

Experimental Study of Velocity Index and Supercritical Flow Surface Patterns on Steep Ship Using LSPIV

FARHAD AKBARPOUR^{1*}, MANOOCHHR FATHI-MOGHADAM², JOSEF SCHNEIDER³, AHMAD FATHI⁴

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

2. Professor, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

3. Associate Professor, Institute of Hydraulic Engineering and Water Resources Management, Graz University of Technology, Austria.

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

(Received: Feb. 23, 2018- Revised: Oct. 14, 2018- Accepted: June. 30, 2018)

ABSTRACT

Measuring flow discharge in open waterways has always been one of the most important concerns for water experts. Flow surface image velocimetry method as a non-contact option has recently been widely utilized to measure discharge in open channels. One of these methods is a type of PIV method named LSPIV which has been paid more attention due to the elimination of laser application. In this study, LSPIV was used to measure 2D velocity field over the surface of a steep supercritical flow. Totally 24 experiments including three different slopes (2, 6 and 10 percent) and eight different aspect ratios (7 to 20.5) were conducted and in each experiment the flow surface was recorded with a frequency of 125 fps for 60 seconds. The Velocity Index was calculated by the obtained velocity data. This index is used for converting the surface velocity to average velocity of the cross section and subsequently for determination of flow discharge. The effect of different dimension ratios on VI was investigated. The average value for VI was obtained to be 0.701 which is different from the established value (0.85) by about 17%. Moreover, the flow surface time-averaged velocity patterns were quantitatively compared for different flow conditions. Since, the velocity index has been so far studied for subcritical conditions, the results of this study may be helpful for measuring supercritical flows.

Keywords: LSPIV, Steep Channels, Velocity Index (VI), Flow Pattern, Supercritical Flow.

* Corresponding Author's Email: farhad.akbarpoor@gmail.com

مطالعه آزمایشگاهی شاخص سرعت (نسبت سرعت متوسط به سرعت سطحی) و الگوهای سطحی جریان

فوق بحرانی روی شیب تند با استفاده از LSPIV

فرهاد اکبرپور^{۱*}، منوچهر فتحی مقدم^۲، یوزف اشنایدر^۳، احمد فتحی^۴

۱. دانشجوی دکتری، گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز. اهواز، ایران

۲. استاد، گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز. اهواز، ایران

۳. دانشیار انستیتو مهندسی هیدرولیک و مدیریت منابع آب، دانشگاه صنعتی گراتز، اتریش

۴. استادیار، گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز. اهواز، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۴ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۷/۲۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۴/۹)

چکیده

اندازه‌گیری دبی جریان در آبراهه‌های روباز همواره یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های متخصصین حوزه آب بوده است. 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 سرعت‌سنجی تصویری ذرات (PIV) موسوم به سرعت‌سنجی بزرگ‌مقیاس تصویری ذرات (LSPIV) است که به دلیل حذف ضرورت استفاده از لیزر طرفداران زیادی پیدا کرده است. در این مطالعه برای اندازه‌گیری میدان دوبعدی سرعت بر روی سطح جریان فوق‌بحرانی روی شیب تند از LSPIV بهره‌گیری شد. بدین ترتیب که تعداد ۲۴ آزمایش برای سه شیب مختلف (۲، ۶ و ۱۰ درصد) و هشت مقدار مختلف نسبت ابعاد (۷ تا ۲۰/۵) انجام و در هر آزمایش به مدت ۶۰ ثانیه با فرکانس ۱۲۵ فریم بر ثانیه تصویربرداری از سطح جریان صورت گرفت. از داده‌های سرعت حاصله برای محاسبه شاخص سرعت (VI) استفاده گردید. این شاخص برای تبدیل سرعت سطحی به سرعت متوسط مقطع و نهایتاً اندازه‌گیری دبی جریان بکار می‌رود. تأثیر تغییرات نسبت ابعاد روی این شاخص مورد بررسی قرار گرفت. مقدار متوسط بدست آمده برای شاخص سرعت معادل ۰/۷۰۱ می‌باشد که با مقدار متداول ۰/۸۵ حدود ۱۷ درصد اختلاف دارد. بعلاوه الگوهای سرعت متوسط زمانی سطح جریان برای حالات مختلف به صورت کمی مقایسه شد. با توجه به اینکه تاکنون شاخص سرعت غالباً برای شرایط زیربحرانی مطالعه شده است، نتایج این تحقیق می‌تواند برای اندازه‌گیری جریان‌های فوق‌بحرانی راهگشا باشد.

واژه‌های کلیدی: LSPIV، شیب تند، شاخص سرعت، الگوی جریان، جریان فوق‌بحرانی.

از سطح جریان می‌باشد.

مقدمه

اندازه‌گیری جریان‌های سطحی بخش مهمی از تحلیل‌ها در مدل‌سازی فیزیکی می‌باشد. در علم هیدرولیک، تهیه نقشه سرعت جریان‌های سطحی برای بررسی اثر عناصر و سازه‌های جدید نظیر سرریزها، ورودی توربین‌ها و سازه‌های مهندسی رودخانه بر روی مؤلفه‌های سرعت بکار می‌رود (Bieri et al., 2009). تاکنون چندین روش برای اندازه‌گیری سرعت سطح جریان بکار گرفته شده است که از جمله آنها می‌توان به مشتقی از روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات (Particle Image Velocimetry, PIV) موسوم به سرعت‌سنجی بزرگ‌مقیاس تصویری ذرات (LSPIV) (Weitbrecht et al., 2002; Fujita et al., 1998) (Papanicolaou et al., 2011; Tauro et Muste et al., 2008; Moramarco et al., 2017 al., 2014)، روش راداری سرعت سطحی (Surface Velocity Radar, SVR) (Costa et al.,)

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. مساحت سطح مقطع آبراهه با اطلاع از عمق جریان و هندسه مقطع قابل محاسبه بوده و بخش چالش‌برانگیز این روش اندازه‌گیری سرعت متوسط جریان می‌باشد. اغلب برای اندازه‌گیری سرعت در مجاری روباز از روش‌های تماسی مستقیم مثل مولینه استفاده می‌شود. اما رویکردی که اخیراً به‌عنوان یک گزینه غیرتماسی برای اندازه‌گیری جریان مورد توجه قرار گرفته است استفاده از روش‌های سرعت‌سنجی مبتنی بر تصویربرداری

* نویسنده مسئول: farhad.akbarpoor@gmail.com

سطحی به خوبی می‌تواند رفتار و الگوی جریان را نمایش دهد. (Fox and Patrick, 2008) برای اولین بار از LSPIV برای اندازه‌گیری ویژگی‌های ادی‌های بزرگ‌مقیاس (Large Scale Eddies) استفاده کردند. برای این منظور آنها سرعت‌های سطح آزاد را در یک فلوم با بستر شنی با جریان یکنواخت شبه ماندگار اندازه‌گیری نمودند. سپس با استفاده از تئوری تجزیه سه‌گانه (Triple Decomposition Theorem)، ادی‌های بزرگ‌مقیاس از ادی‌های کوچک‌مقیاس تفکیک شدند و متعاقباً داده‌های تجزیه‌شده به تصویر درآمده و ویژگی‌های ادی‌های بزرگ‌مقیاس اندازه‌گیری شدند. محققین در پایان پیشنهاد کردند که می‌توان از LSPIV برای بررسی ادی‌های بزرگ‌مقیاس در شرایط مختلف در مطالعات آزمایشگاهی و میدانی بهره برد.

Papanicolaou *et al.* (2011) نقش آرایه‌ای از کلست‌ها در کنترل حرکت ماسه در رودخانه‌های با بستر شنی را مورد مطالعه قرار دادند. آنها برای اندازه‌گیری سرعت در این تحقیق قصد داشتند از تکنیک ADV استفاده کنند که با توجه به عمق کم جریان در آزمایش‌های موردنظر (حدود ۴ سانتی‌متر) استفاده از این روش امکان‌پذیر نبود. لذا آنها در نهایت از روش LSPIV برای بدست آوردن میدان دوبعدی سرعت سطح جریان و بررسی الگوی جریان استفاده نمودند.

همچنین از LSPIV برای مطالعه الگوی متوسط زمانی جریان سطحی و تغییرات آن در اثر پارامترهای مختلف بهره‌گیری شده است (Kantoush *et al.*, Bieri *et al.*, 2009; Sutarto, 2015; 2011). 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 اغتشاش در سطح جریان نیز فراهم آمده است که از جمله مطالعات انجام‌شده در این خصوص می‌توان به (Orlins and Gulliver, 2000; Albayrak and Lemmin, 2007; Fox and Patrick, 2008) اشاره نمود.

کاربردهای LSPIV در علوم آب محدود به موارد بالا نمی‌شود و محققینی نیز از آن برای مقاصد دیگری همچون مطالعه جریان غلیظ (Ahmed *et al.*, 2015) و بررسی اثر اغتشاش سطح آزاد بر میزان تبادل گاز بین آب‌وهوا (McKenna and Mc Gillis, 2004) استفاده کرده‌اند.

از آنجاکه ویژگی ماهوی LSPIV اندازه‌گیری سرعت بر روی سطح جریان می‌باشد، بعضاً از ابزار دقیق دیگری برای اندازه‌گیری سرعت در عمق جریان و تکمیل داده‌های سرعت در سطح استفاده شده است. مثلاً (Kantoush *et al.*, 2008) از UVP و (Albayrak and Lemmin, 2011) و (Gunawan *et al.*

2000 Welber *et al.*، روش سرعت‌سنجی تصویری شناور کروی (Spherical Float Image Velocimetry, SFIV) (Shin *et al.*, 2016) و روش سرعت‌سنجی سطحی موج الکترومغناطیسی (Electromagnetic Wave Surface Velocimeter, ESV) (Lee and Julien, 2006) اشاره نمود.

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 دوبعدی جریان سیالات می‌باشد. Raffel *et al.* (2007) مبانی روش‌های متداول سرعت‌سنجی تصویری را تشریح کرده‌اند.

اما اخیراً روش PIV استاندارد برای اندازه‌گیری سرعت در مقیاس‌های بزرگتر و بر روی سطح جریان بکار برده شده است که به این روش سرعت‌سنجی بزرگ‌مقیاس تصویری ذرات (LSPIV) اطلاق می‌گردد (Bieri *et al.*, 2009).

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 بکار گرفتند و این روش را LSPIV نامیدند. آنها بکارگیری LSPIV را در سه مثال کاربردی مهندسی هیدرولیک در سطوح بزرگ تشریح نمودند. این مثال‌ها عبارتند از: فرآیندهای انتقال گاز در پایین‌دست مدل یک سرریز، انتقال یخ در مدل محل تلاقی دو رودخانه و جریان در دشت سیلابی یک رودخانه. نهایتاً آنها LSPIV را به‌عنوان یک ابزار قابل‌اعتماد، انعطاف‌پذیر و اقتصادی برای تشخیص جریان معرفی نمودند که می‌توان آن را به‌منظور برنامه‌ریزی پیمایش، طراحی، هشدار مخاطرات و مدیریت فعالیت‌های مرتبط با آب بکار برد.

Weitbrecht *et al.* (2002) از PIV سطحی یا همان LSPIV برای اندازه‌گیری دینامیک جریان در سطح جریان‌های کم‌عمق استفاده کردند. آنها با استفاده از داده‌های بدست آمده از LSPIV شرایط متوسط جریان، ویژگی‌های اغتشاشی جریان و گردابه‌های مربوط به ساختارهای منسجم دوبعدی (2D Coherent Structures) را مورد بررسی قرار دادند. توجیه ارائه‌شده در این تحقیق آن بود که از آنجاکه پروسه‌های غالب در جریان‌های کم‌عمق عمدتاً دوبعدی 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 ضمن ارائه یک کاربرد آزمایشگاهی از روش پیشنهادی خود عنوان نمودند که این روش با اندازه‌گیری‌های

زمانی دوبعدی برای آزمایش‌های مختلف بدست آمد. بدین ترتیب الگوی جریان در حالات مختلف مقایسه شد. شایان ذکر است از آنجاکه نسبت ابعاد (B/H) (B عرض مجرا و H عمق جریان) در این آزمایش‌ها از ۷ تا ۲۴ متغیر بود که حاکی از دوبعدی بودن جریان می‌باشد رفتار هیدرولیکی به‌خوبی در صفحه افقی و در سطح جریان نشان داده می‌شود (Weitbrecht *et al.*, 2002). لازم به توضیح است که برای جریان‌هایی که نسبت ابعاد در آنها بزرگتر از ۵ است می‌توان جریان را دوبعدی فرض نمود (Polatel, 2006; Fox and Patrick, 2008). 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 نسبت ابعاد بر روی شاخص سرعت نیز مورد بررسی قرار گرفته و روابطی برای برآورد مقدار شاخص سرعت در شیب‌های تند و در حالت جریان فوق‌بحرانی پیشنهاد گردید.

مواد و روش‌ها

تجهیزات آزمایشگاهی

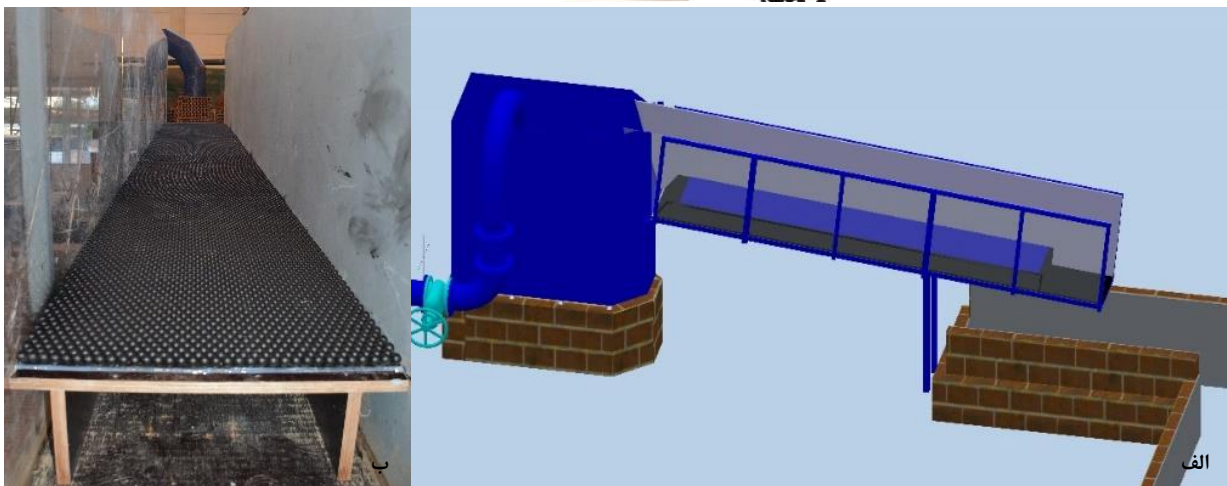
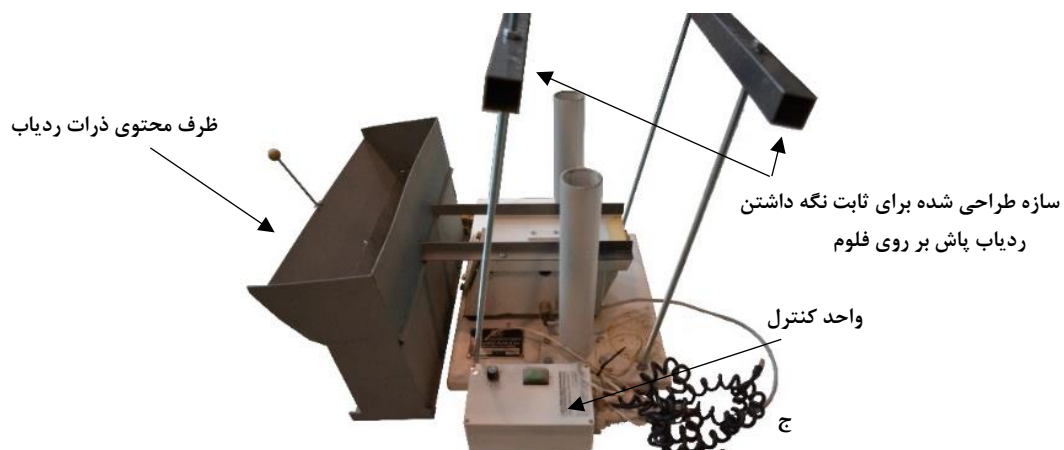
اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک انستیتو مهندسی هیدرولیک و مدیریت منابع آب دانشگاه صنعتی گراتز کشور اتریش انجام شد. برای این منظور از یک فلوم شیب‌پذیر به طول ۵ متر و عرض ۰/۵۵ متر استفاده گردید (شکل ۱-الف). ذرات کروی شکل شیشه‌ای هم‌اندازه به قطر ۱۶ میلی‌متر و وزن مخصوص ۲/۵ گرم بر سانتیمتر مکعب برای مدل‌سازی ایده‌آل بستر شنی آبراهه‌های با شیب تند مورداستفاده قرار گرفتند. بدین ترتیب که ابتدا ذرات به‌وسیله سایش با ماسه برای افزایش قابلیت رنگ‌پذیری زبر شدند و سپس یک لایه از آنها با استفاده از چسب سیلیکون بر روی صفحات پلکسی گلاس چسبانده شد به‌طوری‌که 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 ثبت 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.

از (2012) ADV برای اندازه‌گیری پروفیل سرعت سه‌بعدی جریان در ستون آب استفاده نمودند.

تاکنون تحقیقات متعددی نیز برای بررسی قابلیت بهره‌برداری از LSPIV برای اندازه‌گیری دبی صورت پذیرفته است (Jodeau *et al.*, 1998; Bradley *et al.*, 2002; Novak Tauro *et al.*, 2014; *al.*, 2008; Muste *et al.*, 2011; *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 مطالعات نیز از LSPIV برای اندازه‌گیری سرعت سطح جریان به‌منظور بررسی شاخص سرعت استفاده شده است (Novak *et al.*, 2017; 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 بدست آورد. در اغلب منابع مقدار شاخص سرعت برای جریان در رودخانه‌ها و همچنین فلوم‌های آزمایشگاهی که عمدتاً برای شرایط زیربحرانی مطالعه شده‌اند معادل ۰/۸۵ عنوان شده است (Moramarco *et al.*, 2017; Creutin *et al.*, 2003; Muste *et al.*, 2008; Welber *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2008). که به نظر می‌رسد این عدد مقدار پذیرفته‌شده‌ای برای این شاخص در میان مجامع علم هیدرولیک باشد. هرچند که نتایج بدست آمده در این تحقیق برای جریان‌های فوق‌بحرانی نشان می‌دهد که در شرایط حاکم بر آزمایش‌های انجام‌شده مقادیر دیگری برای شاخص سرعت بدست می‌آید که لزوم بررسی بیشتر در این خصوص را ایجاب می‌نماید.

در این تحقیق به‌منظور 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 درشت‌مقیاس و استغراق نسبی پایین و در شرایطی که جریان در آزمایش‌های انجام‌شده فوق‌بحرانی بود (به‌غیر از دو آزمایش ابتدایی شیب ۲ درصد) از تکنیک سرعت‌سنجی مبتنی بر تصویربرداری بهره‌گیری شد. به این صورت که میدان سرعت سطح جریان به‌صورت لحظه‌ای با استفاده از روش LSPIV اندازه‌گیری شده و با متوسط‌گیری زمانی، نقشه سرعت متوسط



شکل ۱- الف) شمای کلی فلوم آزمایشگاهی، ب) ذرات شیشه‌ای استفاده شده برای مدلسازی ایده‌آل بستر شنی، ج) دستگاه ردیاب پاش

LSPIV و با جایگزین نمودن حرکت امواج سطح جریان بجای ذرات ردیاب روش ساده‌تری ابداع گردد که این امر منجر به معرفی روش‌هایی مثل سرعت‌سنجی تصویری زمانی-مکانی (Space-Time Image Velocimetry, STIV) و سرعت‌سنجی تصویری موج سطحی کنترل‌شده (Controlled-Surface Wave Image Velocimetry, CSWIV) گردیده است (Muste et al., 2014).

همان‌طور که پیشتر اشاره شد در این تحقیق برای اندازه‌گیری سرعت سطح جریان از روش سرعت‌سنجی بزرگ‌مقیاس تصویری ذرات (LSPIV) بهره‌گیری شد. روش‌های سرعت‌سنجی مبتنی بر تصویربرداری عمدتاً دارای اجزایی بدین شرح هستند: ۱- دوربین تصویربرداری ۲- نورپردازی (Illumination) ۳- ردیابها (Tracers) به‌منظور قابل‌رؤیت نمودن جریان ۴- رایانه و نرم‌افزار لازم برای پردازش تصاویر و استخراج میدان سرعت. در ادامه اجزای سیستم LSPIV استفاده‌شده در این مطالعه تشریح می‌گردند. تصویربرداری با استفاده از یک دستگاه دوربین CCD مدل Photron Fastcam SA1.1 با حافظه داخلی ۸ گیگابایت و

اندازه‌گیری سرعت جریان

برای اندازه‌گیری میدان دوبعدی سرعت بر روی سطح جریان از روش LSPIV استفاده شد که در حقیقت نسخه‌ای از تکنیک متداول PIV می‌باشد که در آن استفاده از نور لیزر برای قابل‌رؤیت 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 به‌مراتب 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 بویژه 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. لذا تلاش‌هایی انجام شده است تا با الهام از

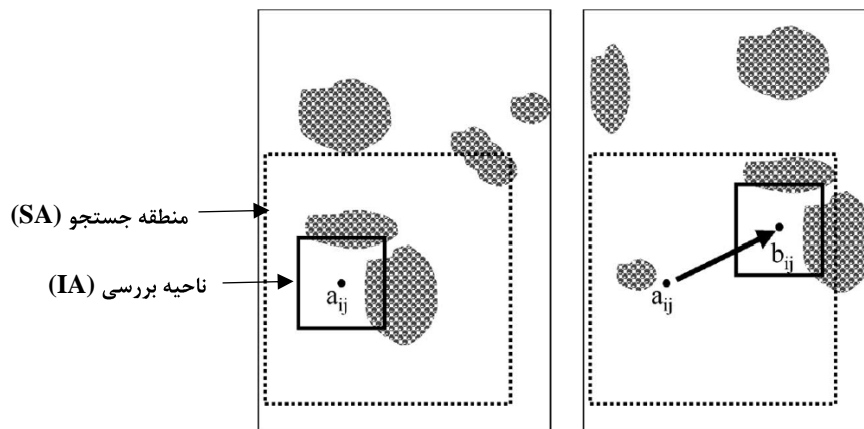
این تحقیق به طور یکجا قابل ملاحظه می‌باشد. Raffel *et al.* (2007) نشان دادند که میزان تراکم ذرات ردیاب بر روی دقت اندازه‌گیری مؤثر است. آزمایش‌های آنها با میزان تراکم‌های مختلف مشخص نمود که تعداد ذرات در هر ناحیه بررسی باید بیشتر از ۵ عدد باشد که دستگاه ردیاب پاش مورد استفاده در این تحقیق این شرط را تأمین می‌نماید. در این تحقیق برای پردازش تصاویر از ابزار موسوم به PIVlab که در MATLAB توسعه داده شده است استفاده گردید (Thielicke and Stamius, 2014). PIVlab و اغلب بسته‌های نرم‌افزاری مربوط به PIV مبتنی بر الگوریتم انطباق ضربدری (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 ضریب 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:

$$R_{ab} = \frac{\sum_{i=1}^{MX} \sum_{j=1}^{MY} \{(a_{xy} - \bar{a}_{xy})(b_{xy} - \bar{b}_{xy})\}}{\{\sum_{i=1}^{MX} \sum_{j=1}^{MY} (a_{xy} - \bar{a}_{xy})^2 \sum_{i=1}^{MX} \sum_{j=1}^{MY} (b_{xy} - \bar{b}_{xy})^2\}^{1/2}} \quad (\text{رابطه ۱})$$

قابلیت ضبط تصاویر با فرکانس ۵۴۰۰ فریم بر ثانیه (در حالت رزولوشن کامل) انجام شد. به منظور نوردهی به صفحه اندازه‌گیری از ۴ 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 بطوریکه 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 بهم چسبیدن بهترین انتخاب خواهد بود. لذا در این مطالعه از ذرات عدسی شکل پلی‌پروپیلن با قطر ۴/۵ میلی‌متر و چگالی ۹۴۶ کیلوگرم بر مترمکعب استفاده شد که به منظور جلوگیری از بهم چسبیدن آنها در اثر نیروی الکترواستاتیک، 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 راحت‌تر 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

جدول ۱- پارامترهای سیستم LSPIV بکار گرفته شده

دوربین تصویربرداری	نورپردازی	ذرات ردیاب	اندازه نهایی ناحیه بررسی	فرکانس تصویربرداری	مجموع تصاویر ضبط شده	ابعاد صفحه اندازه‌گیری	اندازه هر پیکسل
Photron Fastcam SA1.1	۴ عدد پرژکتور LED ۵۰ وات	پلی‌پروپیلن با قطر ۴/۵ mm و چگالی ۹۴۶ kg/m ³	۳۲×۳۲ پیکسل	۱۲۵ fps	۷۵۰۰	۸۶۰×۹۹۰ پیکسل	۰/۶۳ mm



شکل ۲- نمایش تصویری الگوریتم انطباق ضربدری مورد استفاده برای تشخیص جابجایی ذرات ردیاب

ترتیب در تصویر اول و دوم و خط افقی روی پارامترها نشان‌دهنده مقادیر میانگین شدت برای هر ناحیه بررسی هستند.

در رابطه (۱) MX و MY اندازه نواحی بررسی (بر حسب پیکسل)، a_{xy} و b_{xy} مقادیر توزیع شدت سطح خاکستری (متغیر از ۰ تا ۲۵۵ برای یک تصویر ۸ بیتی) در هر پیکسل به

روش انجام آزمایش‌ها

عمق جریان از ۲۳ تا ۷۵ میلی‌متر تغییر داده شد که این به‌منزله میزان استغراق نسبی (H/D_b) معادل ۱/۴ تا ۴/۷ می‌باشد که در محدوده زبری درشت‌مقیاس که معمولاً در رودخانه‌های پرشیب وجود دارد قابل‌طبقه‌بندی می‌باشد. شیب‌های استفاده شده نیز معادل ۲، ۶ و ۱۰ درصد بودند که اغلب در آبراهه‌های کوهستانی واقع می‌شوند و در این تحقیق منجر به ایجاد جریان‌های فوق‌بحرانی در تمامی آزمایش‌ها به‌غیر از دو آزمایش ابتدایی در شیب ۲ درصد گردید. در هر شیب تعداد ۸ آزمایش با عمق‌های مختلف و در نتیجه مجموعاً ۲۴ آزمایش صورت گرفت. اطلاعات مربوط به آزمایش‌های انجام‌شده در جدول (۲) قابل‌مشاهده می‌باشد. شایان‌ذکر است که دلیل استفاده از ابزار آزمایشگاهی یکسان، مشاهده‌کننده یکسان، ابزار دقیق یکسان که تحت شرایط مشابه استفاده گردید، مکان یکسان، امکان تکرار طی یک دوره زمانی کوتاه و اهداف یکسان آزمایش‌های انجام‌شده در این تحقیق تکرارپذیر می‌باشند.

برای روشن شدن موضوع به شکل (۲) توجه نمایید که در آن ناحیه بررسی به مرکزیت نقطه a_{ij} در تصویر اول (سمت چپ) مربوط به زمان t به‌عنوان نمونه مشخص گردیده و در درون آن الگوی توسط ذرات ردیاب تشکیل شده است. در تصویر دوم (سمت راست) مربوط به زمان $t+d_t$ نواحی بررسی موجود در منطقه جستجو (Search Area) که با خط‌چین مشخص شده برای یافتن مقصد احتمالی الگوی موردنظر بازرسی می‌شوند. به‌گونه‌ای که ضریب انطباق (Correlation Coefficient) ناحیه بررسی به مرکزیت نقطه a_{ij} با نواحی بررسی موردنظر (مثلاً ناحیه بررسی به مرکزیت نقطه b_{ij}) که با R_{ab} نشان داده می‌شود محاسبه و ناحیه بررسی با بزرگترین مقدار ضریب انطباق به‌عنوان مقصد جابجایی ذرات ردیاب تعیین می‌گردد. با داشتن جهت و مقدار جابجایی در زمان dt بردار سرعت برای ناحیه بررسی موردنظر بدست می‌آید. این فرآیند تا محاسبه بردار سرعت برای تمامی نواحی موجود در تصویر ادامه می‌یابد و بدین ترتیب میدان سرعت برای هر دو تصویر متوالی حاصل می‌گردد.

جدول ۲- مشخصات و پارامترهای مربوط به آزمایش‌های انجام شده

کد آزمایش	دبی (لیتر بر ثانیه)	شیب (درصد)	عمق مؤثر (می‌متر)	نسبت ابعاد	سرعت متوسط مقطع (متر بر ثانیه)	عدد فرود	عدد رینولدز	سرعت متوسط دوگانه سطحی جریان (متر بر ثانیه)	شاخص سرعت
S2H23	۶/۴	۲	۲۷	۲۰/۵۲	۰/۴۳	۰/۸۵	۱۱۶۳۶	۰/۷۱	۰/۶۱
S2H30	۱۰/۴		۳۴	۱۶/۱۸	۰/۵۶	۰/۹۶	۱۸۹۰۹	۰/۸۳	۰/۶۷
S2H38	۱۵/۳	۶	۴۲	۱۳/۱۰	۰/۶۶	۱/۰۳	۲۷۸۱۸	۰/۹۶	۰/۶۹
S2H40	۱۷		۴۴	۱۲/۵۰	۰/۷	۱/۰۷	۳۰۹۰۹	۰/۹۹	۰/۷۱
S2H45	۲۰/۷	۱۰	۴۹	۱۱/۲۲	۰/۷۷	۱/۱۱	۳۷۶۳۶	۱/۰۶	۰/۷۳
S2H50	۲۴/۵		۵۴	۱۰/۱۹	۰/۸۲	۱/۱۳	۴۴۵۴۵	۱/۰۸	۰/۷۶
S2H60	۳۲/۷	۱۰	۶۴	۸/۵۹	۰/۹۳	۱/۱۷	۵۹۴۵۴	۱/۲۱	۰/۷۷
S2H75	۴۶		۷۹	۶/۹۶	۱/۰۶	۱/۲	۸۳۶۳۶	۱/۳۵	۰/۷۸
S6H23	۱۰/۲	۱۰	۲۷	۲۰/۵۲	۰/۶۹	۱/۳۵	۱۸۵۴۵	۱/۰۷	۰/۶۵
S6H30	۱۶		۳۴	۱۶/۱۸	۰/۸۶	۱/۴۸	۲۹۰۹۰	۱/۲۹	۰/۶۷
S6H38	۲۳/۱	۱۰	۴۲	۱۳/۱۰	۱	۱/۵۶	۴۲۰۰۰	۱/۴۸	۰/۶۸
S6H40	۲۵/۴		۴۴	۱۲/۵۰	۱/۰۵	۱/۶	۴۶۱۸۱	۱/۵۴	۰/۶۸
S6H45	۳۰/۲	۱۰	۴۹	۱۱/۲۲	۱/۱۲	۱/۶۲	۵۴۹۰۹	۱/۶۱	۰/۷
S6H50	۳۶/۳		۵۴	۱۰/۱۹	۰/۸۶	۱/۲۲	۶۶۰۰۰	۱/۷۷	۰/۶۹
S6H60	۴۷	۱۰	۶۴	۸/۵۹	۱/۳۴	۱/۶۹	۸۵۴۵۴	۱/۸۹	۰/۷۱
S6H75	۶۷/۳		۷۹	۶/۹۶	۱/۵۵	۱/۷۶	۱۲۲۳۶۳	۲/۰۷	۰/۷۵
S10H23	۱۲/۷	۱۰	۲۷	۲۰/۵۲	۰/۸۶	۱/۶۸	۲۳۰۹۰	۱/۳۴	۰/۶۴
S10H30	۱۹		۳۴	۱۶/۱۸	۱/۰۲	۱/۷۶	۳۴۵۴۵	۱/۴۹	۰/۶۸
S10H38	۲۸/۸	۱۰	۴۲	۱۳/۱۰	۱/۲۵	۱/۹۴	۵۲۳۶۳	۱/۷۹	۰/۷
S10H40	۳۱/۵		۴۴	۱۲/۵۰	۱/۳	۱/۹۸	۵۷۲۷۲	۱/۸۲	۰/۷۱
S10H45	۳۹/۱	۱۰	۴۹	۱۱/۲۲	۱/۴۵	۲/۰۹	۷۱۰۹۰	۲/۰۷	۰/۷
S10H50	۴۵/۸		۵۴	۱۰/۱۹	۱/۵۴	۲/۱۲	۸۳۲۷۲	۲/۱۸	۰/۷۱
S10H60	۶۰/۶	۱۰	۶۴	۸/۵۹	۱/۷۲	۲/۱۷	۱۱۰۱۸۱	۲/۳۹	۰/۷۲
S10H75	۸۳/۸		۷۹	۶/۹۶	۱/۹۳	۲/۱۹	۱۵۲۳۶۳	۲/۵۵	۰/۷۶

آب تا تاج المان‌های زبری) و d_{65} عمقی از ذرات بستر است که ۶۵ درصد ذرات از آن کوچکترند.

Papanicolaou et al. (2011) که از پنج لایه ذرات کروی شیشه‌ای به‌عنوان ذرات بستر استفاده کردند تاج لایه فوقانی المان‌های زبری را مبنای محاسبه عمق مؤثر قرار دادند. *Manes et al.* (2007) نیز که یک لایه ذرات کروی شیشه‌ای (به قطر d_b) را به‌عنوان ذرات بستر بکار بردند تراز وسط ذرات کروی را مبنای محاسبه عمق گرفتند؛ بدین ترتیب که:

$$H_e = H_a + 0.5d_b \quad (\text{رابطه ۳})$$

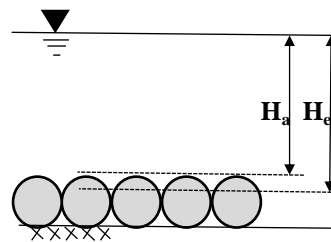
در این مطالعه شرایط ذرات بستر مشابه تحقیق صورت گرفته توسط *Manes et al.* (2007) بود با این تفاوت که برای ثابت کردن ذرات کروی بستر از چسب سیلیکون استفاده گردید که بخش تحتانی لایه زبری را مسدود نمود. لذا از رابطه زیر به‌منظور تعیین عمق مؤثر برای محاسبه پارامترهای هیدرولیکی بهره‌گیری شد:

$$H_e = H_a + 0.25d_b \quad (\text{رابطه ۴})$$

با توجه به اینکه ذرات بستر دارای قطر ۱۶ میلی‌متر بودند برای تعیین عمق مؤثر در آزمایش‌های مختلف ۴ میلی‌متر به عمق فیزیکی افزوده شد. در شکل (۳) مفاهیم عمق ظاهری و عمق مؤثر به‌صورت تصویری تشریح شده‌اند. اعداد فرود و رینولدز مندرج در جدول (۲) با استفاده از سرعت متوسط مقطع (U_m) و عمق مؤثر جریان (H_e) محاسبه شده‌اند.

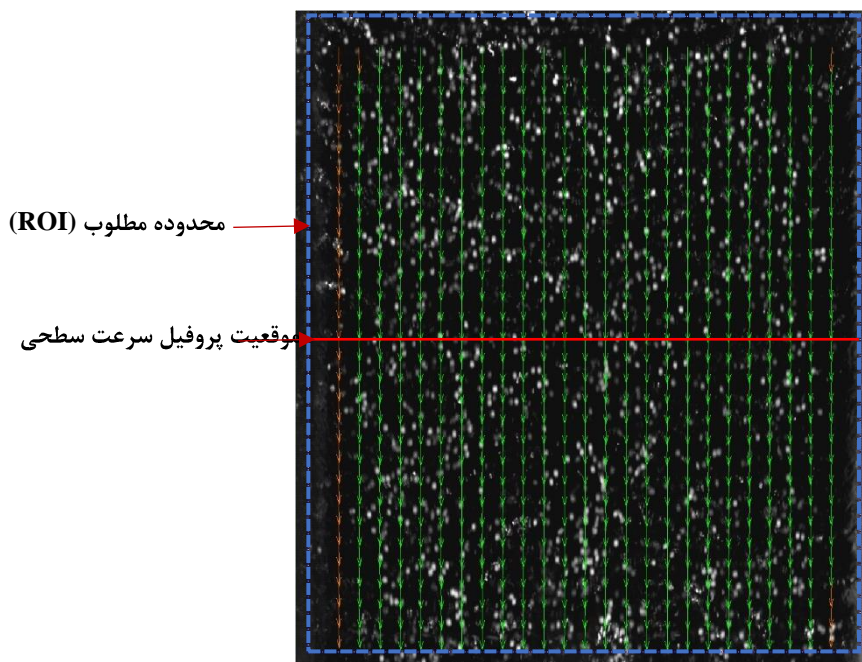
برای دسته‌بندی آزمایش‌های انجام‌شده به‌منظور تسهیل بررسی نتایج به هر یک از آزمایش‌های انجام‌شده یک کد اختصاص داده شد؛ بدین ترتیب که عدد بعد از حرف S نشان‌دهنده شیب فلوم و عدد بعد از حرف H مشخص‌کننده عمق جریان می‌باشد. برای اندازه‌گیری عمق جریان و حصول اطمینان از یکنواخت بودن جریان چند خط کش با درجه‌بندی میلی‌متر در طول فلوم نصب شدند. اما این سؤال 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 انجام‌شده در این تحقیق پرداخته شد. به‌عنوان مثال *Pagliara et al.* (2008) که از ذرات طبیعی به‌عنوان المان‌های زبری استفاده نمودند، برای تعیین عمق مؤثر از رابطه زیر استفاده کردند:

$$H_e = H_a + 0.2d_{65} \quad (\text{رابطه ۲})$$



شکل ۳- تعریف عمق ظاهری و عمق مؤثر

که در آن H_e عمق مؤثر، H_a عمق ظاهری (فاصله سطح



شکل ۴- میدان بردارهای سرعت متوسط زمانی سطحی برای آزمایش S10H50

$$f(d_b, H_e, B, v, g, S, U_m, \langle \overline{U_s} \rangle) = 0 \quad (\text{رابطه ۵})$$

در رابطه بالا v لزجت کینماتیکی سیال، g شتاب ثقل، U_m سرعت متوسط مقطع و $\langle \overline{U_s} \rangle$ سرعت متوسط سطح جریان می‌باشند که در آن خط افقی بالای پارامتر متوسط زمانی و براکت متوسط مکانی را بیان می‌کند. با استفاده از نظریه باکینگهام می‌توان رابطه (۵) را به صورت تابعی زیر نوشت:

$$\frac{U_m}{\langle \overline{U_s} \rangle} = \psi\left(\frac{H_e}{d_b}, \frac{B}{H_e}, S, Re, Fr\right) \quad (\text{رابطه ۶})$$

در معادله بالا Re عدد رینولدز می‌باشد که به دلیل اغتشاش بالای جریان می‌توان از آن صرف نظر کرد. همچنین Fr عدد فرود است که از آنجا که عمده آزمایش‌های انجام شده فوق بحرانی هستند و رابطه در واقع برای شرایط فوق بحرانی بدست خواهد آمد از آن نیز چشم‌پوشی می‌گردد. پارامترهای اول و دوم سمت چپ معادله بالا یعنی استغراق نسبی و نسبت ابعاد نیز در واقع ماهیت یکسانی دارند؛ چراکه هر دو با عمق مقیاس شده‌اند. بعلاوه در منابع نیز اشاره شده است که نسبت سرعت متوسط به سرعت سطحی را می‌توان تابعی از یکی از پارامترهای استغراق نسبی یا نسبت ابعاد دانست (Polatel, 2006). از طرف دیگر نسبت ابعاد تأثیر اساسی روی پروفیل سرعت دارد چراکه وجود دیواره‌ها می‌تواند روی توزیع سرعت تأثیر گذاشته و موجب ایجاد جریان‌های ثانویه گردد که در نتیجه آن حداکثر سرعت به زیر سطح آب منتقل شده و پدیده dip رقم می‌خورد. لذا شاخص سرعت تابعی خواهد بود از:

$$\frac{U_m}{\langle \overline{U_s} \rangle} = \psi\left(\frac{B}{H_e}, S\right) \quad (\text{رابطه ۷})$$

نتایج و بحث

الگوی جریان سطحی

برای هر آزمایش برای مطالعه الگوی سطحی جریان و همچنین محاسبه شاخص سرعت، به‌طور میانگین ۷۵۰۰ نقشه میدان سرعت محاسبه شده و یک نقشه میدان سرعت متوسط زمانی بدست می‌آید. در شکل (۴) میدان بردارهای سرعت متوسط زمانی برای آزمایش S10H50 نمایش داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود بردارهای سرعت به دلیل شیب بالای فلوم همگی کاملاً در جهت جریان بوده و به سایر جهات منحرف نشده‌اند که این امر نشان‌دهنده آن است که بزرگی سرعت طولی جریان به مراتب بیشتر از سرعت عرضی آن است. در شکل مذکور همچنین ذرات سفیدرنگ ردیاب قابل رؤیت می‌باشند. در شکل (۵) به‌عنوان نمونه نقشه سرعت متوسط زمانی سطحی برای سه شیب ۲، ۶ و ۱۰ درصد برای عمق‌های ۲۳، ۵۰ و ۷۵ میلی‌متر قابل ملاحظه می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در

در هر آزمایش تصویربرداری به مدت ۶۰ ثانیه با فرکانس ۱۲۵ فریم بر ثانیه صورت پذیرفت که در مجموع تعداد تصاویر ضبط‌شده معادل ۷۵۰۰ تصویر بود. سپس تصاویر ضبط‌شده با استفاده از PIVlab تحلیل و میدان سرعت برای همه تصاویر بدست آمد. فرآیند تحلیل تصاویر شامل پیش‌پردازش، پردازش و پس‌پردازش می‌شود. در پیش‌پردازش ابتدا محدوده مطلوب (Region of Interest) به ابعاد ۹۹۰×۸۶۰ پیکسل از تصاویر اصلی بریده شده (مستطیل مشخص شده با خط چین آبی‌رنگ بر روی شکل (۴) و بعد تصاویر با ابزارهایی برای پردازش بهتر تقویت و تشدید می‌شوند. بدین ترتیب با توجه به ابعاد فیزیکی صفحه اندازه‌گیری که ۶۱۷×۵۵۰ میلی‌متر مربع می‌باشد اندازه هر پیکسل معادل $۰/۶۳$ میلی‌متر خواهد بود. در مرحله بعد تصاویر با معرفی فاصله‌ای مشخص (بین دو خط کشیده شده بر روی بستر) به نرم‌افزار کالیبره می‌گردند. سپس تنظیمات مربوط به تحلیل تصاویر معرفی می‌گردد. در این مطالعه از روش انطباق ضربدری چندمسیره (Multi-Pass) مبتنی بر تبدیل سریع فوریه (FFT) استفاده شد که در آن ابتدا تحلیل با یک ناحیه بررسی بزرگ (۲۵۶×۲۵۶ پیکسل) آغاز و نتایج برای نواحی بررسی کوچکتر (نهایتاً ۳۲×۳۲ پیکسل) استفاده و بردارهای سرعت برای هر ناحیه بررسی بدست می‌آیند. 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 میدان‌های سرعت بدست می‌آیند.

در خصوص خطاها و عدم قطعیت نیز باید عنوان نمود که عمده عدم قطعیت در کار حاضر مربوط به استفاده از LSPIV است که در نتیجه عواملی چون انتخاب اندازه ناحیه بررسی، اندازه ذرات ردیاب، جنس ذرات ردیاب و غیره می‌باشد که سعی شد تا حد امکان با انتخاب این عوامل با استناد به مطالعات پیشین از میزان عدم قطعیت کاسته شود. هرچند که کمی نمودن میزان خطاها و عدم قطعیت در حیطه بررسی این تحقیق قرار ندارد و پیشنهاد می‌گردد در قالب تحقیق دیگری به تفصیل به این موضوع پرداخته شود.

تحلیل ابعادی

به‌منظور تعیین پارامترهای تأثیرگذار بر روی شاخص سرعت و متعاقباً بدست آوردن رابطه‌ای بین این شاخص و پارامترهای مؤثر، در ادامه تحلیل ابعادی در این خصوص صورت پذیرفت. جریان با ارتفاع H_e روی سطح زبر متشکل از ذرات کروی هم‌اندازه به قطر d_b و در فلومی با عرض B و شیب S را می‌توان تابعی از پارامترهای زیر در نظر گرفت:

لحظه‌ای اما دارای فراز و فرودهای بیشتری است که نشان‌دهنده نوسانات مکانی سرعت سطحی است که می‌تواند موضوع تحقیقات آینده باشد.

شاخص سرعت

همان‌طور که پیشتر نیز اشاره گردید شاخص سرعت، نسبت سرعت متوسط مقطع به سرعت متوسط سطح جریان می‌باشد که می‌توان آن را با استفاده از رابطه زیر نشان داد:

$$VI = \frac{U_m}{(\bar{U}_s)} \quad (\text{رابطه ۸})$$

در این مطالعه با داشتن دبی ثبت‌شده توسط فلومتر موجود و عمق جریان، سرعت متوسط مقطع (U_m) قابل‌محاسبه است. سرعت متوسط سطحی نیز در هر آزمایش در واقع سرعت متوسط دوگانه می‌باشد. بطوریکه ابتدا متوسط زمانی هر ۷۵۰۰ میدان سرعت محاسبه و یک میدان سرعت متوسط زمانی بدست می‌آید و سپس متوسط‌گیری مکانی بر روی آن انجام شده و یک عدد که در واقع سرعت سطحی متوسط زمانی- مکانی می‌باشد (\bar{U}_s) حاصل می‌گردد.

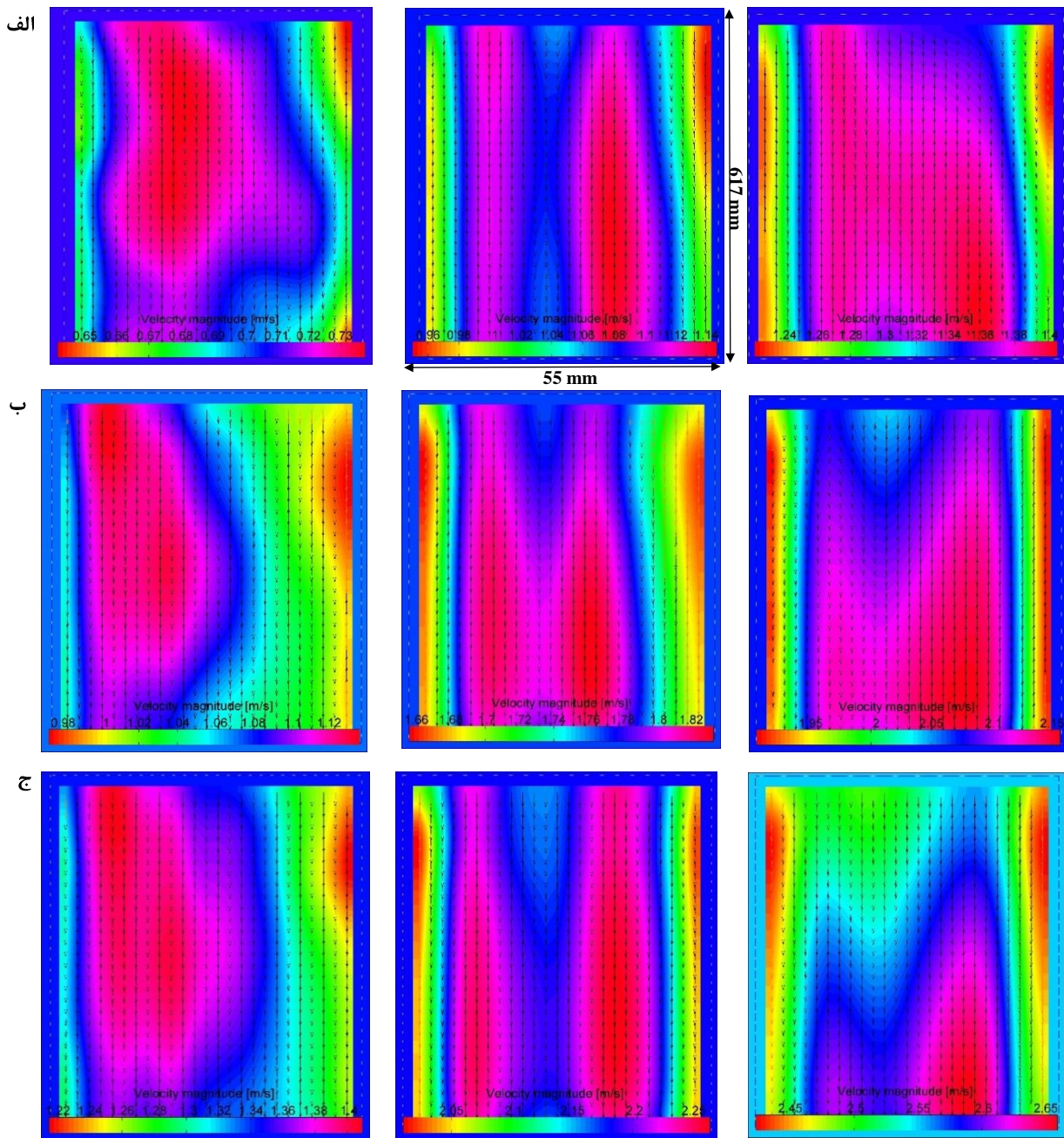
مقادیر سرعت متوسط مقطع، سرعت متوسط سطحی و شاخص سرعت برای آزمایش‌های مختلف در جدول (۲) قابل‌ملاحظه می‌باشند. همان‌طور که در مقدمه اشاره گردید در اغلب منابع مقدار شاخص سرعت برای رودخانه‌ها و همچنین شرایط آزمایشگاهی معادل ۰/۸۵ عنوان شده است که نتایج حاضر نشان می‌دهد که نمی‌توان تحت شرایط مختلف به صحت این مقدار به‌عنوان شاخص سرعت اعتماد نمود؛ چراکه این عدد در آبراهه‌های خیلی صاف منجر به پایین تخمین زدن دبی و در آبراهه‌های زبر موجب دست بالا تخمین زدن دبی می‌گردد. به‌عبارت‌دیگر برای برآورد صحیح دبی در آبراهه‌های زبر مقدار شاخص سرعت بایستی کمتر از ۰/۸۵ باشد. در مطالعات انجام‌شده تاکنون مقادیر دیگری نیز برای این شاخص بدست آمده است که از جمله می‌توان به ۰/۸۰۵ که *Weitbrecht et al.* (2002) برای یک فلوم آزمایشگاهی، ۱ که *Gunawan et al.* (2012) برای یک رودخانه کوچک، ۰/۷۹ که *Jodeau et al.* (2008) برای رودخانه آرک فرانسه و ۰/۸۴۵ که *Novak et al.* (2017) برای یک فلوم آزمایشگاهی بدست آوردند اشاره نمود.

شاخص‌های سرعت بدست 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 به لحاظ 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.

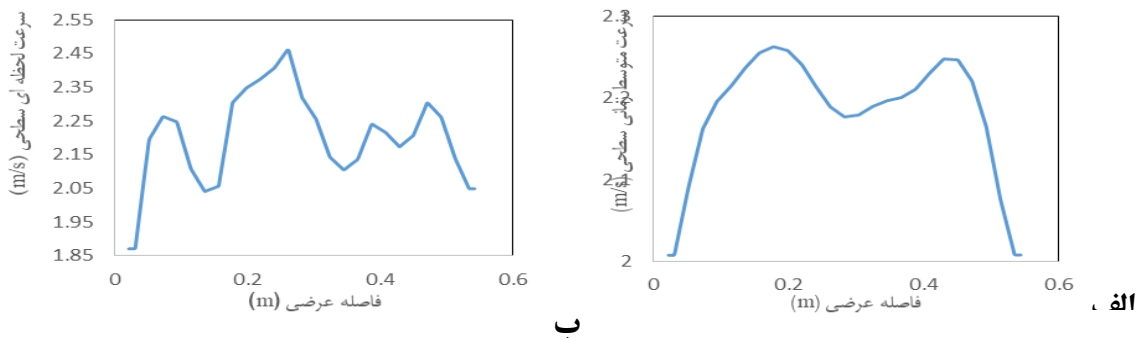
عمق ۲۳ میلی‌متر که معادل نسبت ابعاد ۲۰/۵ می‌باشد تنها یک ناحیه با سرعت بالاتر تقریباً در قسمت میانی وجود دارد و با افزایش عمق جریان که متناظر با کاهش نسبت ابعاد می‌باشد دو نوار دارای سرعت بالاتر تشکیل می‌گردد که بوسیله رگه‌های با سرعت کمتر احاطه شده‌اند. الگوی جریان بدست آمده حکایت از وجود ساختارهای آشفته سطح آزاد در آزمایش‌های انجام‌شده دارد. بطوریکه نوارهای با سرعت بیشتر مربوط به ساختارهای پایین‌جوش (Downwelling) و رگه‌های با سرعت کمتر مربوط به ساختارهای بالاجوش (Upwelling) می‌باشند. علت پایین‌تر بودن سرعت در ساختارهای بالاجوش رسیدن گردابه‌های ایجاد شده در بستر به سطح جریان و شکل‌گیری خیابان‌های گردابه سطحی (Surface Vortex Streets) می‌باشد. نکته دیگر گرادیان شدیدتر سرعت در نزدیکی دیواره‌هاست که اثر دیواره‌ها را نشان می‌دهد.

Albayrak and Lemmin (2011) پیشنهاد دادند که تعداد نوارهای پایین‌جوش بر روی سطح آزاد نزدیکترین عدد صحیح زوج به حاصل تقسیم ($\frac{B/H}{2 \rightarrow 3}$) و تعداد نوارهای بالاجوش نزدیکترین عدد صحیح فرد به $1 + (\frac{B/H}{2 \rightarrow 3})$ خواهد بود که در این روابط B عرض و H عمق جریان می‌باشد. بر این اساس با افزایش نسبت ابعاد و در واقع با کاهش عمق بر تعداد نواحی بالاجوش و پایین‌جوش افزوده می‌شود. اما نتایج بدست آمده در این تحقیق حاکی از آن است که تغییرات نسبت ابعاد در شبیه‌های مختلف تأثیری روی تعداد نوارها ندارد و در تمامی آزمایش‌ها سه ناحیه با سرعت کمتر و دو ناحیه با سرعت بیشتر ایجاد می‌گردد. همچنین فاصله بین نوارهای با سرعت مشابه در منابع از جمله *Tamburrino and Gulliver* (2007) معادل دو برابر عمق جریان ($\ell=2H$) عنوان شده است که در این تحقیق این فاصله در اغلب آزمایش‌ها در حدود چهار برابر عمق ($\ell=4H$) بدست آمد. شاید بتوان این تفاوت‌ها را به رژیم جریان در آزمایش‌های انجام‌شده در این تحقیق که فوق‌بحرانی است (اعداد فرود از حدود ۱ تا ۲/۱۹) و آزمایش‌های تحقیق مذکور که زیربحرانی می‌باشند نسبت داد. هرچند که نتیجه‌گیری دقیق‌تر در خصوص ساختارهای سطحی جریان‌های فوق‌بحرانی نیازمند انجام بررسی‌های تفصیلی خواهد بود.

برای مقایسه الگوی متوسط زمانی و لحظه‌ای جریان، در شکل (۶) پروفیل‌های سرعت متوسط زمانی و لحظه‌ای (یکی از ۷۵۰۰ میدان سرعت) سطح جریان برای آزمایش S10H50 نشان داده شده‌اند. مطابق مطالبی که ذکر شد مشاهده می‌شود که پروفیل سرعت متوسط دارای دو نقطه اوج با فاصله تقریباً ۲۰ سانتیمتر است که معادل ($\ell=4H$) می‌باشد. پروفیل سرعت



شکل ۵- نقشه های سرعت متوسط زمانی برای آزمایشهای شبیهی الف) دو درصد، ب) شش درصد و ج) ده درصد برای عمقهای بترتیب از چپ به راست ۲۳، ۵۰ و ۷۵ میلی‌متر (جهت جریان از بالا به پایین)



شکل ۶- پروفیل سرعت الف) متوسط زمانی ب) لحظه ای سطح جریان برای آزمایش S10H50

شدن پروفیل سرعت در جریان‌های کم‌عمق، افزایش می‌یابد. به همین دلیل مقادیر شاخص سرعت در شیب ۲ درصد از شیب‌های ۶ و ۱۰ درصد به دلیل غیرخطی بودن پروفیل سرعت بیشتر است. قابل‌ذکر است که مقادیر شاخص سرعت در شیب‌های ۶ و ۱۰ درصد تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند. به‌منظور برقراری ارتباط بین نسبت ابعاد و شاخص سرعت این تکنیک رگرسیون‌گیری استفاده گردید که براین اساس این ارتباط به بهترین شکل با استفاده از روابط توانی زیر به ترتیب برای شیب‌های ۲، ۶ و ۱۰ درصد قابل‌بیان خواهد بود:

$$\frac{U_m}{(\bar{U}_s)} = 1.27 \left(\frac{B}{H_e}\right)^{-0.234} \quad (\text{رابطه ۹})$$

$$\frac{U_m}{(\bar{U}_s)} = 0.93 \left(\frac{B}{H_e}\right)^{-0.122} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

$$\frac{U_m}{(\bar{U}_s)} = 0.971 \left(\frac{B}{H_e}\right)^{-0.132} \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

ضریب همبستگی روابط فوق به ترتیب ۰/۹۴، ۰/۹۴ و ۰/۹۴ و همچنین ریشه متوسط مجذور خطاها (RMSE) برای آنها به ترتیب معادل ۱/۴، ۰/۷ و ۱/۶ درصد می‌باشد که نشان‌دهنده انطباق خیلی خوب آنها با داده‌های مشاهداتی می‌باشد.

به‌منظور استخراج رابطه‌ای کلی که بتوان با داشتن هندسه جریان در شرایط فوق‌بحرانی بر روی شیب تند (بیش از ۲ درصد) بر روی 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):

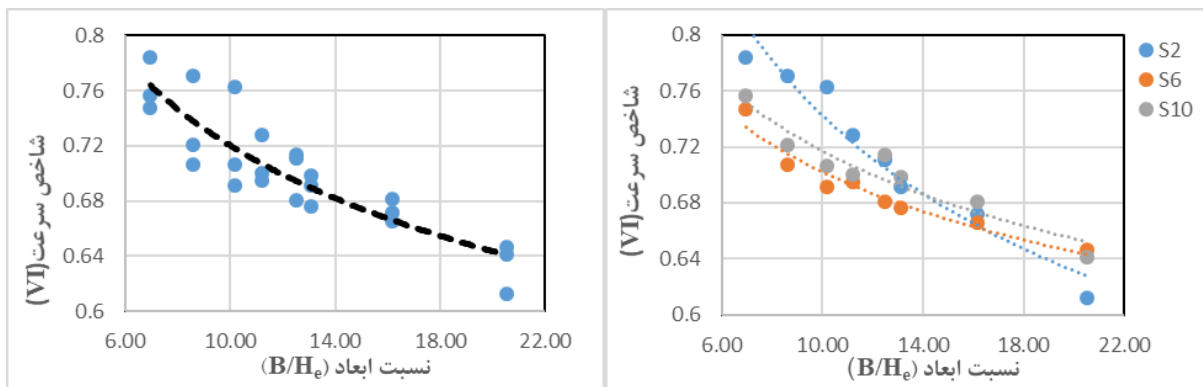
$$\frac{U_m}{(\bar{U}_s)} = 1.05 \left(\frac{B}{H_e}\right)^{-0.163} \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

بدین ترتیب با استفاده از رابطه (۱۲) که دارای ضریب همبستگی در حدود ۰/۸ و ریشه متوسط مجذور خطاها (RMSE) معادل ۱۶/۹ درصد می‌باشد با در اختیار داشتن سرعت سطحی می‌توان به‌سرعت متوسط و متعاقباً دبی جریان در شرایط توضیح داده شده دست یافت.

نکته دیگر تفاوت رژیم جریان در آزمایش‌های این تحقیق است که فوق‌بحرانی بودند و در مطالعات پیشین، جریان زیربحرانی بوده است که شاید بتوان اختلاف شاخص‌های سرعت بدست آمده با مقدار ۰/۸۵ را به آن نیز نسبت داد. هرچند که دلیل اصلی این اختلاف را می‌توان به استغراق نسبی کم جریان که باعث جلوگیری از شکل‌گیری توزیع لگاریتمی سرعت می‌گردد نسبت داد.

نکته مهم دیگر در خصوص مقادیر بدست آمده برای شاخص سرعت این است که همگی آنها کمتر از یک هستند که این امر نشان می‌دهد که سرعت سطح جریان در آنها همواره بیشتر از سرعت متوسط مقطع بوده است و در شرایط آزمایش شده پدیده dip رخ نداده است که بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که میزان جریان‌های ثانویه قابل‌توجه نبوده‌اند. با توجه به اینکه مقدار استاندارد شاخص سرعت ۰/۸۵ تنها برای آبراهه‌های به لحاظ هیدرولیکی صاف قابل‌پذیرش است، برقراری ارتباط بین این شاخص و مشخصه‌های اصلی جریان در شرایط این تحقیق که مشابه آبراهه‌های با بستر شنی می‌باشد راهگشا به نظر 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 به‌اتفاق آزمایش‌های این تحقیق دارای رژیم فوق‌بحرانی هستند و زبری بستر نیز ثابت و بدون تغییر می‌باشد سعی شد رابطه‌ای بین این شاخص و نسبت ابعاد برقرار گردد.

در شکل (۷-الف) نمودار مربوط به تغییرات شاخص سرعت در مقابل نسبت ابعاد برای شیب‌های مختلف قابل‌ملاحظه می‌باشد. مشخصاً میزان شاخص سرعت در شیب‌های مختلف با کاهش نسبت ابعاد افزایش می‌یابد که این موضوع نشان‌دهنده آن است که با کاهش عمق جریان اختلاف بین سرعت متوسط و سرعت سطحی به دلیل تنش زیاد و خطی



شکل ۷- نمودار تغییرات شاخص سرعت در مقابل (a) نسبت ابعاد برای شیب‌های ۲، ۶ و ۱۰ درصد (b) نسبت ابعاد بصورت کلی

نتیجه‌گیری

در این مطالعه برای بررسی الگوی جریان و همچنین مقدار و تغییرات شاخص سرعت در یک فلوم آزمایشگاهی با شیب تند با کف زبر در حالت جریان فوق بحرانی و استغراق نسبی کم از ابزارهای سرعت‌سنجی مبتنی بر تصویربرداری (LSPIV) بهره‌گیری شد. به طوری که برای تمامی آزمایش‌های انجام‌شده میدان دوبعدی سرعت سطحی متوسط زمانی بدست آمده و تأثیر عمق و شیب آبراهه به صورت کیفی بر 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 بکارگیری LSPIV، محاسبه گردیده و سپس تغییرات آن در نتیجه تغییر نسبت ابعاد برای سه شیب مختلف بررسی شد. نتایج حاصل از این تحقیق در دو قسمت اصلی مربوط به الگوی جریان و شاخص سرعت قابل‌بحث می‌باشد:

الف) الگوی جریان در عمق‌های پایین تنها دارای یک ناحیه با سرعت بالاتر در قسمت میانی می‌باشد و هرچه به سمت عمق‌های 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 آشفتگی در سطح آزاد می‌باشد. بطوریکه نوارهای با سرعت بیشتر مربوط به ساختارهای پایین‌جوش و رگه‌های با سرعت کمتر مربوط به ساختارهای بالا جوش هستند. علت پایین‌تر بودن سرعت در ساختارهای بالا جوش رسیدن گردابه‌های ایجادشده در بستر به سطح جریان و شکل‌گیری خیابان‌های گردابه سطحی می‌باشد. همچنین فاصله بین نوارهای با سرعت مشابه در این تحقیق در حدود چهار برابر عمق ($l=4H$) بدست آمد.

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 بدست آمده برای نسبت ابعاد 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 نسبت ابعاد است که در حقیقت مبین این امر می‌باشد که با کاهش عمق جریان تفاوت سرعت متوسط مقطع و سرعت سطحی افزایش می‌یابد. همچنین مقادیر شاخص سرعت در

شیب 2 درصد به طور قابل توجهی از شیب‌های 6 و 10 درصد بیشتر است که این موضوع نشان‌دهنده تأثیر شیب بر روی این شاخص می‌باشد و لزوم لحاظ نمودن شیب در برآورد آن را گوشزد می‌نماید.

همچنین به منظور محاسبه میزان شاخص سرعت در آبراهه‌های با بستر زبر در شرایط جریان فوق بحرانی با در اختیار داشتن نسبت ابعاد روابطی ارائه گردید که با توجه به درصد خطای کم بدست آمده برای آنها می‌تواند مورد بهره‌برداری قرار گیرد.

سپاسگزاری

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.

نمادها

B : عرض کانال

H : عمق جریان

VI : شاخص سرعت، نسبت سرعت متوسط مقطع به سرعت متوسط دوگانه سطحی

(\bar{U}_s) : سرعت متوسط دوگانه (زمانی-مکانی) سطحی

U_m : سرعت متوسط مقطع

MX : اندازه افقی نواحی بررسی بر حسب پیکسل

MY : اندازه عمودی نواحی بررسی حسب پیکسل

a_{xy} : مقدار توزیع شدت سطح خاکستری در هر پیکسل در تصویر اول

b_{xy} : مقدار توزیع شدت سطح خاکستری در هر پیکسل در تصویر دوم

\bar{a}_{xy} : مقدار متوسط توزیع شدت سطح خاکستری در هر ناحیه بررسی در تصویر اول

\bar{b}_{xy} : مقدار متوسط توزیع شدت سطح خاکستری در هر ناحیه بررسی در تصویر دوم

R_{ab} : ضریب انطباق ناحیه بررسی در تصویر اول با نواحی بررسی مورد نظر در تصویر دوم

H_e : عمق موثر

H_a : عمق ظاهری

d_{65} : اندازه‌ای از ذرات بستر است که 65 درصد ذرات از آن

l: فاصله بین نوارهای با سرعت مشابه موجود در الگوی سطحی جریان

d_p : قطر ذرات کروی شیشه‌ای کف فلوم

REFERENCES

- Ahmed, D.I., Latrache, N. and Nsom, B. (2015). Applied the large scale particle image velocimetry technique for measurement the velocity of gravity currents in the laboratory. *Journal of Water Resource and Protection*, (7), 597-604.
- Albayrak, I and Lemmin, U. (2007). Large scale PIV-measurements on the water surface of turbulent open channel flow. *18^{ème} Congrès Français de Mécanique*, August 27-31., Grenoble, France, pp. 1-6.
- 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(11): 1318-1334.
- Bieri, M., Jenzer, J., Kantoush, S.A., Boillat, J. L. (2009). Large scale particle image velocimetry applications for complex free surface flows in river and dam engineering. *33rd IAHR Congress Proc.* British Columbia, Vancouver, 604-611.
- Bradley, A.A., Kruger, A., Meselhe, E.A., Muste, M.V. (2002). Flow measurement in streams using video imagery. *Water Resour. Res.* 38 (12), 13-15.
- Costa, J. E., K. R. Spicer, R. T. Cheng, P. F. Haeni, N. B. Melcher, E. M. Thurman, W. J. Plant, and W. C. Keller (2000). Measuring stream discharge by non-contact methods: A proof-of-concept experiment, *Geophys. Res. Lett.*, 27(4), 553-556.
- Fox, J.F and Patrick, A. (2008). Large-scale eddies measured with large scale particle image velocimetry. *Flow Measurement and Instrumentation* (19), 283-291.
- 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), 397-414.
- Gunawan B., Sun X., Sterling M., Shiono K., Tsubaki R., Rameshwaran P., Knight D.K., Chandler J.H., Tang X., and Fujita I. (2012). The application of LS-PIV to a small irregular river for inbank and overbank flows, *Flow Measurement and Instrumentation*, (24), 1-12.
- Jodeau, M., A. Hauet, A. Paquier, J. Le Coz, and G. Dramais (2008). Application and evaluation of LS-PIV technique for the monitoring of river surface velocities in high flow conditions, *Flow Meas. Instrum.*, 19(2), 117-127.
- Kantoush, S.A., De Cesare, G., Boillat, J.L., and Schleiss, A.J. (2008). Flow field investigation in a rectangular shallow reservoir using UVP, LSPIV and numerical modelling, *Flow Meas. Instrum.* (19) 139-144.
- 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), 263-276.
- Lee, J. S., and P. Y. Julien (2006). Electromagnetic wave surface velocimetry, *J. Hydraul. Eng.*, 132(2), 146-153.
- Manes, D. Pokrajac, and I. K. McEwan. (2007). Double-averaged open channel flows with small relative submergence. *J. Hydr. Eng. ASCE*, 133 (8), 896-904.
- McKenna, S.P. and McGillis, W.R. (2004). The role of free-surface turbulence and surfactants in air-water gas transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, (47), 539-553.
- Moramarco, T., Barbetta, S., and Tarpanelli, A. (2017). From surface flow velocity measurements to discharge assessment by the entropy theory. *Water*, (9), 1-12.
- Muste, M., I. Fujita, and Hauet, A. (2008). Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments, *Water Resour. Res.*, (44), 1-14.
- Muste, M., H.-C. Ho, and D. Kim (2011). Considerations on direct stream flow measurements using video imagery: Outlook and research needs, *J. Hydroenviron. Res.*, 5(4), 289-300.
- Muste, M., Hauet, A., Fujita, I., Legout, C. and Ho, H. C. (2014). Capabilities of large-scale particle image velocimetry to characterize shallow free-surface flows. *Advances in Water Resources*, (70), 160-171.
- Novak, G., Rak, G., Prešeren, T. and Bajcar, T. (2017). Non-intrusive measurements of shallow water discharge. *Flow Measurement and Instrumentation* (56), 14-17.
- 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.
- Pagliara S, Das R, Carnacina I. (2008). Flow resistance in large-scale roughness condition. *Can J Civ Eng* 35(11), 1285-1293.
- Papanicolaou, A.N., D.C. Dermisis, and Elhakeem M. (2011). Investigating the role of clasts on the movement of sand in gravel bed rivers, *J. Hydraul. Eng. ASCE* (137), 871-883.
- Polatel, C. (2006) Signature of the roughness and the flow regime on the free surface. Ph.D. thesis, Univ. of Iowa, Iowa City.
- Raffel, M., C. E. Willert, S. T. Wereley, and J. Kompenhans (2007) *Particle image velocimetry. A Practical Guide*, N. Y: Springer
- Shin, S.S., Park, S.D., Lee, S.K. (2016). Measurement of flow velocity using video image of spherical float. *Procedia Engineering* (154), 885 - 889.
- Sutarto, T. E. (2015). Application of large scale

- particle image velocimetry (LSPIV) to identify flow pattern in a channel. *Procedia Engineering* (125), 213 – 219.
- Tamburrino, A., and Gulliver, J. S. (2007). Free-surface visualization of streamwise vortices in a channel flow. *Water Resour. Res.*, (43), 1-12.
- Tauro, F.; Porfiri, M.; Grimaldi, S. (2014). Orienting the camera and firing lasers to enhance large scale particle image velocimetry for streamflow monitoring. *Water Resour. Res.*, (50), 7470–7483.
- Thielicke, W. and Stamhuis, E. J. (2014) PIVlab- Time-resolved digital particle image velocimetry tool for MATLAB (version: 1.41).
- Weitbrecht, V., Kühn, G., and Jirka, G.H. (2002). Large scale PIV-measurements at the surface of shallow water flows, *Flow. Meas. Instrum.* (13), 237–245.
- Welber, M.; Le Coz, J.; Laronne, J.B.; Zolezzi, G.; Zamler, D.; Dramais, G.; Hauet, A.; Salvaro, M. (2016). Field assessment of noncontact stream gauging using portable surface velocity radars (SVR). *Water Resour. Res.*, (52), 1108–1126.