 27(2), 188-200. DOI: 10.1016/S1001-6279(12)60027-4
- Afzalimehr, H., Maddahi, M. R., Naziri, D. and Sui, J. (2019a). Effects of non-submerged boulder on flow characteristics – A field investigation. *Int. J. Sediment Res.*, 34(2), 136-143. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2018.10.007>
- Afzalimehr, H., Maddahi, M. R., Sui, J. and Rahimpour, M. (2019b). Impacts of vegetation over bedforms on flow characteristics in gravel-bed rivers. *J. Hydrodyn.*, 31, 986-998. DOI: 10.1007/s42241-019-0053-x
- Afzalimehr, H., Hadian, S. Shahiri Tabarestani, E. and Mohammadi, M. (2020). Influence of suspended sediment load on roughness coefficient and intensity of flow turbulence (case study: Haraz, Rostamabad and Beheshtabad Rivers). *Environ. Water Eng.*, 6(4), 459-472. DOI: 10.22034/jewe.2020.243225.1403 [In Persian].
- Albayrak, I. and Lemmin, U. (2011). Secondary currents and corresponding surface velocity patterns in a turbulent open-channel flow over a rough bed. *J. Hydraul. Eng.*, 137, 1318-1334. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000438
- Auel, C., Albayrak, I. and Boes, R. M. (2014). Turbulence characteristics in supercritical open channel flows: Effects of Froude number and aspect ratio. *J. Hydraul. Eng.*, 140, 4014004. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000841
- Demiral D., Boes R. M. and Albayrak I. (2020) Effects of secondary currents on turbulence characteristics of supercritical open channel flows at low aspect ratios. *Water*, 12(11), 3233. DOI: 10.3390/w12113233
- Dey, S., Sarkar, S. and Solari, L. (2011). Near-bed turbulence characteristics at the entrainment threshold of sediment beds. *J. Hydraul. Eng.*, 137(9), 945-958. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000396](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000396)
- Fazel Najafabadi E. Afzalimehr H. and Rowinski P. M. (2018). Flow structure through a fluvial pool-riffle sequence – Case study. *J. Hydro-environ. Res.*, 19, 1-15. DOI: 10.1016/j.jher.2018.01.001
- Guo, J. and Julien, P. Y. (2001). Turbulent velocity profiles in sediment-laden flows. *J. Hydraul. Res.*, 39(1), 11-23. DOI: 10.1080/00221680109499798
- Homayounfar, F. and Khorsandi, B. (2021). Application of post-processing methods on the velocity statistics measured at different sampling frequencies using acoustic doppler velocimeter. *J. Hydraul. Eng.* 16(1), 37-51. DOI: 10.30482/JHYD.2021.257224.1487 [In Persian].
- Kabiri F. Afzalimehr H. and Sui J. (2017). Flow structure over a wavy bed with vegetation cover. *Int. J. Sediment Res.*, 32(2), 186-194. DOI: 10.1016/j.ijsrc.2016.07.004
- Kachouyinejad, N. Fazlollahi, A. and Afzalimehr, H. (2013). Investigating the effects of changing measurement frequency and duration on samples captured by ADV. *Proc. 2013, 7th National Civil Engineering Congress, Shahid Nikbakht Engineering Department, Zahedan, Iran* [In Persian].
- Khorsandi, B. (2016). Investigating the accuracy of acoustic doppler velocimeter in turbulent flows. *Proc. 2016, 15th Hydraulic Conf., Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran* [In Persian].
- Kraus, N. C., Lohrmann, A. and Cabrera, R. (1994). New acoustic meter for measuring 3D laboratory flows. *J. Hydraul. Eng.*, 120, 406-412. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1994)120:3(406)
- Moeini, M., Khorsandi, B. and Mydlarski, L. (2020). Effect of acoustic doppler velocimetry sampling frequency on statistical measurements of turbulent axisymmetric jets. *J. Hydraul. Eng.* 146(7), 04020048. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001767
- Nezu, I. and Nakagawa, H. (1993). *Turbulence in open-channel flows*. Rotterdam: IAHR-AIRH monograph series. DOI: 10.1201/9780203734902
- Song, T. and Chiew, Y. M. (2001). Turbulence measurements in nonuniform open-channel flow using acoustic doppler velocimeter (ADV). *J. Hydraul. Eng.*, 127(3), 219-232.



DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2001)127:3(219) in shallow streams. J. Hydraul. Res., 45(6), 752-762. DOI: 10.1080/00221686.2007.9521813

Stone, M. C. and Hotchkiss, R. H. (2007). Evaluating velocity measurement techniques

How to cite this paper:

Maddahi, A. and Rahimpour, M. (2022) Effects of ADV measurement frequency and duration on calculation of turbulent flow characteristics. Environ. Water Eng., 8(4), 951–968. DOI: 10.22034/JEWE.2021.299503.1610

