

EXTENDED ABSTRACT

Flow Measurement in Steep Channels Using Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV)

F. Akbarpour¹, M. Fathi-Moghadam^{2*} and A. Fathi³

1- PhD Student of Hydraulic Structures, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

2* - Corresponding Author, Professor Retired from Department Faculty of Water Structures, Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran. (fathi49@gmail.com)

3- Assistant Professor, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

ARTICLE INFO

TO CITE THIS ARTICLE :

Article history:

Received: 12 May 2020

Revised: 09 November 2021

Accepted: 11 November 2021

Keywords:

LSPIV, Steep Channels, Velocity Index (VI), Flow Measurement, Supercritical Flow.

Akbarpour, F., Fathi-Moghadam, M., Fathi, A. (2022). 'Flow Measurement in Steep Channels Using Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV)', *Irrigation Sciences and Engineering*, 45(3), pp. 79-95.

Introduction

Measuring flow discharge in rivers and open channels has always been one of the most important concerns of water sciences experts. The most common flow measurement method in open channels is velocity- area approach. An approach recently considered as a non-contact option for measuring flow is the use of surface flow image velocimetry methods. Recently, the standard PIV method has been used to measure the velocity at larger scales and on the flow surface, which is referred to as the LSPIV (Bieri et al., 2009).

The most common way of converting the surface velocity to the depth-averaged velocity is to use a coefficient called the Velocity Index (VI) which is in fact the ratio of the depth-averaged velocity to the surface velocity. In the literature, the value of the Velocity Index for river flows and laboratory flumes, which were mainly studied for subcritical conditions, is believed to be equal to 0.85, which seems to be an accepted value for this index among the hydraulics communities.

In this research, an image velocimetry technique was used to study the flow characteristics, determine the Velocity Index and investigate the surface flow pattern. The instantaneous surface velocity field was measured using the LSPIV method and then a two-dimensional time-averaged velocity map was obtained for different experiments providing the possibility of comparing the flow pattern in different scenarios. Furthermore, by means of spatial averaging of the time-averaged velocity map, the double averaged surface velocity $\langle \bar{U}_s \rangle$ was obtained using which and the cross-sectional mean velocity the Velocity Index was calculated. Therefore, the effect of channel slope and relative submergence on the Velocity Index was investigated and relationships were proposed to estimate the VI in steep slopes.

Methodology

Laboratory measurements of this research were carried out at the Hydraulic Laboratory of the Hydraulic Engineering and Water Resources Management Institute of the Graz University of

Technology in Austria. For this purpose, a 5-m long, 0.55-m wide tilting flume was. Spherical glass particles of equal size of 16 mm in diameter and specific gravity of 2.5 g/cm³ were used to ideally simulate gravel bed of steep streams. First, the particles were roughened by sand to increase their ability to absorb paint, and then a layer of them was glued on the Plexiglas plates using silicon.

Velocity Measurement

The LSPIV was used to measure the two-dimensional velocity field on the flow surface, which is, in fact, a version of the PIV technique in which the use of laser light for visualizing the measurement plane is omitted.

In this research, a MATLAB toolbox called PIVlab was used to process the images (Thielicke and Stamius, 2014). PIVlab and most PIV software packages are based on cross correlation algorithm

where the images are first divided into a number of Interrogation Areas (IA). Since this algorithm is in fact based on the recognition of the patterns formed by the tracer particles in each IA, for each of the two consecutive images, the correlation coefficient of each IA in the first image with the adjacent IAs in a certain range in the second image is calculated for pattern recognition using equation (1):

$$R_{ab} = \frac{\sum_{i=1}^{MX} \sum_{j=1}^{MY} \{(a_{ij} - \bar{a}_{ij})(b_{ij} - \bar{b}_{ij})\}}{\left\{ \sum_{i=1}^{MX} \sum_{j=1}^{MY} (a_{ij} - \bar{a}_{ij})^2 \sum_{i=1}^{MX} \sum_{j=1}^{MY} (b_{ij} - \bar{b}_{ij})^2 \right\}^{1/2}} \quad (1)$$

Experiments Procedure

Details of the experiments are summarized in Table (1). In each experiment, the imaging was performed for a duration of 60 seconds at 125 fps and in total 7,500 images were recorded. Fast Fourier Transform was used where initially the image evaluation starts with a large IA and the results are used for smaller IAs and velocity vectors are obtained for each IA.

Table 1- The experiments parameters and characteristics

| Experiment Code | Discharge (lit/s) | Slope (%) | Effective depth (mm) | Cross sectional mean velocity (m/s) | Fr | Re | Double-averaged surface velocity (m/s) | Velocity index (VI) |
|-----------------|-------------------|-----------|----------------------|-------------------------------------|------|--------|--|---------------------|
| S2H23 | 6.4 | | 27 | 0.43 | 0.85 | 11636 | 0.71 | 0.61 |
| S2H30 | 10.4 | | 34 | 0.56 | 0.96 | 18909 | 0.83 | 0.67 |
| S2H38 | 15.3 | | 42 | 0.66 | 1.03 | 27818 | 0.96 | 0.69 |
| S2H40 | 17 | | 44 | 0.7 | 1.07 | 30909 | 0.99 | 0.71 |
| S2H45 | 20.7 | 2 | 49 | 0.77 | 1.11 | 37636 | 1.06 | 0.73 |
| S2H50 | 24.5 | | 54 | 0.82 | 1.13 | 44545 | 1.08 | 0.76 |
| S2H60 | 32.7 | | 64 | 0.93 | 1.17 | 59454 | 1.21 | 0.77 |
| S2H75 | 46 | | 79 | 1.06 | 1.2 | 83636 | 1.35 | 0.78 |
| S6H23 | 10.2 | | 27 | 0.69 | 1.35 | 18545 | 1.07 | 0.65 |
| S6H30 | 16 | | 34 | 0.86 | 1.48 | 29090 | 1.29 | 0.67 |
| S6H38 | 23.1 | | 42 | 1 | 1.56 | 42000 | 1.48 | 0.68 |
| S6H40 | 25.4 | | 44 | 1.05 | 1.6 | 46181 | 1.54 | 0.68 |
| S6H45 | 30.2 | 6 | 49 | 1.12 | 1.62 | 54909 | 1.61 | 0.7 |
| S6H50 | 36.3 | | 54 | 1.22 | 1.68 | 66000 | 1.77 | 0.69 |
| S6H60 | 47 | | 64 | 1.34 | 1.69 | 85454 | 1.89 | 0.71 |
| S6H75 | 67.3 | | 79 | 1.55 | 1.76 | 122363 | 2.07 | 0.75 |
| S10H23 | 12.7 | | 27 | 0.86 | 1.68 | 23090 | 1.34 | 0.64 |
| S10H30 | 19 | | 34 | 1.02 | 1.76 | 34545 | 1.49 | 0.68 |
| S10H38 | 28.8 | | 42 | 1.25 | 1.94 | 52363 | 1.79 | 0.7 |
| S10H40 | 31.5 | | 44 | 1.3 | 1.98 | 57272 | 1.82 | 0.71 |
| S10H45 | 37.4 | 10 | 49 | 1.45 | 2.09 | 71090 | 2.07 | 0.7 |
| S10H50 | 45.8 | | 54 | 1.54 | 2.12 | 83272 | 2.18 | 0.71 |
| S10H60 | 60.6 | | 64 | 1.72 | 2.17 | 110181 | 2.39 | 0.72 |
| S10H75 | 83.8 | | 79 | 1.93 | 2.19 | 152363 | 2.55 | 0.76 |

Results and Discusspn

Velocity Index

As mentioned earlier, Velocity Index is the ratio of the average cross sectional velocity to the average velocity of the flow surface. The velocity indices obtained in this study range from 0.612 to 0.784 with an average value of 0.701, which is of a difference of nearly 17 % from the well-established value of 0.85.

Polatel (2006) attributed the velocity index to parameters such as bed roughness, relative submergence or aspect ratio and flow regime. In Figure (1a), the changes in the velocity index against the relative submergence for different slopes are shown. Obviously, the velocity index on different slopes increases with an increase in the relative submergence which indicates that by decreasing the depth of the flow, the difference between the mean velocity and the surface velocity increases due to the high stress and linearization of the velocity profile in shallow flows. In order to extract a generalized relationship to estimate the value of velocity index by having the relative submergence under supercritical conditions on a steep slope (more than 2%) on gravel bed streams, the regression technique was performed regardless of the gradient and led to the following relationship (Figure 1b):

$$VI = 0.585 \left(\frac{H_e}{D_b}\right)^{0.168} \quad (2)$$

Thus, using equation (2) which has a correlation coefficient of 0.8 by measuring the surface velocity and having the relative submergence, the average velocity and subsequently the flow rate can be achieved in the described conditions.

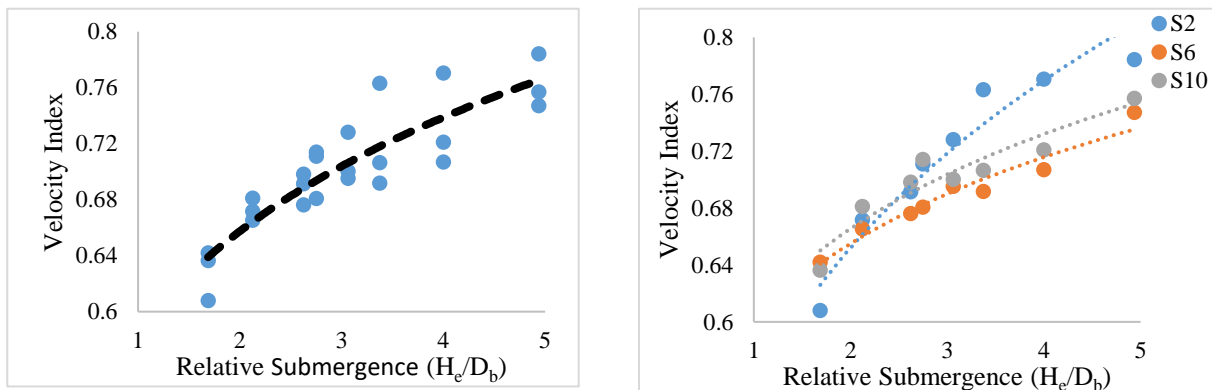


Fig. 1- Variation of velocity index against a) aspect ratio for the slopes 2, 6 and 10 percent, b) overall aspect ratio

Conclusions

In this study, LSPIV was used to measure the value and changes of the velocity index in a steep rough bed under low relative submergence and supercritical conditions. The results of this research are discussed in two parts of velocity index and discharge measurement as follow:

- 1- Trusting a value equal to 0.85 as the velocity index for converting the surface velocity to the average velocity under different flow conditions is not free of errors. In this study, the velocity indices obtained for different relative submergences range from 0.612 to 0.784 with an average value of 0.701, which is about 17 percent different from the common value of 0.85. It is noteworthy that the velocity index is dependent on the relative submergence, which in fact suggests that by decreasing the depth of flow, the difference between the average velocity and the surface velocity increases.
- 2- The proposed method for estimating flow rate for experiments performed in the laboratory flume of the present study has a very high precision with a maximum error of 6 %. Therefore, by measuring

the flow surface velocity by different methods and using the above method, flow discharge might be calculated in flume and also in the field with acceptable reliability.

Acknowledgments

All the efforts made by the staff of the Institute of Hydraulic Engineering and Water Resources Management, Graz University of Technology, Austria, including their role in the construction and preparation of the laboratory model and their cooperation in conducting the experiments, are sincerely appreciated.

References

- 1- Bieri, M., Jenzer, J., Kantoush, S.A. and Boillat, J.L., 2009. Large scale particle image velocimetry applications for complex free surface flows in river and dam engineering. In *33rd IAHR 2009 Congress. Vancouver, Canada*.
- 2- Polatel, C., 2006. *Large-scale roughness effect on free-surface and bulk flow characteristics in open-channel flows* (Doctoral dissertation, University of Iowa).
- 3- Thielicke, W. and Stamhuis, E.J., 2010. Time resolved digital particle image velocimetry tool for Matlab. *This code can be downloadable at the following website: <http://PIVlab.blogspot.com>.*



© 2022 Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. This article 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/>).



اندازه‌گیری جریان روی شیب تند با استفاده از سرعت‌سنجی بزرگ مقیاس تصویری ذرات LSPIV

فرهاد اکبرپور^۱، منوچهر فتحی مقدم^{۲*} و احمد فتحی^۳

۱- دانش آموخته دکتری سازه‌های آبی، گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز.
 ۲- نویسنده مسئول، استاد بازنشسته گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز.

fathi49@gmail.com

۳- استادیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز.

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۲۰

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۸/۱۸

دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۲۳

چکیده

اندازه‌گیری جریان در آبراهه‌های روباز همواره یکی از مهم‌ترین موضوعات مد نظر متخصصین علم هیدرولیک بوده است. به‌منظور اندازه‌گیری دبی در آبراهه‌ها به روش سرعت-مساحت اندازه‌گیری سرعت متوسط جریان ضرورت دارد. اما به‌کارگیری روش‌های تماسی مثل استفاده از مولینه برای اندازه‌گیری سرعت همیشه میسر نیست و در مواقع سیلاب و هم‌چنین برای جریان‌های کم‌عمق استفاده از این روش‌ها امکان‌پذیر نمی‌باشد. رویکردی که اخیراً به‌عنوان یک گزینه غیرتماسی برای اندازه‌گیری جریان در مجاری روباز مورد توجه قرار گرفته است استفاده از روش‌های سرعت‌سنجی مبتنی بر تصویربرداری از سطح جریان می‌باشد. از جمله این روش‌ها گونه‌ای از روش PIV موسوم به LSPIV است که به‌دلیل حذف ضرورت استفاده از لیزر طرفداران زیادی پیدا کرده است. در این مطالعه برای اندازه‌گیری میدان دو بعدی سرعت روی سطح جریان فوق‌بحرانی پر شیب و توربولنت از LSPIV بهره‌گیری شد. از داده‌های سرعت حاصله برای محاسبه شاخص سرعت (VI) که برای تبدیل سرعت سطحی به سرعت متوسط مقطع و اندازه‌گیری دبی جریان به‌کار می‌رود استفاده گردید و تأثیر تغییرات استغراق نسبی در سه شیب مختلف روی این شاخص بررسی شد. هم‌چنین میدان سرعت سطحی متوسط زمانی برای استغراق‌های مختلف به‌صورت کمی مقایسه شد. مقادیر شاخص سرعت به‌دست آمده در این تحقیق در محدوده ۰/۶۱۲ تا ۰/۷۸۴ با مقدار متوسط ۰/۷۰۱ هستند که این مقدار متوسط با مقدار متداول ۰/۸۵ حدود ۱۷ درصد اختلاف دارد. در پایان نیز روابطی برای برآورد مقدار شاخص سرعت و متعاقباً دبی جریان با استفاده از استغراق نسبی پیشنهاد و ملاحظه گردید که روش پیشنهادی منجر به برآورد قابل قبول مقادیر دبی می‌شود.

کلید واژه‌ها: LSPIV، شیب تند، شاخص سرعت، اندازه‌گیری جریان، جریان فوق‌بحرانی.

مقدمه

است استفاده از روش‌های سرعت‌سنجی مبتنی بر تصویربرداری از سطح جریان می‌باشد.

تاکنون چندین روش برای اندازه‌گیری سرعت سطح جریان به‌کار گرفته شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به مشتقی از روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات (PIV، Particle Image Velocimetry) موسوم به سرعت‌سنجی بزرگ مقیاس تصویری ذرات (LSPIV) (Weitbrecht et al (2002) و (Fujita et al (1998) و (Muste et al (2008) و (Moramarco et al (2017) ، روش راداری سرعت سطحی (Surface Velocity Radar, SVR) (Costa et al. (2000) و (Welber et al (2016)، روش سرعت‌سنجی تصویری شناور کرووی (Spherical Float Image Velocimetry, SFIV) (Shin et al (2016) و روش سرعت‌سنجی سطحی موج الکترومغناطیسی (Electromagnetic Wave Surface Velocimeter, ESV) (Julien و Lee (2006) اشاره نمود.

اندازه‌گیری دبی جریان در رودخانه‌ها و کانال‌های باز همواره یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های متخصصین حوزه آب بوده است. متداول‌ترین روش اندازه‌گیری دبی در آبراهه‌ها روش سرعت-مساحت است. اغلب برای اندازه‌گیری سرعت در مجاری روباز از روش‌های تماسی مستقیم مثل استفاده از مولینه بهره‌گیری می‌شود که این روش‌ها مستلزم صرف زمان و انرژی زیادی بوده عاری از خطا نیز نمی‌باشند. به‌علاوه به‌کارگیری روش‌های تماسی همیشه میسر نیست و در مواقع سیلاب که جریان سرعت بسیار بالایی دارد و هم‌چنین برای جریان‌های کم‌عمق استفاده از این روش‌ها امکان‌پذیر نمی‌باشد. برای مثال در آبراهه‌های پرشیب و کوهستانی جریان به‌دلیل سرعت بسیار بالا دارای عمقی خیلی کم می‌باشد و در این شرایط برای اندازه‌گیری سرعت جریان به ناچار باید از روش‌های غیرتماسی استفاده شود. رویکردی که اخیراً به‌عنوان یک گزینه غیرتماسی برای اندازه‌گیری جریان مورد توجه قرار گرفته

Novak Fujita et al., 1998 ;Bradley et al., 2002;) (et al., 2017). در این تحقیقات سرعت سطحی اندازه‌گیری شده، با استفاده از روابط و یا ضرایب موجود تبدیل به سرعت متوسط عمقی شده و با داشتن اطلاعات مربوط به هندسه مقطع دبی جریان محاسبه گردیده است. متداول‌ترین راه برای تبدیل سرعت سطحی به سرعت متوسط استفاده از ضریبی موسوم به شاخص سرعت (VI) می‌باشد. شاخص سرعت در حقیقت نسبت سرعت متوسط عمقی به سرعت سطح جریان می‌باشد.

در برخی مطالعه‌ها نیز از LSPIV برای اندازه‌گیری سرعت سطح جریان به منظور بررسی شاخص سرعت استفاده شده است (Novak et al., Welber et al., 2016, Polatel, 2006). اندازه‌گیری و محاسبه مقدار صحیح شاخص سرعت از آنجا حائز اهمیت است که با داشتن این شاخص و اندازه‌گیری سرعت سطح جریان با استفاده از روش‌های مختلف می‌توان سرعت متوسط و متعاقباً دبی جریان را به دست آورد. در اغلب منابع مقدار شاخص سرعت برای جریان در رودخانه‌ها و هم‌چنین فلوم‌های آزمایشگاهی که عمدتاً برای شرایط زیربحرانی مطالعه شده‌اند معادل 0.85 عنوان شده است که به نظر می‌رسد این عدد مقدار پذیرفته شده ای برای این شاخص در میان مجامع علم هیدرولیک باشد. هرچند که نتایج به دست آمده در این تحقیق برای جریان‌های فوق‌بحرانی نشان می‌دهد که در شرایط حاکم بر آزمایش‌های انجام شده مقادیر دیگری برای شاخص سرعت به دست می‌آید که لزوم بررسی بیشتر در این خصوص را ایجاب می‌نماید.

در این تحقیق به منظور مطالعه آزمایشگاهی خصوصیات جریان، مشخص نمودن شاخص سرعت و بررسی الگوی جریان سطحی و تغییرات آن‌ها در نتیجه تغییر شیب و عمق آبراهه در حالت زبری درشت مقیاس و استغراق نسبی پایین و در شرایطی که جریان در قریب به اتفاق آزمایش‌های انجام شده فوق‌بحرانی بود از روش سرعت‌سنجی مبتنی بر تصویربرداری بهره‌گیری شد. به این صورت که میدان سرعت سطح جریان به صورت لحظه‌ای با استفاده از روش LSPIV اندازه‌گیری شده و با متوسط‌گیری زمانی، نقشه سرعت متوسط زمانی دوبعدی برای آزمایش‌های مختلف به دست آمد. بدین ترتیب الگوی جریان در حالات مختلف مقایسه شد. شایان ذکر است از آنجا که نسبت ابعاد (B/H) در این آزمایش‌ها از ۷ تا ۲۴ متغیر بود که حاکی از کم‌عمق (Shallow) بودن جریان می‌باشد رفتار هیدرولیکی به‌خوبی در صفحه افقی و در سطح جریان متبلور می‌شود. هم‌چنین با متوسط‌گیری مکانی از روی نقشه سرعت متوسط زمانی مقدار سرعت متوسط دوگانه ($\overline{U_s}$) سطحی حاصل گردید که با داشتن سرعت متوسط مقطع مقدار شاخص سرعت محاسبه شد. لذا تأثیر شیب آبراهه و استغراق نسبی بر روی شاخص سرعت نیز مورد بررسی قرار گرفته و روابطی برای برآورد مقدار شاخص سرعت و هم‌چنین دبی جریان در شیب‌های تند پیشنهاد گردید. در پایان نیز کارایی روش ارائه شده برای اندازه‌گیری دبی جریان مورد بررسی قرار گرفت.

سرعت‌سنجی تصویری ذرات (PIV) به‌عنوان یک روش اندازه‌گیری سرعت خیلی سریع طی دو دهه اخیر برای مطالعه خصوصیات جریان جای خود را در محافل علم هیدرولیک باز نموده است. این روش در حقیقت ابزاری غیرتماسی برای استحصال سرعت دو بعدی جریان سیالات می‌باشد. Raffel et al. (2007) مبنای روش‌های متداول سرعت‌سنجی تصویری را تشریح کرده‌اند. اما اخیراً روش PIV استاندارد برای اندازه‌گیری سرعت در مقیاس‌های بزرگتر و روی سطح جریان به‌کار برده شده است که به این روش سرعت‌سنجی بزرگ مقیاس تصویری ذرات (LSPIV) (Bieri et al., 2009) اتلاق می‌گردد.

Fujita et al. (1998) جزو اولین محققینی بودند که سرعت‌سنجی مبتنی بر تصویر را با اصلاحاتی برای تهیه میدان‌های سرعت در مساحت‌های وسیع در شرایط آزمایشگاهی و میدانی به‌کار گرفتند و این روش را LSPIV نامیدند. آن‌ها به‌کارگیری LSPIV را در سه مثال کاربردی مهندسی هیدرولیک در سطوح بزرگ تشریح نمودند. این مثال‌ها عبارتند از: فرآیندهای انتقال گاز در پایین دست مدل یک سرریز، انتقال بچ در مدل محل تلاقی دو رودخانه و جریان در دشت سیلابی یک رودخانه. نهایتاً آن‌ها LSPIV را به‌عنوان یک ابزار قابل اعتماد، انعطاف پذیر و اقتصادی برای تشخیص جریان معرفی نمودند.

Weitbrecht et al. (2002) از PIV سطحی یا همان LSPIV برای اندازه‌گیری دینامیک جریان در سطح جریان‌های کم‌عمق بهره‌گیری کردند. آن‌ها با استفاده از داده‌های به دست آمده از LSPIV شرایط متوسط جریان، ویژگی‌های اغتشاشی جریان و گردابه‌های مربوط به ساختارهای منسجم دو بعدی (Coherent Structures) را مورد بررسی قرار دادند. توجیه ارائه شده در این تحقیق آن بود که از آنجا که پروسه‌های غالب در جریان‌های کم‌عمق عمدتاً دو بعدی هستند و مقیاس‌های افقی جریان بسیار بزرگتر از مقیاس‌های عمودی می‌باشند، رفتار کلی جریان را می‌توان با استفاده از سرعت‌های سطحی تحلیل کرد. در پایان نیز آن‌ها عنوان نمودند که این روش با اندازه‌گیری‌های سطحی به‌خوبی می‌تواند رفتار و الگوی جریان را نمایش دهد.

هم‌چنین از LSPIV برای مطالعه الگوی متوسط زمانی جریان سطحی و تغییرات آن در اثر پارامترهای مختلف بهره‌گیری شده است (Sutarto, Kantoush et al., 2011, Bieri et al., 2009). طی سال‌های اخیر و با عنایت به افزایش سرعت تصویربرداری از حیث تعداد تصویر در واحد زمان (fps) (بعضاً تا چند هزار فریم در ثانیه) امکان استفاده از LSPIV برای مطالعه توربولنس در سطح جریان نیز فراهم آمده است که از جمله مطالعه‌های انجام شده در این خصوص می‌توان به Gulliver and Orlins (2000)، Albayrak و Lemmin (2007) و Fox و Patrick (2008) اشاره نمود.

تاکنون تحقیقات متعددی نیز برای بررسی قابلیت بهره‌برداری از LSPIV برای اندازه‌گیری دبی صورت پذیرفته است

مواد و روش‌ها

تجهیزات آزمایشگاهی

اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک انستیتو مهندسی هیدرولیک و مدیریت منابع آب دانشگاه صنعتی گراتز (TU Graz) کشور اتریش انجام شد. برای این منظور از یک فلوم شیب‌پذیر به طول پنج متر و عرض ۰/۵۵ متر استفاده گردید (شکل ۱-الف). ذرات کروی شکل شیشه‌ای هم‌اندازه به قطر ۱۶ میلی‌متر و وزن مخصوص ۲/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب برای مدل‌سازی ایده‌آل بستر شنی آبراهه‌های با شیب تند مورد استفاده قرار گرفتند. بدین ترتیب که ابتدا ذرات به‌وسیله سایش با ماسه برای افزایش قابلیت رنگ‌پذیری زیر شدند و سپس یک لایه از آن‌ها با استفاده از چسب سیلیکون بر روی صفحات پلکسی گلاس چسبانده شد به‌طوری که ذرات در داخل یکدیگر قفل شدند (شکل ۱-ب) که این نوع چیدمان ذرات منجر به ایجاد تخلخلی معادل ۰/۲۴ می‌شود. برای آرام و خطی‌سازی جریان شبکه‌ای متشکل از آجرهای متخلخل در ورودی فلوم نصب گردید. جریان به کمک یک پمپ سانتریفیوژ با حداکثر دبی ۲۵۰ لیتر بر ثانیه در سیستم گردش می‌کرد. دبی جریان با استفاده از یک فلومتر مغناطیسی-القایی با دقت $\pm 0/2\%$ درصد اندازه‌گیری می‌شد. برای توزیع یکنواخت و همگن ذرات ردیاب بر روی سطح جریان یک دستگاه ردیاب‌پاش (Tracer Dispenser) مجهز به یک الکتروموتور با فرکانس لرزش ۶۰ هرتز طراحی و ساخته شد (شکل ۱-ج). نرخ لرزش دستگاه در هر آزمایش متناسب با سرعت جریان تغییر داده می‌شد.

اندازه‌گیری سرعت جریان

برای اندازه‌گیری میدان دوبعدی سرعت بر روی سطح جریان از روش LSPIV استفاده شد که در حقیقت نسخه‌ای از روش متداول PIV می‌باشد که در آن استفاده از نور لیزر برای قابل رویت نمودن صفحه اندازه‌گیری حذف شده است. هم‌چنین در LSPIV برخلاف PIV که از ذرات بسیار کوچک در حد میکرون به‌عنوان ردیاب استفاده می‌شود از ذرات درشت‌تری در حد میلی‌متر استفاده می‌گردد که موارد فوق موجب به مراتب ساده‌تر شدن روش LSPIV می‌شوند. همان‌طور که گفته شد در LSPIV نیازی به استفاده از نور لیزر نمی‌باشد و از نورهای محیطی معمولی مثل پرژکتورها برای نورپردازی صفحه اندازه‌گیری بهره‌گیری می‌شود. علی‌رغم ساده‌سازی‌های فوق‌الذکر بهره‌گیری از LSPIV همچنان خیلی هم ساده نخواهد بود. برای مثال فرآیند ردیابی جریان به‌ویژه در کاربردهای میدانی ممکن است با مشکلاتی نظیر عدم وجود ردیاب به میزان کافی، توزیع غیریکنواخت ردیاب روی سطح جریان و به هم چسبیدن ذرات ردیاب مواجه گردد.

همان‌طور که پیشتر اشاره شد در این تحقیق برای اندازه‌گیری سرعت سطح جریان از روش سرعت‌سنجی بزرگ مقیاس تصویری ذرات (LSPIV) بهره‌گیری شد. روش‌های سرعت‌سنجی مبتنی بر تصویربرداری عمدتاً دارای اجزایی بدین شرح هستند:

۱- دوربین تصویربرداری ۲- نورپردازی (Illumination)
۳- ردیاب‌ها (Tracer) به‌منظور قابل رویت نمودن جریان ۴- رایانه و نرم‌افزار لازم برای پردازش تصاویر و استخراج میدان سرعت. در ادامه اجزای سیستم LSPIV استفاده شده در این مطالعه تشریح می‌گردند. تصویربرداری با استفاده از یک دستگاه دوربین CCD مدل 1.1 Photron Fastcam با حافظه داخلی هشت گیگابایت و قابلیت ضبط تصاویر با فرکانس ۵۴۰۰ فریم بر ثانیه (در حالت رزولوشن کامل) انجام شد. به‌منظور نوردهی به صفحه اندازه‌گیری از چهار عدد پرژکتور LED ۵۰ وات استفاده گردید.

موضوع مهم دیگر انتخاب جنس ذرات ردیاب است. ردیاب‌ها باید از جنسی باشند که: ۱- قدری سبکتر از آب باشند به‌طوری‌که بر روی سطح آب شناور بمانند، ۲- آنقدر سبک نباشند که تحت تأثیر نیروی باد قرار گیرند. در این خصوص Weitbrecht et al (2002) مواد مختلف از جمله چوب، رس، پلی‌استایرن، پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن را مورد بررسی قرار دادند و در نهایت به این نتیجه رسیدند که پلی‌پروپیلن به لحاظ دوام، صرفه اقتصادی و جلوگیری از به هم چسبیدن بهترین انتخاب خواهد بود. لذا در این مطالعه از ذرات عدسی شکل پلی‌پروپیلن با قطر ۴/۵ میلی‌متر و چگالی ۹۴۶ کیلوگرم بر متر مکعب استفاده شد که به‌منظور جلوگیری از بهم چسبیدن آن‌ها در اثر نیروی الکترواستاتیکی، ذرات با یک لایه رنگ سفید پوشانده شدند. این امر در کنار رنگ ذرات بستر که با اسپری، مشکی شدند باعث تفکیک رنگ بهتر به منظور تشخیص راحت تر ردیاب‌ها نیز می‌گردد. در پایان هر آزمایش ذرات ردیاب در انتهای فلوم با استفاده از یک توری جمع شده و برای استفاده در آزمایش بعدی خشک می‌شدند. در جدول (۱) مشخصات سیستم LSPIV استفاده شده در این تحقیق به‌طور یکجا قابل ملاحظه می‌باشد.

Raffel et al (2007) نشان دادند که میزان تراکم ذرات ردیاب روی دقت اندازه‌گیری مؤثر است. آزمایش‌های آن‌ها با میزان تراکم‌های مختلف مشخص نمود که تعداد ذرات در هر ناحیه بررسی باید بیشتر از پنج عدد باشد که دستگاه ردیاب‌پاش مورد استفاده در این تحقیق این شرط را تامین می‌نماید.

در این تحقیق برای پردازش تصاویر از ابزاری موسوم به PIVlab که در MATLAB توسعه داده شده است استفاده گردید Thielicke و Stamius (2014). PIVlab و اغلب بسته‌های نرم‌افزاری مربوط به PIV مبتنی بر الگوریتم انطباق ضربی (Cross Correlation) دو تصویر متوالی می‌باشند. به گونه‌ای که ابتدا تصاویر به تعدادی ناحیه بررسی (Interrogation Area) تقسیم می‌شوند. از آنجا که این الگوریتم در حقیقت بر اساس تشخیص الگوهای شکل گرفته توسط ذرات ردیاب در هر ناحیه بررسی استوار است، برای هر دو تصویر متوالی ضرب انطباق هر ناحیه بررسی در تصویر اول با نواحی بررسی مجاور در محدوده‌ای مشخص در تصویر دوم برای تشخیص الگوی مورد نظر با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

۰ تا ۲۵۵ برای یک تصویر هشت بیتی) در هر پیکسل به ترتیب در تصویر اول و دوم و خط افقی روی پارامترها نشان دهنده مقادیر میانگین شدت برای هر ناحیه بررسی هستند.

$$R_{ab} = \frac{\sum_{i=1}^{MX} \sum_{j=1}^{MY} \{(a_{ij} - \bar{a}_{ij})(b_{ij} - \bar{b}_{ij})\}}{\{\sum_{i=1}^{MX} \sum_{j=1}^{MY} (a_{ij} - \bar{a}_{ij})^2 \sum_{i=1}^{MX} \sum_{j=1}^{MY} (b_{ij} - \bar{b}_{ij})^2\}^{1/2}} \quad (1)$$

در رابطه (۱) MY و MX اندازه نواحی بررسی (بر حسب پیکسل)، a_{xy} و b_{xy} مقادیر توزیع شدت سطح خاکستری (متغیر از

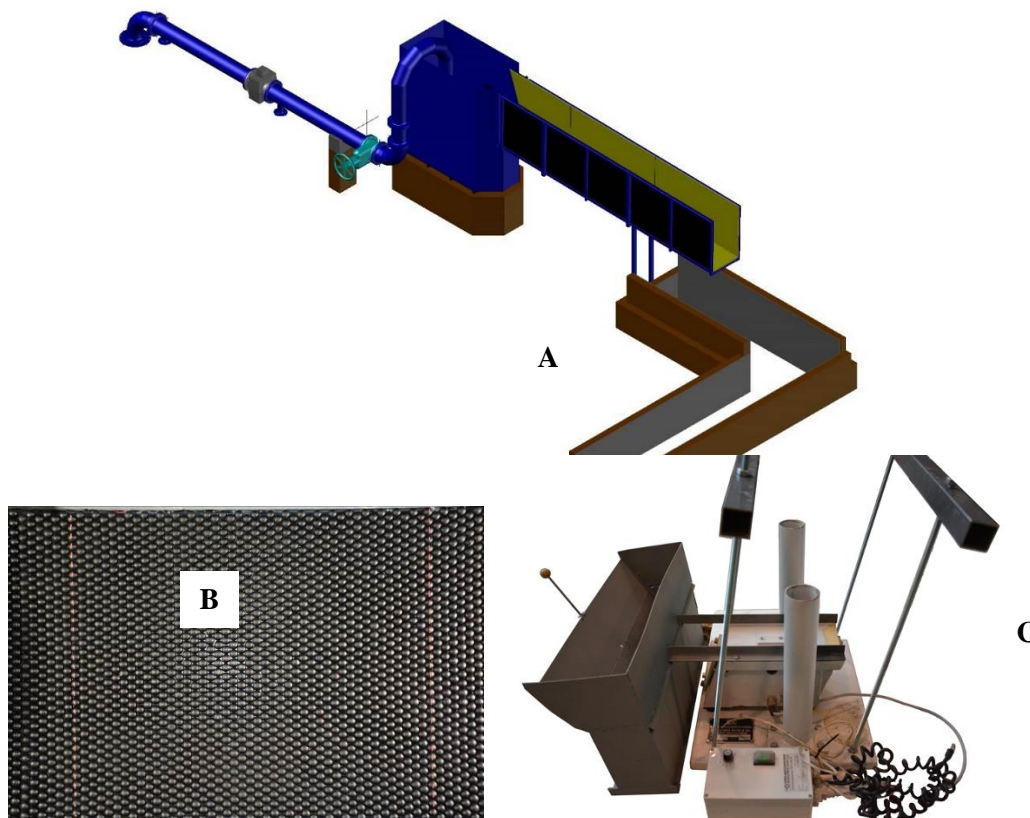


Fig. 1-a) Schematic of the experimental flume, b) glass particles used to ideally model the gravel bed, c) the seeding machine

شکل ۱- الف) شمای کلی فلوم آزمایشگاهی، ب) ذرات شیشه‌ای استفاده شده برای مدل سازی ایده آل بستر شنی، ج) دستگاه ردیاب پاش

جدول ۱- پارامترهای سیستم LSPIV به کار گرفته شده

Table 1- Characteristics of the utilized LSPIV system

| Camera | Illumination | Tracer particles | Final size of IA | overlap | Imaging frequency | Total number of images | Dimensions of measurement plane | Pixel size |
|-----------------------|--------------------------|---|------------------|------------|-------------------|------------------------|---------------------------------|------------|
| Photron Fastcam SA1.1 | four 50-w LED projectors | 4.5-mm diameter polypropylene with density of 946 kg/m ³ | 32×32 pixel | 50 percent | 125 fps | 7500 | 990×860 pixel | 0.63 mm |

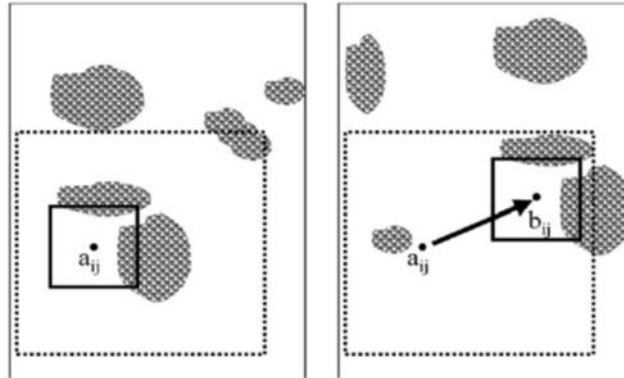


Fig. 2- Schematic illustration of algorithm utilized for detection of tracers' displacement (small square Interrogation area and large squares Search Area)

شکل ۲- نمایش تصویری الگوریتم انطباق ضربدری مورد استفاده برای تشخیص جابجایی ذرات ردباب (مربع‌های کوچک ناحیه بررسی و مربع‌های بزرگ منطقه جستجو)

که در آن H_e عمق مؤثر، H_a عمق ظاهری (فاصله سطح آب تا تاج المان‌های زبری) و d_{65} اندازه‌ای از ذرات بستر است که ۶۵ درصد ذرات از آن کوچکترند. Manes et al. (2007) نیز که یک لایه ذرات کروی شیشه‌ای (به قطر d_b) را به عنوان ذرات بستر بکار بردند تراز وسط ذرات کروی را مبنای محاسبه عمق گرفتند؛ بدین ترتیب که:

$$H_e = H_a + 0.5d_b \quad (۳)$$

در این مطالعه شرایط ذرات بستر مشابه تحقیق صورت گرفته توسط Manes et al. (2007) بود با این تفاوت که برای ثابت کردن ذرات کروی بستر از چسب سیلیکون استفاده گردید که بخش تحتانی لایه زبری را مسدود نمود. لذا از رابطه زیر به منظور تعیین عمق مؤثر برای محاسبه پارامترهای هیدرولیکی بهره‌گیری شد:

$$H_e = H_a + 0.25d_b \quad (۴)$$

با توجه به اینکه ذرات بستر دارای قطر شانزده میلی‌متر بودند برای تعیین عمق مؤثر در آزمایش‌های مختلف چهار میلی‌متر به عمق فیزیکی افزوده شد. در شکل (۳) مفاهیم عمق ظاهری و عمق مؤثر بصورت تصویری تشریح شده‌اند.

در هر آزمایش تصویربرداری به مدت ۶۰ ثانیه با فرکانس ۱۲۵ فریم بر ثانیه صورت پذیرفت که در مجموع تعداد تصاویر ضبط شده معادل ۷۵۰۰ تصویر بود. سپس تصاویر ضبط شده با استفاده از PIVlab تحلیل و میدان سرعت برای همه تصاویر به دست آمد. فرآیند تحلیل تصاویر شامل پیش‌پردازش، پردازش و پس‌پردازش می‌شود. در پیش‌پردازش ابتدا محدوده مطلوب (Region of Interest) به ابعاد 990×860 پیکسل از تصاویر اصلی بریده شده (مستطیل مشخص شده با خط چین روی شکل (۴)) و بعد تصاویر با ابزارهایی برای پردازش بهتر تقویت و تشدید می‌شوند.

روش انجام آزمایش‌ها

عمق جریان از ۲۳ تا ۷۵ میلی‌متر تغییر داده شد که این به منزله میزان استغراق نسبی (H/d_b) معادل ۱/۴ تا ۴/۹ می‌باشد که در محدوده زبری درشت مقیاس که معمولاً در رودخانه‌های پرشیب وجود دارد قابل طبقه‌بندی می‌باشد (H عمق جریان و d_b قطر ذرات بستر). شیب‌های استفاده شده نیز معادل دو، شش و ۱۰ درصد بودند که اغلب در آبراهه‌های کوهستانی واقع می‌شوند و در این تحقیق منجر به ایجاد جریان‌های فوق‌بحرانی در تمامی آزمایش‌ها به غیر از دو آزمایش ابتدایی در شیب دو درصد گردید. در هر شیب تعداد هشت آزمایش با عمق‌های مختلف و در نتیجه مجموعاً بیست و چهار آزمایش صورت گرفت. اطلاعات مربوط به آزمایش‌های انجام شده در قالب جدول (۲) قابل مشاهده می‌باشد. اعداد فرود و رینولدز مندرج در جدول (۲) با استفاده از سرعت متوسط مقطع (U_m) و عمق مؤثر جریان (H_e) محاسبه شده‌اند.

برای دسته‌بندی آزمایش‌های انجام شده به منظور تسهیل بررسی نتایج به هر یک از آزمایش‌های انجام شده یک کد اختصاص داده شد؛ بدین ترتیب که عدد بعد از حرف S نشان دهنده شیب فلوم و عدد بعد از حرف H مشخص کننده عمق جریان می‌باشد. برای اندازه‌گیری عمق جریان و حصول اطمینان از یکنواخت بودن جریان چند خط کش با درجه‌بندی میلی‌متر در طول فلوم نصب شدند. اما این سوال پیش می‌آید که برای محاسبه پارامترهای هیدرولیکی جریان بایستی چه عمقی مبنای کار قرار گیرد. در این خصوص به بررسی چند مطالعه با شرایط تقریباً مشابه آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق پرداخته شد. به عنوان مثال Pagliara et al (2008) که از ذرات طبیعی به عنوان المان‌های زبری استفاده نمودند، برای تعیین عمق مؤثر از رابطه زیر استفاده کردند:

$$H_e = H_a + 0.2d_{65} \quad (۲)$$

جدول ۲- مشخصات و پارامترهای مربوط به آزمایش‌های انجام شده

Table 2- The experiments parameters and characteristics

| Experiment Code | Discharge (l/s) | Slope (%) | Effective depth (mm) | Cross sectional mean velocity (m/s) | Fr | Re | Double-averaged surface velocity (m/s) | Velocity Index (VI) | |
|-----------------|-----------------|-----------|----------------------|-------------------------------------|------|--------|--|---------------------|------|
| S2H23* | 6.4 | 2 | 27 | 0.43 | 0.85 | 11636 | 0.71 | 0.61 | |
| S2H30* | 10.4 | | 34 | 0.56 | 0.96 | 18909 | 0.83 | 0.67 | |
| S2H38 | 15.3 | | 42 | 0.66 | 1.03 | 27818 | 0.96 | 0.69 | |
| S2H40 | 17 | | 44 | 0.7 | 1.07 | 30909 | 0.99 | 0.71 | |
| S2H45 | 20.7 | | 49 | 0.77 | 1.11 | 37636 | 1.06 | 0.73 | |
| S2H50 | 24.5 | | 54 | 0.82 | 1.13 | 44545 | 1.08 | 0.76 | |
| S2H60 | 32.7 | | 64 | 0.93 | 1.17 | 59454 | 1.21 | 0.77 | |
| S2H75 | 46 | | 79 | 1.06 | 1.2 | 83636 | 1.35 | 0.78 | |
| S6H23 | 10.2 | | 6 | 27 | 0.69 | 1.35 | 18545 | 1.07 | 0.65 |
| S6H30 | 16 | | | 34 | 0.86 | 1.48 | 29090 | 1.29 | 0.67 |
| S6H38 | 23.1 | 42 | | 1 | 1.56 | 42000 | 1.48 | 0.68 | |
| S6H40 | 25.4 | 44 | | 1.05 | 1.6 | 46181 | 1.54 | 0.68 | |
| S6H45 | 30.2 | 49 | | 1.12 | 1.62 | 54909 | 1.61 | 0.7 | |
| S6H50 | 36.3 | 54 | | 1.22 | 1.68 | 66000 | 1.77 | 0.69 | |
| S6H60 | 47 | 64 | | 1.34 | 1.69 | 85454 | 1.89 | 0.71 | |
| S6H75 | 67.3 | 79 | | 1.55 | 1.76 | 122363 | 2.07 | 0.75 | |
| S10H23 | 12.7 | 10 | | 27 | 0.86 | 1.68 | 23090 | 1.34 | 0.64 |
| S10H30 | 19 | | | 34 | 1.02 | 1.76 | 34545 | 1.49 | 0.68 |
| S10H38 | 28.8 | | 42 | 1.25 | 1.94 | 52363 | 1.79 | 0.7 | |
| S10H40 | 31.5 | | 44 | 1.3 | 1.98 | 57272 | 1.82 | 0.71 | |
| S10H45 | 37.4 | | 49 | 1.45 | 2.09 | 71090 | 2.07 | 0.7 | |
| S10H50 | 45.8 | | 54 | 1.54 | 2.12 | 83272 | 2.18 | 0.71 | |
| S10H60 | 60.6 | | 64 | 1.72 | 2.17 | 110181 | 2.39 | 0.72 | |
| S10H75 | 83.8 | | 79 | 1.93 | 2.19 | 152363 | 2.55 | 0.76 | |

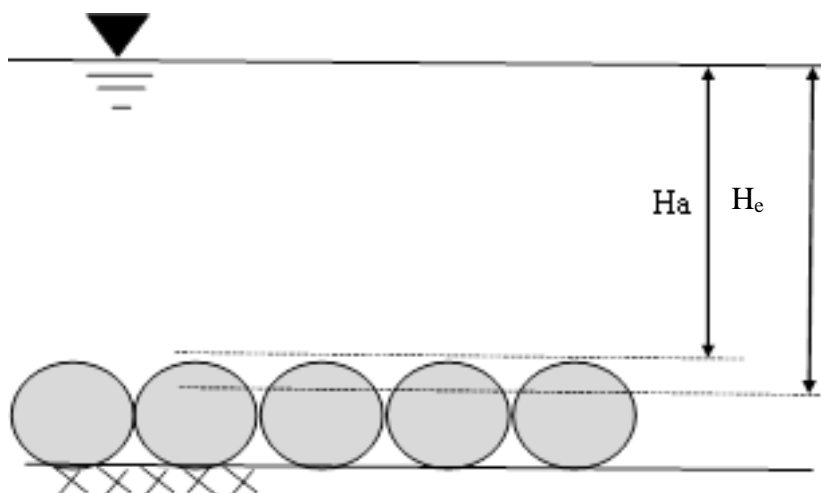


Fig. 3 Description of apparent and effective depth.

شکل ۳- تعریف عمق ظاهری و عمق موثر

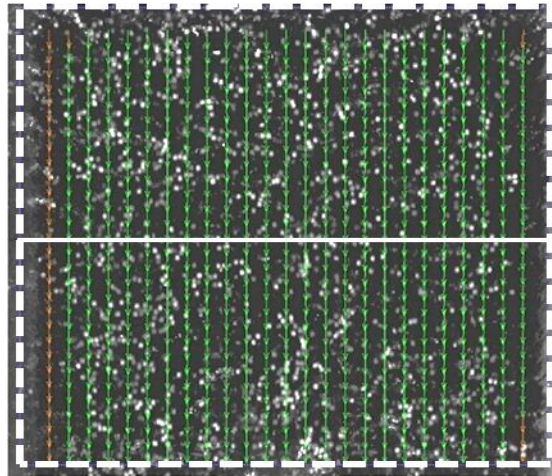


Fig 4- Time-averaged surface velocity vector field for the experiment S10H50.
شکل ۴- میدان بردارهای سرعت متوسط زمانی سطحی برای آزمایش S10H50

همان طور که مشاهده می شود در عمق ۲۳ میلی متر که معادل استغراق نسبی $1/68$ می باشد تنها یک ناحیه با سرعت بالاتر تقریباً در قسمت میانی وجود دارد و با افزایش عمق جریان که متناظر با افزایش استغراق نسبی می باشد دو نوار دارای سرعت بالاتر تشکیل می گردد که به وسیله رگه های با سرعت کمتر احاطه شده اند. الگوی جریان به دست آمده حکایت از وجود ساختارهای توربولنس سطح آزاد در آزمایش های انجام شده دارد. Albayrak و Lemmin (2011) پیشنهاد دادند که تعداد نوارهای پایین جوش بر روی سطح آزاد نزدیکترین عدد صحیح زوج به حاصل تقسیم $(\frac{B/H}{2 \rightarrow 3})$ و تعداد نوارهای بالا جوش نزدیکترین عدد صحیح فرد به $1 + (\frac{B/H}{2 \rightarrow 3})$ خواهد بود که در این روابط B عرض و H عمق جریان می باشد. بر این اساس با افزایش نسبت ابعاد و در واقع با کاهش عمق بر تعداد نواحی بالا جوش و پایین جوش افزوده می شود. اما نتایج به دست آمده در این تحقیق حاکی از آن است که تغییرات نسبت ابعاد در شیب های مختلف تأثیری روی تعداد نوارها ندارد و در تمامی آزمایش ها شاهد ایجاد سه ناحیه با سرعت کمتر و دو ناحیه با سرعت بیشتر هستیم.

هم چنین فاصله بین نوارهای با سرعت مشابه در منابع از جمله Gulliver و Tamburrino (2007) معادل دو برابر عمق جریان ($\ell=2H$) عنوان شده است که در این تحقیق این فاصله در اغلب آزمایش ها در حدود چهار برابر عمق ($\ell=4H$) به دست آمد.

شاید بتوان این تفاوت ها را به رژیم جریان در آزمایش های انجام شده در این تحقیق که به شدت فوق بحرانی است و آزمایش های تحقیق صدرالاشاره که زیر بحرانی می باشند نسبت داد. هر چند که نتیجه گیری دقیق تر در خصوص ساختارهای سطحی جریان های فوق بحرانی نیازمند انجام بررسی های تفصیلی خواهد بود.

برای مقایسه الگوی متوسط زمانی و لحظه ای جریان، در شکل (۶) پروفیل های سرعت متوسط زمانی و لحظه ای (یکی از 7500 میدان سرعت) سطح جریان برای آزمایش S10H50 نشان داده

بدین ترتیب با توجه به ابعاد فیزیکی صفحه اندازه گیری که 617×550 میلی متر مربع می باشد اندازه هر پیکسل معادل 0.63 میلی متر خواهد بود. در مرحله بعد تصاویر با معرفی فاصله ای مشخص (بین دو خط کشیده شده روی بستر) به نرم افزار کالیبره می گردند. سپس تنظیمات مربوط به تحلیل تصاویر معرفی می گردد. در این مطالعه از روش انطباق ضربدردی چندمسیره مبتنی بر تبدیل سریع فوریه (Fast Fourier Transform, FFT) استفاده شد که در آن ابتدا تحلیل با یک ناحیه بررسی بزرگ (256×256 پیکسل) آغاز و نتایج برای نواحی کوچکتر (نهایتاً 32×32 پیکسل) استفاده و بردارهای سرعت برای هر ناحیه بررسی به دست می آیند. نهایتاً در مرحله پس پردازش بردارهای بد (Bad Vectors) با استفاده از تعیین مقادیر حداقل و حداکثر سرعت قابل قبول برای هر آزمایش حذف و میدان های سرعت به دست می آیند.

نتایج و بحث

الگوی جریان سطحی

برای هر آزمایش برای مطالعه الگوی سطحی جریان و همچنین محاسبه شاخص سرعت، میانگین 500 نقشه میدان سرعت محاسبه شده و یک نقشه میدان سرعت متوسط زمانی به دست می آید. در شکل (۴) میدان بردارهای سرعت متوسط زمانی برای آزمایش S10H50 نمایش داده شده است. همان طور که ملاحظه می شود بردارهای سرعت به دلیل شیب بالای فلوم همگی کاملاً در جهت جریان بوده و هیچ یک از بردارها به سایر جهات منحرف نشده اند که این امر نشان دهنده آن است که بزرگی سرعت طولی جریان به مراتب بیشتر از سرعت عرضی آن است. در شکل مذکور همچنین ذرات سفید رنگ ردیاب قابل رویت می باشند. در شکل (۵) به عنوان نمونه نقشه سرعت متوسط زمانی سطحی برای شیب 10 درصد و برای سه حالت استغراق نسبی مختلف قابل ملاحظه می باشد.

$$VI = \frac{U_m}{(\bar{U}_s)} \quad (5)$$

در این مطالعه با داشتن دبی ثابت شده توسط فلومتر موجود و عمق جریان، سرعت متوسط مقطع (U_m) قابل محاسبه است. سرعت متوسط سطحی نیز در هر آزمایش در واقع سرعت متوسط دوگانه می باشد. به طوریکه ابتدا متوسط زمانی هر ۷۵۰۰ میدان سرعت محاسبه و یک میدان سرعت متوسط زمانی به دست می آید و سپس متوسط گیری مکانی روی آن انجام شده و یک عدد که در واقع سرعت سطحی متوسط زمانی-مکانی می باشد ($\langle \bar{U}_s \rangle$) حاصل می گردد.

شده اند. مطابق مطالبی که ذکر شد مشاهده می شود که پروفیل سرعت متوسط دارای دو نقطه اوج با فاصله تقریباً ۲۰ سانتی متر است که معادل ($l=4H$) می باشد. پروفیل سرعت لحظه ای اما دارای فراز و فرودهای بیشتری است که نشان دهنده نوسانات مکانی سرعت سطحی است که می تواند موضوع تحقیقات آینده باشد.

شاخص سرعت

همان طور که پیشتر نیز اشاره گردید شاخص سرعت، نسبت سرعت متوسط مقطع به سرعت متوسط سطح جریان می باشد که می توان آن را با استفاده از رابطه زیر نشان داد:

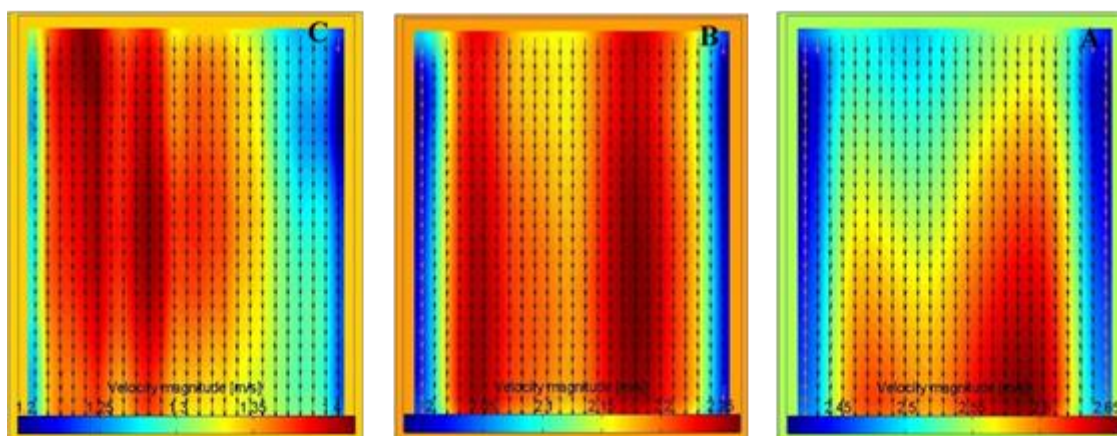


Fig. 5-Time-averaged velocity maps for the experiments a) S10H23, b) S10H50 and c) S10H75 with relative submergence of 1.68, 3.38 and 4.94 respectively (flow direction downward)

شکل ۵- نقشه های سرعت متوسط زمانی برای آزمایشهای الف) S10H23، ب) S10H50 و ج) S10H75 با استغراق های نسبی به ترتیب معادل ۱/۶۸، ۳/۳۸ و ۴/۹۴ (جهت جریان از بالا به پایین)

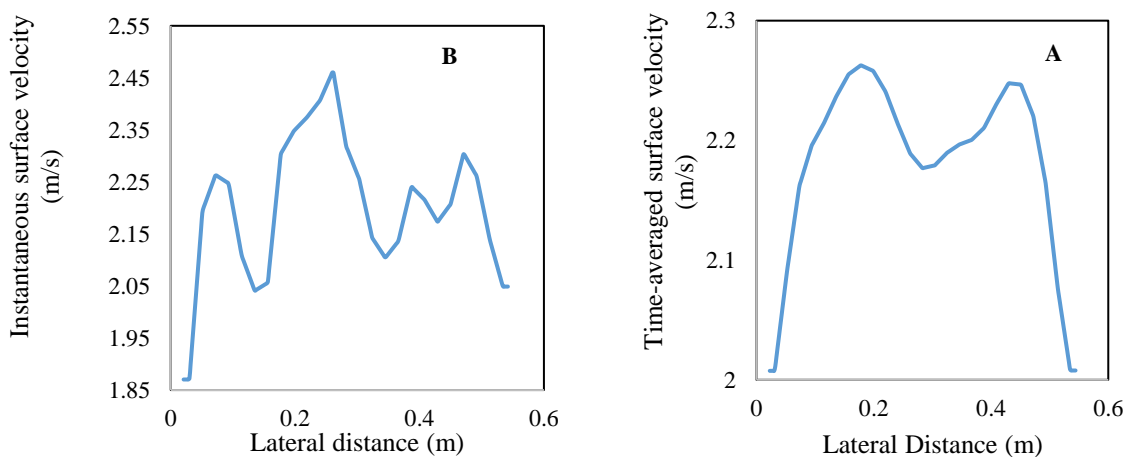


Fig. 6- a) Time-averaged b) Instantaneous surface velocity profiles for the experiment S10H50
شکل ۶- پروفیل سرعت الف) متوسط زمانی ب) لحظه ای سطح جریان برای آزمایش S10H50

دو درصد از شیب‌های شش و ده درصد بیشتر است ولی مقادیر شاخص سرعت در شیب‌های شش و ده درصد تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند. به‌منظور برقراری ارتباط بین میزان استغراق نسبی و شاخص سرعت از روش رگرسیون گیری استفاده گردید که بر این اساس این ارتباط به بهترین شکل با استفاده از روابط توانی زیر به ترتیب برای شیب‌های دو، شش و ۱۰ درصد قابل بیان خواهد بود:

$$VI = 0.552 \left(\frac{H_e}{D_b}\right)^{0.2395} \quad (۶)$$

$$VI = 0.599 \left(\frac{H_e}{D_b}\right)^{0.128} \quad (۷)$$

$$VI = 0.605 \left(\frac{H_e}{D_b}\right)^{0.137} \quad (۸)$$

ضریب همبستگی روابط فوق به‌ترتیب عبارت است از: ۰/۹۴، ۰/۹۴ و ۰/۹ که نشان دهنده انطباق خیلی خوب آن‌ها با داده‌های مشاهداتی می‌باشد. به‌منظور استخراج رابطه‌ای کلی که بتوان با داشتن استغراق نسبی جریان روی شیب تند (بیش از دو درصد) در آبراهه‌های با بستر شنی مقدار شاخص سرعت را برآورد نمود، بار دیگر رگرسیون‌گیری بدون لحاظ شیب آبراهه صورت پذیرفته و منجر به بدست آمدن رابطه زیر گردید (شکل ۷-ب):

$$VI = 0.585 \left(\frac{H_e}{D_b}\right)^{0.168} \quad (۹)$$

بدین ترتیب با استفاده از رابطه (۹) که دارای ضریب همبستگی ۰/۸ می‌باشد با اندازه‌گیری سرعت سطحی و با داشتن میزان استغراق نسبی جریان می‌توان به سرعت متوسط و متعاقباً دبی جریان در شرایط توضیح داده شده دست یافت.

صحت‌سنجی روش پیشنهادی

به منظور حصول اطمینان از روش پیشنهادی دبی جریان برای آزمایش‌های مختلف از طریق رابطه زیر محاسبه و با مقادیر دبی اندازه‌گیری شده مقایسه شدند:

$$Q_{calc} = BH_e \langle \bar{U}_s \rangle VI \quad (۱۰)$$

که نتایج حاصل از آن در جدول (۳) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود اختلاف دبی‌های محاسبه شده با دبی‌های مشاهداتی بین ۰/۲ درصد تا شش درصد متغیر می‌باشد که حاکی از دقت بالای روش ارائه شده برای اندازه‌گیری دبی می‌باشد.

در رویدادهای مندرج در جدول (۴) d_{50} به‌عنوان قطر مشخصه ذرات بستر یا همان d_b منظور شده است. سرعت سطحی U_s نیز با استفاده از روش SVR اندازه‌گیری گردیده است. شاخص سرعت با استفاده از رابطه (۹) و دبی محاسباتی با استفاده از رابطه (۱۰) به‌دست آمده است. نکته جالب توجه این است که در رویدادهایی

مقادیر سرعت متوسط مقطع، سرعت متوسط سطحی و شاخص سرعت برای آزمایش‌های مختلف در جدول (۲) قابل ملاحظه می‌باشند. همان‌طور که در مقدمه اشاره گردید در اغلب منابع مقدار شاخص سرعت برای رودخانه‌ها و همچنین شرایط آزمایشگاهی معادل ۰/۸۵ عنوان شده است که نتایج حاضر نشان می‌دهد که نمی‌توان تحت شرایط مختلف به صحت این مقدار به‌عنوان شاخص سرعت اعتماد نمود؛ چرا که این عدد در آبراهه‌های خیلی صاف منجر به پایین تخمین زدن دبی و در آبراهه‌های زیر موجب دست بالا تخمین زدن دبی می‌گردد. به‌عبارت دیگر برای برآورد صحیح دبی در آبراهه‌های زیر مقدار شاخص سرعت بایستی کمتر از ۰/۸۵ باشد. شاخص‌های سرعت به‌دست آمده در این تحقیق در محدوده ۰/۶۱۲ تا ۰/۷۸۴ با مقدار متوسط ۰/۷۰۱ هستند که این مقدار متوسط با مقدار متداول ۰/۸۵ حدود ۱۷ درصد اختلاف دارد. توجه به این موضوع ضروری است که عدد ۰/۸۵ برای کانال‌های عمیق و به‌لحاظ هیدرولیکی صاف که می‌توان پروفیل سرعت را در آنها لگاریتمی فرض نمود پیشنهاد شده است (Welber et al (2016) که در این تحقیق این شرایط حاکم نیست. نکته دیگر تفاوت رژیم جریان در آزمایش‌های این تحقیق که فوق‌بحرانی بودند و آزمایش‌های مطالعه‌های پیشین که در آن‌ها جریان زیر بحرانی بوده است می‌باشد که شاید بتوان اختلاف شاخص‌های سرعت به‌دست آمده با مقدار ۰/۸۵ را به آن نیز نسبت داد. نکته مهم دیگر در خصوص مقادیر به‌دست آمده برای شاخص سرعت این است که همگی آن‌ها کمتر از یک هستند که این نشان می‌دهد که سرعت سطح جریان در آن‌ها همواره بیشتر از سرعت متوسط مقطع بوده است که بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که میزان جریان‌های ثانویه قابل توجه نبوده‌اند.

با توجه به اینکه مقدار استاندارد شاخص سرعت ۰/۸۵ تنها برای آبراهه‌های بلحاظ هیدرولیکی صاف قابل پذیرش است، برقراری ارتباط بین این شاخص و مشخصه‌های اصلی جریان در شرایط این تحقیق که مشابه آبراهه‌های با بستر شنی می‌باشد راهگشا بنظر می‌رسد. Polatel (2006) مقدار شاخص سرعت را به پارامترهایی شامل زبری بستر، استغراق نسبی یا نسبت ابعاد و رژیم جریان مربوط دانست. لذا با توجه به اینکه اکثریت قریب به اتفاق آزمایش‌های این تحقیق دارای رژیم فوق‌بحرانی هستند و زبری بستر نیز ثابت و بدون تغییر می‌باشد سعی شد رابطه‌ای بین این شاخص و استغراق نسبی برقرار گردد.

در شکل (۷-الف) نمودار مربوط به تغییرات شاخص سرعت در مقابل استغراق نسبی برای شیب‌های مختلف قابل ملاحظه می‌باشد. مشخصاً میزان شاخص سرعت در شیب‌های مختلف با افزایش استغراق نسبی افزایش می‌یابد که این موضوع نشان دهنده آن است که با کاهش عمق جریان اختلاف بین سرعت متوسط و سرعت سطحی افزایش می‌یابد. دلیل این امر آن است که با کاهش استغراق نسبی مقاومت جریان افزایش و مقدار سرعت متوسط بطور نسبی کاهش می‌یابد. قابل ذکر است که مقادیر شاخص سرعت در شیب

استغراق نسبی بین ۱/۵ تا پنج باشد قابل کاربرد است. همچنین ملاحظه می شود که شیب های آبراهه های مورد نظر همگی کمتر از محدوده شیب های این تحقیق هستند که این امر حاکی از آن است که شیب مجرا تأثیر چندانی روی شاخص سرعت ندارد.

که در آنها استغراق نسبی در محدوده مورد استفاده در تحقیق حاضر قرار داشته (در جدول (۴) هایلایت شده اند) دبی های به دست آمده با استفاده از روش پیشنهادی با دبی های اندازه گیری اختلاف کمی دارند. لذا این نتیجه حاصل می شود که رابطه پیشنهادی برای محاسبه شاخص سرعت برای شرایط صحرائی نیز مادامی که

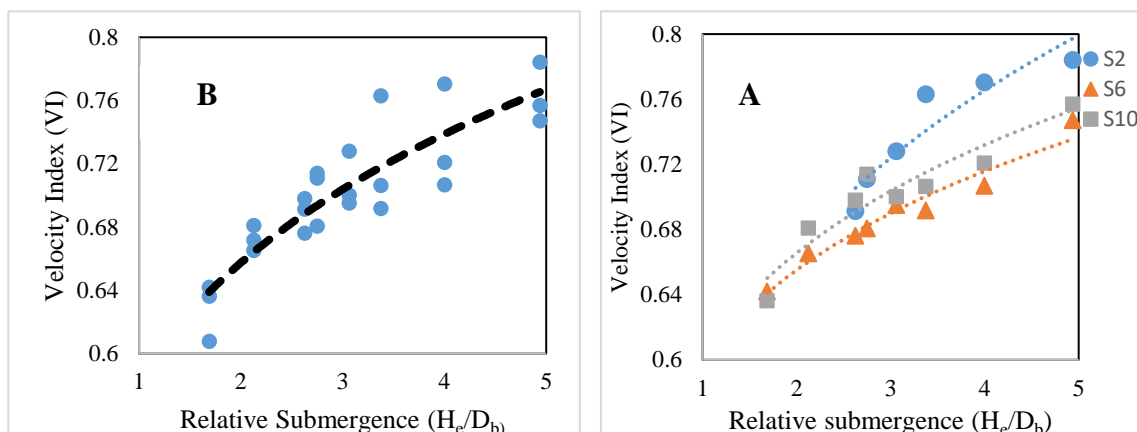


Fig. 7- Velocity Index variations against a) relative submergence for the slopes 2, 6 and 10 %, b) overall relative submergence

شکل ۷- نمودار تغییرات شاخص سرعت در مقابل الف) استغراق نسبی برای شیب های ۲، ۶ و ۱۰ درصد ب) استغراق نسبی به صورت کلی

Table 3- Comparison of the observed against calculated discharges

جدول ۳- مقایسه دبی های محاسبه شده با استفاده از روش پیشنهادی با دبی های اندازه گیری

| Experiment code | S2H23 | S2H30 | S2H38 | S2H40 | S2H45 | S2H50 | S2H60 | S2H75 |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Measured Discharge (l/s) | 6.4 | 10.4 | 15.3 | 17.0 | 20.7 | 24.5 | 32.7 | 46.0 |
| Calculated Discharge (l/s) | 6.7 | 10.3 | 14.3 | 16.8 | 20.3 | 23.3 | 31.7 | 45.0 |
| Relative Error (%) | 0.05 | 0.01 | 6.5 | 1.2 | 1.9 | 4.9 | 3.0 | 2.2 |
| Experiment code | S6H23 | S6H30 | S6H38 | S6H40 | S6H45 | S6H50 | S6H60 | S6H75 |
| Measured Discharge (l/s) | 10.2 | 16.0 | 23.1 | 25.4 | 30.2 | 36.3 | 47.0 | 67.3 |
| Calculated Discharge (l/s) | 10.0 | 15.8 | 23.2 | 25.5 | 30.2 | 37.1 | 48.3 | 67.5 |
| Relative Error (%) | 1.9 | 1.2 | 0.4 | 0.4 | 0.0 | 2.2 | 2.7 | 0.3 |
| Experiment code | S10H23 | S10H30 | S10H38 | S10H40 | S10H45 | S10H50 | S10H60 | S10H75 |
| Measured Discharge (l/s) | 12.7 | 19.0 | 28.8 | 31.5 | 39.1 | 45.8 | 60.6 | 83.8 |
| Calculated Discharge (l/s) | 12.4 | 18.0 | 27.6 | 29.8 | 38.3 | 45.2 | 60.2 | 82.0 |
| Relative Error (%) | 2.3 | 5.2 | 4.1 | 5.4 | 2.0 | 1.3 | 0.6 | 2.1 |

جدول ۴- اعتبارسنجی روش پیشنهادی با استفاده از داده‌های صحرائی

Table 4- Validation of the proposed method with field data

| Station | Slope (%) | Bed characteristic diameter (m) | Channel width (m) | Flow depth (m) | Relative submergence | Velocity Index (Eq. 9) | Surface velocity (m) | Calculated discharge (m ³ /s) | Measured discharge (m ³ /s) | Relative error |
|-----------------------|-----------|---------------------------------|-------------------|----------------|----------------------|------------------------|----------------------|--|--|----------------|
| Ein | 2.3 | 0.003 | 1.2 | 0.28 | 93.33 | 1.25 | 0.7 | 0.29 | 0.1 | 1.95 |
| Colle | 0.62 | 0.25 | 7 | 0.46 | 1.84 | 0.65 | 1.41 | 2.94 | 3.1 | 0.05 |
| Pellizzano | 0.4 | 0.1 | 19 | 0.38 | 3.8 | 0.73 | 1.33 | 7.03 | 7.5 | 0.06 |
| Versciaco | 0.5 | 0.15 | 8 | 0.56 | 3.733 | 0.73 | 1.19 | 3.89 | 3.2 | 0.22 |
| Monguelfo | 0.44 | 0.175 | 9 | 0.69 | 3.943 | 0.74 | 1.66 | 7.59 | 8.1 | 0.06 |
| Beyre`de | 0.7 | 0.1 | 17 | 0.75 | 7.5 | 0.82 | 1.36 | 14.23 | 10.4 | 0.37 |
| Taninges La Pernie`re | 0.5 | 0.08 | 33 | 0.6 | 7.5 | 0.82 | 1.96 | 31.85 | 22 | 0.45 |
| Pont de Vence | 0.4 | 0.05 | 11 | 0.4 | 8 | 0.83 | 1.08 | 3.94 | 2.5 | 0.58 |
| Pont Du Giffre | 0.17 | 0.05 | 5.5 | 0.5 | 10 | 0.86 | 1.18 | 2.79 | 2.2 | 0.27 |
| Roquefort | 0.5 | 0.08 | 16 | 1 | 12.5 | 0.89 | 2.85 | 40.78 | 28 | 0.46 |
| Saint Arve | 0.4 | 0.08 | 66 | 0.2 | 15 | 0.92 | 1.26 | 92.01 | 56 | 0.64 |
| Braulins 4 | 0.5 | 0.08 | 35 | 1.5 | 18.75 | 0.96 | 4.7 | 236.2 | 23 | 9.27 |
| Manciuox | 0.75 | 0.055 | 16 | 0.22 | 4 | 0.74 | 1.06 | 2.76 | 2.7 | 0.02 |
| Braulins 3 | 0.3 | 0.01 | 45 | 3 | 300 | 1.53 | 1.23 | 253.25 | 100 | 1.53 |
| | 0.38 | 0.037 | 10 | 0.51 | 13.78 | 0.91 | 1.83 | 8.48 | 7.5 | 0.13 |

نتیجه‌گیری

در این مطالعه برای بررسی مقدار و تغییرات شاخص سرعت در یک فلوم آزمایشگاهی پر شیب با کف زیر در حالت جریان فوق بحرانی و استغراق نسبی کم از ابزارهای سرعت‌سنجی مبتنی بر تصویربرداری (LSPIV) بهره‌گیری شد. به طوری که برای تمامی آزمایش‌های انجام شده میدان دوبعدی سرعت سطحی متوسط زمانی به دست آمده و تأثیر استغراق نسبی به صورت کیفی روی الگوی جریان مورد بررسی قرار گرفت. هم‌چنین به دلیل اهمیت در اختیار داشتن میزان دقیق شاخص سرعت برای برآورد دبی با استفاده از اندازه‌گیری سرعت سطح جریان، مقادیر این شاخص با استفاده از سرعت متوسط مقطع و سرعت سطحی متوسط زمانی- مکانی حاصل از به کارگیری LSPIV، محاسبه گردیده و سپس تغییرات آن در نتیجه تغییر استغراق نسبی برای سه شیب مختلف بررسی شد. در پایان نیز روش پیشنهادی برای محاسبه دبی با استفاده از سرعت سطحی، برای آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق و سپس برای یک سری داده از مجاری طبیعی اعتبارسنجی شد. نتایج حاصل از این تحقیق در سه قسمت اصلی مربوط به الگوی جریان، شاخص سرعت و اندازه‌گیری دبی قابل بحث می‌باشد:

الف) الگوی جریان در استغراق نسبی‌های پایین تنها دارای یک ناحیه با سرعت بالاتر تقریباً در قسمت میانی می‌باشد و هر چه به سمت میزان استغراق‌های بالاتر می‌رویم دو نوار دارای سرعت بالاتر تشکیل می‌گردد که به وسیله رگه‌های با سرعت کمتر احاطه شده‌اند. این الگوی متناوب در حقیقت ناشی از ساختارهای توربولنس سطح آزاد می‌باشد. به طوری که نوارهای با سرعت بیشتر مربوط به ساختارهای پایین جوش و رگه‌های با سرعت کمتر مربوط به ساختارهای بالا جوش هستند. علت پایین تر بودن سرعت در ساختارهای بالا جوش رسیدن گردابه‌های ایجاد شده در بستر به سطح جریان و شکل‌گیری خیابان‌های گردابه سطحی می‌باشد.

ب) اعتماد نمودن به یک عدد معادل $0/85$ به عنوان شاخص سرعت برای تبدیل سرعت سطح جریان به سرعت متوسط در شرایط مختلف جریان عاری از خطا نخواهد بود. در این مطالعه شاخص‌های سرعت به دست آمده برای استغراق‌های نسبی مختلف در محدوده $0/612$ تا $0/784$ با مقدار متوسط $0/701$ می‌باشند که این مقدار متوسط با مقدار متداول $0/85$ حدود 17 درصد اختلاف دارد. نکته قابل توجه وابستگی شاخص سرعت به میزان استغراق نسبی است که در حقیقت مبین این امر می‌باشد که با کاهش عمق جریان تفاوت سرعت

نسبی ۱/۵ تا پنج می‌باشد. لذا با اندازه‌گیری سرعت سطح جریان به-وسیله روش‌های مختلف و با استفاده از روش فوق‌الذکر می‌توان دبی جریان را در فلووم و همچنین در صحرا با اطمینان قابل قبولی محاسبه نمود.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از تمامی زحمات پرسنل انستیتو مهندسی هیدرولیک و مدیریت منابع آب دانشگاه صنعتی گراتز کشور اتریش به دلیل ساخت و آماده نمودن مدل آزمایشگاهی و همکاری آن‌ها برای انجام آزمایش‌ها صمیمانه تقدیر به عمل می‌آید.

متوسط مقطع و سرعت سطحی افزایش می‌یابد. همچنین در این تحقیق به منظور محاسبه میزان شاخص سرعت با در اختیار داشتن استغراق نسبی روابطی با ضرایب همبستگی بالا ارائه گردید که در آبراهه‌های با بستر زبر در شرایط جریان فوق‌بحرانی می‌تواند مورد بهره‌برداری قرار گیرد.

ج) روش ارائه شده برای برآورد دبی جریان برای آزمایش‌های انجام شده در فلووم آزمایشگاهی تحقیق حاضر دارای دقت بسیار بالایی با حداکثر خطای شش درصد می‌باشد. همچنین کاربرد روش مذکور در برآورد دبی جریان آبراهه‌های طبیعی با استفاده از سرعت‌های سطحی اندازه‌گیری شده حاکی از دقت بالای آن در محدوده استغراق

References

- 1- Albayrak, I. and Lemmin, U., 2007, August. Large scale PIV-measurements on the water surface of turbulent open-channel flow. In *CFM 2007-18ème Congrès Français de Mécanique*. AFM, Maison de la Mécanique, 39/41 rue Louis Blanc-92400 Courbevoie.
- 2- Albayrak, I. and Lemmin, U., 2011. Secondary currents and corresponding surface velocity patterns in a turbulent open-channel flow over a rough bed. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(11), pp.1318-1334.
- 3- Bieri, M., Jenzer, J., Kantoush, S.A. and Boillat, J.L., 2009, August. Large scale particle image velocimetry applications for complex free surface flows in river and dam engineering. In *33rd IAHR 2009 Congress. Vancouver, Canada*.
- 4- Bradley, A.A., Kruger, A., Meselhe, E.A. and Muste, M.V., 2002. Flow measurement in streams using video imagery. *Water Resources Research*, 38(12), pp.51-1.
- 5- Costa, J.E., Spicer, K.R., Cheng, R.T., Haeni, F.P., Melcher, N.B., Thurman, E.M., Plant, W.J. and Keller, W.C., 2000. Measuring stream discharge by non-contact methods: A proof-of-concept experiment. *Geophysical Research Letters*, 27(4), pp.553-556.
- 6- Fox, J.F. and Patrick, A., 2008. Large-scale eddies measured with large scale particle image velocimetry. *Flow Measurement and Instrumentation*, 19(5), pp.283-291.
- 7- Fujita, I., Muste, M. and Kruger, A., 1998. Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications. *Journal of Hydraulic Research*, 36(3), pp.397-414.
- 8- Kantoush, S.A., Schleiss, A.J., Sumi, T. and Murasaki, M., 2011. LSPIV implementation for environmental flow in various laboratory and field cases. *Journal of Hydro-environment Research*, 5(4), pp.263-276.
- 9- Lee, J.S. and Julien, P.Y., 2006. Electromagnetic wave surface velocimetry. *Journal of Hydraulic engineering*, 132(2), pp.146-153.
- 10- Manes, C., Pokrajac, D. and McEwan, I., 2007. Double-averaged open-channel flows with small relative submergence. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(8), pp.896-904.
- 11- Moramarco, T., Barbetta, S. and Tarpanelli, A., 2017. From surface flow velocity measurements to discharge assessment by the entropy theory. *Water*, 9(2), p.120.
- 12- Muste, M., Fujita, I. and Hauet, A., 2008. Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments. *Water Resources Research*, 44(4), pp. 1-14.

- 13-Novak, G., Rak, G., Prešeren, T. and Bajcar, T., 2017. Non-intrusive measurements of shallow water discharge. *Flow Measurement and Instrumentation*, 56, pp.14-17.
- 14-Orlins, J. J. and Gulliver, J. S. 2000. Measurements of free surface turbulence. *Fourth International Symposium on Gas Transfer at Water Surfaces*, June 5-8., Miami Beach, Florida, the USA, pp. 1-7.
- 15-Pagliara, S., Das, R. and Carnacina, I., 2008. Flow resistance in large-scale roughness condition. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 35(11), pp.1285-1293.
- 16-Polatel, C. 2006 *Signature of the roughness and the flow regime on the free surface*. Ph.D. thesis, Univ. of Iowa, Iowa City.
- 17-Raffel, M., C. E. Willert, S. T. Wereley, and J. Kompenhans. 2007 *Particle image velocimetry. A Practical Guide*, N. Y: Springer
- 18- Shin, S.S., Park, S.D. and Lee, S.K., 2016. Measurement of flow velocity using video image of spherical float. *Procedia engineering*, 154, pp.885-889.
- 19- Sutarto, T.E., 2015. Application of large scale particle image velocimetry (LSPIV) to identify flow pattern in a channel. *Procedia Engineering*, 125, pp.213-219.
- 20-Tamburrino, A. and Gulliver, J.S., 2007. Free-surface visualization of streamwise vortices in a channel flow. *Water Resources Research*, 43(11).1-12.
- 21-Thielicke, W. and Stamhuis, E. J. 2014. PIVlab- Time-resolved digital particle image velocimetry tool for MATLAB (version: 1.41).
- 22- Weitbrecht, V., Kühn, G. and Jirka, G.H., 2002. Large scale PIV-measurements at the surface of shallow water flows. *Flow Measurement and Instrumentation*, 13(5-6), pp.237-245.
- 23- Welber, M., Le Coz, J., Laronne, J.B., Zolezzi, G., Zamler, D., Dramais, G., Hauet, A. and Salvaro, M., 2016. Field assessment of noncontact stream gauging using portable surface velocity radars (SVR). *Water Resources Research*, 52(2), pp.1108-1126.