

# بررسی و حساسیت‌سنجی آزمایشگاهی قابلیت‌های روش سرعت-سنجی تصویری ذرات بزرگ مقیاس در تعیین دبی و میدان جریان

اشکان نوری<sup>۱</sup>، سیدحسین مهاجری<sup>۲\*</sup>، مصطفی نبی‌پور<sup>۳</sup>، محمدصادق خانی<sup>۴</sup>، مجتبی مهرآیین<sup>۵</sup>

۱- دانش‌آموخته دوره کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

۳- دانش‌آموخته دوره دکتری، گروه مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۴- دانش‌آموخته دوره کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

۵- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

hossein.mohajeri@khu.ac.ir

تاریخ پذیرش ۱۴۰۱/۰۹/۲۷

تاریخ دریافت ۱۴۰۱/۰۷/۲۷

## چکیده

به طور کلی، استفاده از روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات بزرگ مقیاس، برای برآورد پارامترهای دبی و میدان جریان، در مقیاس آزمایشگاهی و همچنین میدانی مورد استفاده قرار گرفته‌است. اما پردازش تصاویر نسبت به پارامترهای حائز اهمیت محیطی به خوبی مورد بررسی واقع نشده است. به بیان دقیق‌تر، اثر پارامترهای محیطی همچون موقعیت قرارگیری دوربین، ضریب سرعت و پنجره کاوش، حساسیت‌سنجی نشده‌اند. این پژوهش، بر مبنای روش‌های پردازش تصویر صورت گرفته‌است، که به واسطه آن دبی و میدان جریان محاسبه می‌شود. در این مطالعه، قابلیت‌های این رویکرد در مقیاس آزمایشگاهی نسبت به پارامترهای موثر محیطی، دقت‌سنجی شده‌اند. ارزیابی‌های این پژوهش نشان می‌دهد که پنجره کاوش به ابعاد ۲۰ پیکسل، نتایج بهتری را در عمق‌های مختلف ارائه می‌دهد. در ارتباط با موقعیت دوربین نیز، بررسی‌های این پژوهش بیانگر این است که قرارگیری دوربین به صورت مایل، نتایج بهتری را نسبت به حالت عمود ارائه می‌دهد. در خصوص ضریب سرعت نیز، بررسی‌ها نشانگر این است که ضریب بین ۰/۸۵ الی ۰/۹۰، بهترین نتایج را ارائه می‌دهد. نتایج پژوهش در شرایط آزمایشگاهی براساس عمق‌های ۱۲/۵، ۱۵/۵ و ۱۸/۵ سانتی‌متر، نشان می‌دهد که با استفاده از سیستم سرعت‌سنجی سطحی ذرات در مقیاس بزرگ، بنا به انتخاب شرایط بهینه انتخاب شبکه محاسباتی مناسب، موقعیت دوربین، انتخاب بهینه پنجره کاوش و مشخصات هیدرولیکی، همچنین انتخاب مناسب ضریب سرعت، مقادیر دبی و سرعت جریان را با دقت مطلوب برآورد می‌کند. مقادیر خطا نسبی دبی و سرعت جریان در این پژوهش، براساس رویکرد صورت گرفته، برای عمق‌های ۱۲/۵، ۱۵/۵ و ۱۸/۵ سانتی‌متر، به ترتیب معادل ۶/۵٪، ۳/۱٪ و ۲/۱٪ درصد است.

**واژگان کلیدی:** اندازه‌گیری دبی، سرعت‌سنجی تصویری ذرات، جریان کانال روباز، دوربین مداربسته، حساسیت‌سنجی

## ۱- مقدمه

ارتباط با چگونگی تغییرات دبی در طی وقوع سیلاب و رخدادهای ناشی از این تغییر دبی وجود دارد [1]. این نقصان به دلیل عدم وجود یک سیستم مناسب برای نظارت بر

با وجود انجام مطالعات مختلف در رابطه با فرآیندهای فیزیکی اثر سیلاب در مطالعات حوضه آبریز، فقدان اطلاعات در

چگونگی تغییرات ناشی از سیلاب و برآورد هیدروگراف ناشی از سیل است [2]. در حقیقت تعیین دبی نیازمند اندازه‌گیری هم‌زمان دو کمیت سرعت متوسط و عمق جریان است که هر دو این کمیت‌ها در زمان متغیر می‌باشند و اندازه‌گیری هم‌زمان این دو کمیت بسیار مشکل است. یکی دیگر از مفاهیم مهم در مدیریت بحران، مدیریت یکپارچه بحران است. این موضوع بدان معنی است در زمانی که سانحه‌ای مانند سیل روی می‌دهد، باید مدیران بحران از راه دور بر جنبه‌های مختلف بحران اشراف کاملی داشته باشند. بر همین اساس استفاده از دوربین‌های تصویربرداری به منظور کنترل و نظارت از راه دور بحران، به‌طور عمده مورد استفاده قرار می‌گیرند. کاربرد و رصد بی‌وقفه و از راه دور این دوربین‌ها امکان محاسبه دبی، سرعت متوسط و عمق جریان سیلاب را فراهم خواهد نمود. به جهت اهمیت اندازه‌گیری سرعت سطحی و دبی جریان، روش‌های گوناگونی برای اندازه‌گیری این پارامترها توسعه پیدا کرده است. دبی‌سنجی<sup>1</sup>، استفاده از ردیاب‌های شیمیایی<sup>2</sup> و تزریق جوهر<sup>3</sup> از مهم‌ترین و رایج‌ترین روش‌هایی هستند که به این منظور در برداشت‌های رودخانه‌ای و در مقیاس بزرگ مورد استفاده قرار می‌گیرند [3, 4]. همچنین می‌توان از ابزارهایی که بر اساس امواج صوتی و قانون داپلر<sup>4</sup> سرعت جریان را اندازه‌گیری می‌کنند، برای این منظور بهره برد [3]. به تازگی و با پیشرفت فناوری، روش‌های سنجش از راه دور نیز در این زمینه مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند. از میان این روش‌ها نیز می‌توان به حس‌گرهای ماکروویوی<sup>5</sup>، ماهواره‌ها<sup>6</sup> و رادارهای قابل حمل<sup>7</sup> اشاره نمود [5]. اغلب این روش‌ها نیز دارای معایب خاص خود است. قریب به اتفاق این روش‌ها بسیار پرهزینه بوده و مراقبت و کنترل ممتد در اندازه‌گیری با این وسایل غیرقابل اجتناب است. از سوی دیگر، استفاده از روش‌های دبی‌سنجی (استفاده از ابزارهایی مانند مولینه) و سرعت‌سنج‌های داپلری نیاز به ورود

بخشی از بدنه دستگاه به محیط برداشت دارند که با ورود حس‌گر در داخل جریان، شرایط فیزیکی سیال تغییر نموده و نتایجی که این روش‌ها گزارش می‌دهند، اغلب دارای یک خطای اجتناب‌ناپذیر ناشی از تغییر شرایط طبیعی جریان می‌باشند. علاوه بر این برای استفاده از ابزارهایی مانند مولینه، انجام واسنجی دوره‌ای لازم است.

در سال‌های اخیر دو رویکرد کلی برای به دست آوردن بردارهای سرعت سیال با استفاده از تصاویر دیجیتال متوالی ذرات ردیاب ابداع شده است.

۱- سرعت‌سنجی ردیابی ذرات<sup>۸</sup>: در این روش ذرات به صورت لاگرانژی دنبال شده و با استفاده از ردیابی ذرات متناظر در تصاویر متوالی، بردارهای سرعت نقاط مختلف حاصل می‌شود [6]. چون پیدا کردن ذرات متناظر در تصاویر متوالی مشکل است، این روش تنها در شرایط غلظت کم ذرات ردیاب قابل استفاده است و بر این اساس تعداد بردارهای حاصل از این روش در فضای مورد بررسی کم است. بردارهای سرعت حاصل از این روش دارای توزیع مکانی تصادفی خواهند بود و الگوی منظمی برای اطلاعات خروجی وجود نخواهد داشت.

۲- سرعت‌سنجی تصویری ذرات<sup>۹</sup>: در این روش، تصاویر به قطعات کوچک‌تری به نام سطوح کاوش تقسیم شده و بر اساس همبستگی پیوندی، بردار جابه‌جایی ذرات به دست می‌آید [7]. این روش برای غلظت‌های زیاد نیز قابل استفاده است و تعداد بردارهای به دست آمده در فضای مورد بررسی مناسب است. به دلیل تقسیم صفحه برداشت به نواحی مشخص، بردارهای سرعت حاصل از این روش دارای الگوی منظمی خواهند بود [8, 9]. هم‌اکنون روش PIV نقش مهمی در مطالعه ساختارهای زمانی- مکانی نوسانات سرعت و گردابه‌های منسجم دارد.

به منظور برآورد میزان خسارت‌های یک سیل، آگاهی از مشخصات جریان در رودخانه‌ها و کانال‌ها مانند سرعت سطحی آب از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. سرعت

6. Satellite  
7. Hand-held Radar  
8. Particle Tracking Velocimetry  
9. Particle Image Velocimetry

1. Flow Metering  
2. Chemical Tracers  
3. Dye Injection  
4. Doppler  
5. Microwave Sensors

سطحی نشان‌گر شدت سیل ناشی از یک بارش است [10]؛ علاوه بر این، سرعت سطحی در تعیین پخش و انتشار آلاینده‌ها، سازوکار فرسایش، و انتقال رسوب اهمیت دارد. با وجود اهمیت سرعت سطحی جریان، اندازه‌گیری آن در هنگام وقوع سیلاب از نبود یک روش اندازه‌گیری میدانی مناسب و کارا رنج می‌برد.

در سالیان اخیر، پیدایش روش‌های دیداری و نورانی<sup>۱</sup> موجب غلبه بر برخی از مشکلات بیان‌شده است. در روش‌های دیداری، از جریان آبراهه یا مسیل‌های شهری عکس‌برداری انجام می‌پذیرد و با استفاده از قوانین تشابه، قوانین فیزیک و الگوریتم‌های الگوشناسی، مشخصات کمی جریان مانند سرعت، دبی و حتی ویژگی‌های آشفتگی جریان تعیین می‌شود. در بین روش‌های دیداری و نورانی، روش نوینی تحت عنوان سرعت سنجی تصویری ذرات در مقیاس بزرگ<sup>۲</sup> وجود دارد که بیش از سایر روش‌ها مورد توجه قرار گرفته است [11]. خروجی اصلی اندازه‌گیری به این روش، سرعت دوبعدی جریان در سطح آب است که با دانستن و معلوم بودن پروفیل سرعت جریان در عمق و منحنی‌های کالیبراسیون موجود دبی متوسط جریان نیز برآورد می‌شود [12]. از مهم‌ترین ویژگی‌های این روش هزینه کم، قابلیت کاربرد در نقاط دور و خارج از دسترس، سادگی کار و عدم نیاز به تنظیم دقیق در محل برداشت، عدم نیاز به ورود دوربین به داخل جریان و تغییر شرایط فیزیکی جریان و نیز قابلیت برداشت مستمر است [13].

فوجیتا و کومورا روش سرعت‌سنجی سطحی ذرات در مقیاس بزرگ LSPIV را برای اولین بار توسعه دادند و این روش را به نام روش سرعت سنجی در مقیاس بزرگ نام‌گذاری کردند [14]. روش سرعت‌سنجی سطحی ذرات در مقیاس بزرگ یکی از شاخه‌های روش PIV<sup>۳</sup> است که به دلیل هزینه‌های کمتر (به دلیل عدم نیاز به نور لیزر و استفاده از دوربین‌های متداول تجاری) به‌طور قابل ملاحظه‌ای مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. به طور کلی روش LSPIV

شامل مراحل تصویربرداری، تصحیح تصاویر، استخراج بردارهای سرعت سطحی جریان و در نهایت تخمین دبی با استفاده از ضریب سرعت است. روش سرعت سنجی سطحی ذرات در مقیاس بزرگ (LSPIV) یک روش اندازه‌گیری سرعت جریان سطحی از راه دور است که ویژگی‌های امکان برداشت سرعت جریان را به صورت غیرتداخلی و پیوسته ایجاد می‌کند [15]. یکی از مهم‌ترین کاربردهای روش LSPIV برآورد دبی جریان در رودخانه‌ها به ویژه در زمان‌های سیلابی است. تارو و همکاران (۲۰۱۶) کاربرد سیستم LSPIV در مطالعه سیلاب در رودخانه تیر شهر رم را مورد بحث و بررسی قرار دادند. اطلاعات به دست آمده نشان داد که در زمان وقوع سیل، مقادیر سرعت به شدت در مکان تغییر می‌کنند. ایشان نتیجه‌گیری نمودند که این روش قابلیت کاربرد در شرایط دبی سیلابی را دارد [13]. جودیو و همکاران (۲۰۰۸) به اندازه‌گیری جریان در شرایط دبی زیاد جریان در مناطق کوهستانی ناشی از آزادکردن آب مخازن به روش LSPIV پرداختند [15]. برای به دست آوردن دبی با استفاده از سرعت سطحی جریان باید ضریب سرعت (نسبت سرعت متوسط به سرعت سطحی) را دانست؛ بسیاری از پژوهشگران مقدار این ضریب برای جریان‌های زیربحرانی در رودخانه‌ها و کانال‌های آزمایشگاهی برابر ۰/۸۵ بیان کردند. [15, 16].

یکی از کاربردهای LSPIV شناخت الگوی جریان، ویژگی‌های آشفتگی و ساختارهای منسجم دوبعدی در جریان‌های کم‌عمق است [17]، زیرا در جریان‌های کم‌عمق امکان استفاده از ابزارهای اندازه‌گیری مکانیکی و سرعت‌سنج‌های صوتی داپلر ADV با مشکل مواجه می‌شود و همچنین ساختارهای دوبعدی جریان، پدیده‌های غالب در جریان‌های کم‌عمق محسوب می‌شوند [17].

هارپولد و همکاران (۲۰۰۶) برای نخستین بار به بررسی دقت و کارایی روش LSPIV برای اندازه‌گیری دبی جریان در یک کانال مستقیم پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که دقت اندازه‌گیری تحت تأثیر تراکم ذرات ردیاب، نوسانات سطح آب و

اصلاح‌نشده، تصویر عمودشده می‌تواند برای اندازه‌گیری فواصل واقعی مورد استفاده قرار گیرد. زیرا تصویر عمودشده بازنمایی دقیقی از سطح زمین است که خطای جابه‌جایی ارتفاعی، خطای اعوجاج عدسی و خطای شیب دوربین، در آن سرشکن شده‌است. برای نمونه در یک تصویر عمودشده باید دو نقطه دارای مختصات مسطحاتی یکسان و با ارتفاع متفاوت (مانند نقاط بالا و پایین گوشه یک ساختمان)، روی هم قرار بگیرند. اما در یک تصویر اصلاح‌نشده این دو نقطه بر یکدیگر هماهنگ نمی‌شوند.

برای پردازش تصاویر، دو عکس متوالی با هم مقایسه شده و حرکت ذرات مورد بررسی قرار می‌گیرد. در روش PIV برخلاف روش ردیابی تک‌تک ذرات (روش لاگراژی)، حرکت یک دسته از ذرات بررسی می‌شود (روش اوپلری). برای یافتن بردارهای سرعت در دو تصویر متوالی باید به دنبال دسته ذرات مشابه در دو تصویر بود. در بررسی کمی برای یافتن بیشترین تشابه بین دو سطح کاوش، باید ماتریسی حتی‌الامکان مشابه ماتریس اول را در عکس دوم پیدا کرد. برای این منظور از رابطه همبستگی استفاده می‌شود. پس در ماتریس عکس دوم باید در جستجوی ماتریسی بود که بیشترین همبستگی را با پنجره کاوش اول داشته باشد. بر اساس فاصله بین مراکز دو ماتریس و مدت‌زمان تصویربرداری دو تصویر متوالی، می‌توان بردار سرعت نقطه مرکزی ماتریس اول را محاسبه نمود [20].

شکل ۱. همبستگی مکانی شدت نور ذرات بین دو تصویر متوالی برای یک پنجره کاوش

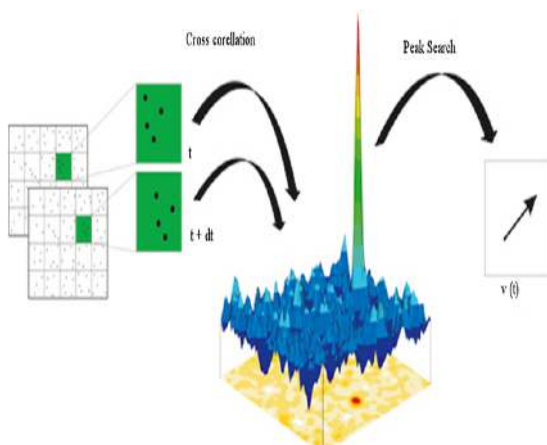


Fig.1. Spatial correlation of particle light intensity between two consecutive images for a scanning window

زاویه انحراف دوربین قرار دارد [18]، بررسی‌ها نشان داد که دبی برآوردی با این روش خطایی در حدود ۱۴ درصد دارد. موسته و همکاران خطای متوسط ۱۰ درصد و حداکثر خطای ۳۵ درصد را در اندازه‌گیری سرعت توسط روش LSPIV گزارش کردند. در این تحقیق با در نظر گرفتن ۲۷ منبع خطا و مقایسه نتایج با سایر روش‌های سرعت‌سنجی، میزان خطای اندازه‌گیری از ۳/۵ درصد در شرایط آزمایشگاهی ایده‌آل تا ۱۰ و یا حتی ۱۶ درصد در شرایط میدانی متفاوت بوده است [16]. هارپولد و همکاران (۲۰۰۶) در زمینه تأثیر زاویه محور دوربین نسبت به سطح آب بر دقت اندازه‌گیری سرعت سطحی با استفاده از روش LSPIV گزارش نمودند که باید از تصویربرداری از سطح جریان در زاویه‌های دوربین بزرگ‌تر از ۳۰ درجه نسبت به محور قائم خودداری کرد؛ زیرا تصحیح درهم‌بودن تصاویر در این شرایط دشوار است. در شرایط میدانی زوایای دوربین بین ۱۵ تا ۳۰ درجه نسبت به محور قائم توصیه شده است [18].

این سامانه از روش‌های پردازش تصویر بهره می‌برد که به کمک این روش سرعت سطحی و دبی جریان با دقت مطلوب اندازه‌گیری می‌شود. به بیان دیگر هدف اصلی مطالعه حاضر این است که؛ پارامترهای محیطی چون موقعیت دوربین، ضریب سرعت، ابعاد پنجره کاوش و ابعاد شبکه محاسباتی در محیط آزمایشگاه حساسیت‌سنجی و بررسی شوند. این امر در خصوص عمق‌های مختلف در شرایط برابر آزمایشگاهی ارزیابی می‌شوند.

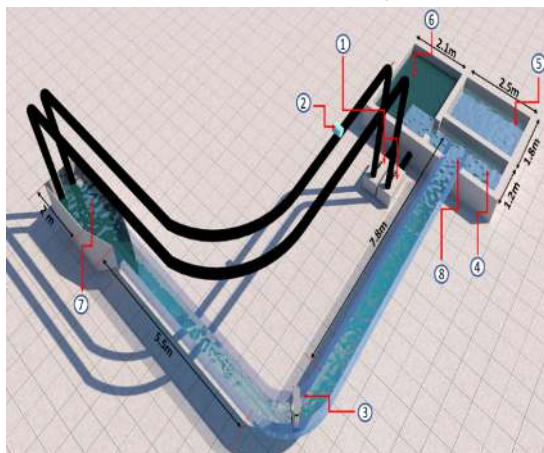
## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱ روش‌شناسی پژوهش

در روش LSPIV علاوه بر تصحیح تصاویر ناشی از درهم بودن عدسی، باید از یک تبدیل هندسی برای تصحیح تصاویر ناشی از زاویه مایل فیلم‌برداری نیز استفاده کرد؛ هر چه جسم در لحظه ثبت تصویر به دوربین نزدیکتر باشد، دارای مقیاس بزرگتری نسبت به اجسام دورتر است [19]. تصویر عمودشده تصویری است که تصحیح هندسی روی آن طوری انجام گرفته‌است و مقیاس آن یکنواخت است. بر خلاف عکس

۹۰° به شعاع ۱/۲ متر به یکدیگر متصل شده‌اند. عرض این کانال ۶۰ سانتی متر و ارتفاع آن ۷۰ سانتی متر است. همانگونه که در شکل زیر مشاهده می‌شود، جنس کف و دیواره‌های کانال از جنس شیشه است که کاملاً آب‌بندی شده و روی پایه‌های فلزی قرار گرفته است. پمپاژ آب از مخازن توسط دو پمپ مجزا از نوع EN100-250 از محصولات شرکت پمپ-ایران انجام می‌شود که هرکدام دارای دبی خروجی تقریبی ۴۰ لیتر در ثانیه است. برای اندازه‌گیری دبی جریان خروجی از دبی‌سنج الکترومغناطیسی مگاب-۳۰۰۰ استفاده شده است. همچنین برای تنظیم دبی به مقدار دلخواه از شیرهای تنظیم و شیرهای تخلیه استفاده شده است. جزییات سیستم کانال، مخازن و خطوط لوله در شکل (۲) قابل مشاهده است. کلیه آزمایش‌های انجام‌شده در این مطالعه با در نظر گرفتن شیب کانال معادل صفر در نظر گرفته شده‌است که به عبارتی این فاکتور جز یکی از محدودیت‌های پژوهش است.

شکل ۲. نمایی از کانال آزمایشگاهی مورد استفاده در مطالعه حاضر: (۱) پمپ‌ها، (۲) فلومتر، (۳) خم ۹۰ درجه، (۴، ۵ و ۶) مخازن ۱، ۲ و ۳، (۷) مخزن فلزی، (۸) سرریز قابل تنظیم



**Fig.2.** A view of the laboratory channel used in the present study: (1) pumps, (2) flowmeter, (3) 90degree bend, (4, 5 and 6) tanks 1, 2 and 3, (7) metal tank, (8) Adjustable overflow

## ۲-۳ تجهیزات مورد نیاز

دوربین‌هایی که در روش PIV استفاده می‌شوند، باید از نوع دیجیتال باشند تا خروجی آن به صورت اطلاعات عددی باشد. در این تحقیق یک دوربین از محصولات شرکت Goldeneye از نوع اسپید دام AHD مورد استفاده قرار

با محاسبه همبستگی یک پنجره کاوش در تصویر اول با پنجره های کاوش مختلف (محدود به پنجره جستجو) در تصویر دوم، می‌توان مقدار بیشینه همبستگی پنجره‌های مختلف را به دست آورد (شکل ۱). بدین ترتیب می‌توان فرض کرد که پنجره کاوش مورد بررسی در تصویر اول به پنجره کاوش با مقدار بیشینه همبستگی در تصویر دوم منتقل شده است. مراحل اندازه‌گیری سرعت، عمق و دبی جریان توسط دستگاه LSPIV بطور خلاصه عبارتند از:

- روشن کردن دوربین، حافظه و مودم از طریق اپلیکیشن
- انجام تنظیمات دوربین شامل سرعت و کیفیت فیلم-برداری، فوکوس و ... با استفاده از اپلیکیشن Super Live Plus
- اطمینان از اتصال اینترنت و دریافت تصاویر از طریق رایانه یا گوشی همراه
- ضبط فیلم از جریان آب در رودخانه یا کانال مورد نظر به صورت کنترل از راه دور با استفاده از اپلیکیشن Super Live Plus
- استخراج عکس از فیلم توسط نرم‌افزار Adobe Premiere
- انجام تصحیحات هندسی و ساخت تصاویر عمودشده و دارای مختصات توسط نرم‌افزار Fudaa-LSPIV
- محاسبه بردارهای سرعت سطحی جریان توسط نرم‌افزار Fudaa-LSPIV
- محاسبه عمق جریان با استفاده از تصاویر موجود از اشل-های نصب‌شده در کانال، رودخانه و یا آزمایشگاه مورد مطالعه و
- وارد نمودن عمق و مقطع جریان در نرم‌افزار Fudaa-LSPIV و محاسبه دبی جریان با استفاده از ضریب تبدیل سرعت سطحی به سرعت متوسط جریان

## ۲-۲ موقعیت کانال آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در کانال مستطیلی و افقی دارای خم در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه خوارزمی انجام شده است. طول کانال در قسمت مستقیم بالادست آن ۵/۵ متر و در قسمت مستقیم پایین دست آن ۷/۸ متر است. این دو کانال مستقیم توسط یک خم

ویدئو یا تصاویر متوالی با فاصله زمانی یکسان از سطح جریان است که باید توسط یک دوربین ثابت گرفته شده باشد. سرعت سطحی جریان توسط ذرات ردیاب یا امواج سطحی آب تعیین می‌شود. برای ساخت تصاویر عمود و دارای مختصات باید از نقاط مرجع قابل مشاهده روی تصاویر استفاده کرد. در این نرم‌افزار ۵ قدم کلی باید طی شود؛ الف) معرفی و وارد نمودن تصاویر متوالی (با فاصله زمانی یکسان) یا فیلم برداشت جریان به نرم‌افزار؛ ب) تصحیح تصاویر دارای اعوجاج پرسپکتیو و اختصاص اندازه متریک به پیکسل‌ها؛ ج) مشخص کردن ابعاد پنجره کاوش و جستجو، تعیین شبکه نقاط محاسباتی و محاسبه سرعت‌های سطحی جریان آب با استفاده از تجزیه و تحلیل آماری حرکت ذرات ردیاب توسط الگوریتم PIV، د) پس پردازش نتایج (اعمال فیلترها روی نتایج سرعت) و محاسبه میانگین زمانی بردارهای سرعت جریان؛ ه) محاسبه دبی جریان با استفاده از تعیین عمق جریان و معرفی مقطع و وارد نمودن ضریب تصحیح سرعت

### ۳- نتایج، بررسی و مقایسه

#### ۳-۱ شرایط هیدرولیکی انجام آزمایش‌ها

عمق جریان در کانال در سه حالت مختلف برابر ۱۲/۵، ۱۵/۵ و ۱۸/۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. در هر یک از این سه حالت، با استفاده از اندازه‌گیری عمق جریان در طول کانال، یکنواختی جریان در قسمت مستقیم کانال مورد تایید قرار گرفت. همچنین دبی عبوری از کانال برابر ۳۸/۵ لیتر در ثانیه در نظر گرفته شد. علت انتخاب این دبی، کارکرد مناسب پمپ موجود در این نقطه کاری و لرزش کمتر آن در هنگام پمپاژ بوده است. شرایط هیدرولیکی آزمایش به شکل خلاصه در جدول زیر ارائه شده است. با توجه به مقادیر عدد فرود و رینولدز، جریان در کانال دارای رژیم زیربحرانی و کاملاً آشفته است. شایان ذکر است در جدول (۱) برای محاسبه عدد رینولدز از شعاع هیدرولیکی به عنوان طول مشخصه استفاده شده است.

#### ۳-۲ بررسی اثر تراکم شبکه محاسباتی

برای بررسی اثر تراکم شبکه محاسباتی در نتایج دبی جریان، از دو شبکه محاسباتی ۸×۳۰ و ۱۵×۶۰ استفاده شد. در شکل ۴ بردارهای متوسط سرعت سطحی جریان در کانال برای عمق ۱۲/۵ سانتی‌متر نشان داده شده است. مقایسه نتایج مقادیر سرعت متوسط سطحی

گرفت. این دوربین دارای حسگر CMOS با بیشترین کیفیت ۵ مگاپیکسل (۱۹۳۶×۲۵۶۰ پیکسل) و عدسی با فاصله کانونی ۲/۸ میلی‌متر بوده که دارای قابلیت بزرگنمایی اپتیکی ۳۶ برابر، عمق میدان دید ۱۲۰ تا ۱۵۰ متر و امکان دید در شب به طول ۱۰۰ متر است. این دوربین با وزن حدود ۵ کیلوگرم دارای بدنه فلزی و پلاستیک ضد آب و قابلیت چرخش ۳۶۰ درجه افقی و ۹۳ درجه عمودی است. در شکل زیر تصاویری از چگونگی نصب این دوربین در شرایط آزمایشگاهی و میدانی ارائه شده است. پس از نصب و راه‌اندازی دوربین باید فیلم‌های برداشت شده را در یک حافظه مطمئن ذخیره نمود و سپس از طریق اینترنت به رایانه یا گوشی همراه منتقل کرد. برای ذخیره فیلم‌ها از دستگاه ذخیره‌ساز چهارکانال ۵ مگاپیکسل از محصولات شرکت Goldeneye با حجم ذخیره یک ترا بایت استفاده شد. با استفاده از یک مانیتور متصل به دستگاه ذخیره-ساز شکل (۳) در تلفن همراه می‌توان تصاویر برداشت شده را به صورت برخط مشاهده نمود.

شکل ۳. استفاده از یک مانیتور متصل به دستگاه ذخیره‌ساز برای مشاهده برخط تصاویر برداشت شده

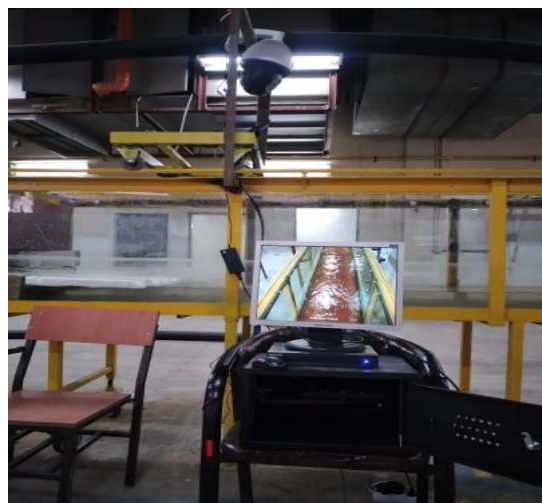


Fig. 3. Using a monitor connected to the storage device to view the captured images online

در این تحقیق برای انجام تصحیحات هندسی، مختصات دار نمودن تصاویر و استخراج بردارهای سرعت از نرم‌افزار Fudaa-LSPIV استفاده شده است. نرم‌افزار منبع-باز Fudaa-LSPIV در محیط نرم‌افزار جاوا نوشته شده و دارای رابط گرافیکی کاربرپسند است [21]. مهم‌ترین ورودی مورد نیاز این نرم‌افزار یک

Cross section (m) Flow depth (cm)	0.5	1.0	1.5
	12.5	36	34
15.5	37	37	38
18.5	41	27	45

**Table.2.** Calculated flow rate values in liters per second for the depth of 12.5, 15.5 and 18.5 cm at different points (using a 20 pixel scanning window)

### ۳-۳ بررسی اثر موقعیت نصب دوربین

در این مطالعه دو حالت متفاوت جانمایی دوربین (حالت مایل و عمود) بررسی شده است. در حالت مایل، دوربین در ابتدای کانال و در وسط عرض آبراهه نصب شده است. در این حالت از کل طول کانال (۵/۵ متر) حدود ۱/۸۴ متر از کانال تصویربرداری می‌شود. اما در حالت عمود، دوربین در اواسط کانال و در وسط عرض آبراهه نصب شده است. در این حالت معادل ۰/۹۲ متر از طول کانال تصویربرداری شده است. با دقت در این شکل می‌توان مشاهده نمود که در حالت عمود، لنز دوربین کاملاً رو به پایین و در حالت مایل، لنز به صورت مورب قرار داده شده است. عامل تاثیر شدت نور در این قسمت از پژوهش مورد ارزیابی واقع نشده است و این مورد می‌تواند جز یکی از محدودیت‌های پژوهش باشد.

در شکل (۵) بردارهای متوسط سرعت سطحی جریان در کانال آزمایشگاهی در عمق ۱۵/۵ سانتی‌متر برای دو موقعیت جانمایی دوربین (حالت مایل و عمود) ارائه شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود در حالت عمود در بسیاری از نقاط شبکه، مقادیر سرعت سطحی بسیار کوچک و نزدیک به صفر هستند که علت آن عدم انعکاس مناسب نور امواج سطحی آب در لنز دوربین است. به همین دلیل مقادیر دبی حاصل از جانمایی عمود دوربین بسیار کوچک و غیرواقعی می‌باشد. بدین ترتیب جانمایی مایل دوربین در این تحقیق مورد تایید قرار می‌گیرد.

شکل ۵ بررسی اثر موقعیت قرارگیری دوربین (۱) نصب در مرکز کانال به صورت عمودی (۲) نصب در ورودی کانال به صورت مایل؛ بردارهای متوسط سرعت سطحی جریان در کانال آزمایشگاهی در عمق ۱۵/۵ سانتی‌متر برای دو موقعیت جانمایی دوربین؛ حالت مایل (۳)، حالت عمود (۴)



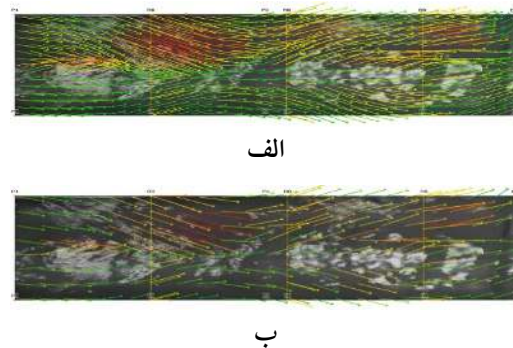
جریان در دو شبکه یادشده نشان می‌دهد که اختلاف آنها قابل توجه نیست و در نتیجه در ادامه در همه حالات از شبکه ۸×۳۰ استفاده شده است. نکته قابل توجه دیگر در این تصاویر آن است که با استفاده از روش LSPIV جریان‌های عرضی نیز به خوبی برداشت شده‌اند.

جدول ۱. شرایط هیدرولیکی آزمایش‌های انجام‌شده در کانال آزمایشگاهی

Flow depth (cm)	12.5	15.5	18.5
Discharge (Lit/Sec)	38.5	38.5	38.5
Channel width (cm)	60.0	60.0	60.0
Average speed (m/Sec)	0.34	0.41	0.51
Froude Number	-	0.26	0.34
Reynolds number	40000	42000	45000

**Table.1.** Hydraulic conditions of the tests performed in the laboratory channel

شکل ۴. بردارهای متوسط سرعت سطحی جریان در کانال آزمایشگاهی در عمق ۱۲/۵ سانتی‌متر برای دو شبکه محاسباتی ۱۵×۶۰ نقطه (تصویر الف) و ۸×۳۰ نقطه (تصویر ب)



**Fig. 4.** The average surface velocity vectors of the flow in the laboratory channel at a depth of 12.5 cm for two computational grids of 15 x 60 points (image a) and 8 x 30 points (image b)

شایان ذکر است محاسبه دبی در مقاطعی با فاصله‌های ۰/۵، ۱/۵ و ۱/۵ متر از ابتدای تصویر (سمت چپ تصویر) انجام شده است. در جدول (۲) مقادیر دبی محاسبه شده جریان برای عمق ۱۲/۵، ۱۵/۵ و ۱۸/۵ سانتی‌متر در هر یک از مقاطع یادشده (با استفاده از پنجره کاوش به ابعاد ۲۰ پیکسل) ارائه شده است.

جدول ۲. مقادیر دبی محاسبه شده جریان بر حسب لیتر بر ثانیه برای عمق ۱۲/۵، ۱۵/۵ و ۱۸/۵ سانتی‌متر در مقاطع مختلف (با استفاده از پنجره کاوش به ابعاد ۲۰ پیکسل)

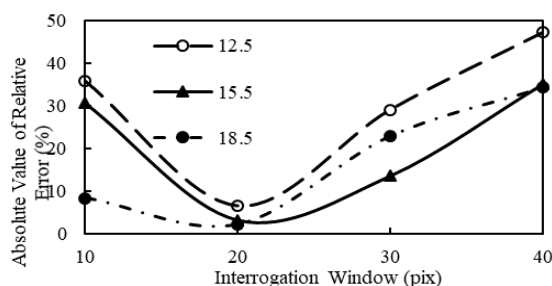
جدول ۴. میزان خطای نسبی اندازه‌گیری دبی جریان توسط روش سرعت سنجی تصویری بزرگ‌مقیاس در مقایسه با مقادیر دبی سنج الکترومغناطیسی

Flow depth (cm) exploration window (pixels)	12.5	15.5	18.5
10	35.8	30.6	-8.3
20	-6.5	-3.1	-2.1
30	-29.1	-13.5	-22.9
40	-47.3	-35.1	-34.3

**Table.4.** The relative error rate of the flow rate measurement by the large-scale image velocimetry method in comparison with the values of the electromagnetic flow meter

در شکل (۶) مقادیر قدر مطلق خطای نسبی اندازه‌گیری دبی جریان در کانال بر حسب ابعاد پنجره کاوش برای عمق‌های متفاوت ارائه شده است. با دقت در این شکل می‌توان دریافت که انتخاب ابعاد پنجره کاوش معادل ۲۰ پیکسل، کمترین خطای نسبی را در بین دیگر نتایج دارد. برای نمونه میزان خطای اندازه‌گیری و محاسبه دبی در حالت استفاده از پنجره کاوش با ابعاد ۳۰ پیکسل حدود ۴ تا ۱۱ برابر پنجره کاوش ۲۰ پیکسل است.

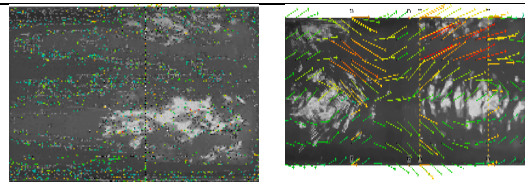
شکل ۶. قدر مطلق خطای نسبی اندازه‌گیری دبی جریان در کانال آزمایشگاهی بر حسب ابعاد پنجره کاوش برای عمق‌های مختلف



**Fig. 6.** The absolute value of the relative error of the flow rate measurement in the laboratory channel according to the dimensions of the exploration window for different depths

به همین ترتیب میزان خطای اندازه‌گیری و محاسبه دبی در حالت استفاده از پنجره کاوش با ابعاد ۴۰ پیکسل حدود ۷ تا ۱۶ برابر پنجره کاوش ۲۰ پیکسل است.

بدین ترتیب در این تحقیق ابعاد پنجره کاوش معادل ۲۰ پیکسل در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اینکه در این قسمت از مطالعه با دبی ثابت و عمق‌های متفاوت انجام شده است؛ نتایج ارزیابی شده نشان می‌دهد با سرعت‌های متفاوت، پنجره



**Fig. 5.** Examining the effect of camera positioning (1) installation in the center of the channel vertically (2) installation at the entrance of the channel obliquely; Average flow surface velocity vectors in the laboratory channel at a depth of 15.5 cm for two positions of the camera inclined mode (3), vertical mode (4)

شایان ذکر است که در حالت دوربین مایل که طول محدوده تصویربرداری حدود ۱/۸۴ متر بوده است، محاسبه دبی در مقاطعی با فاصله‌های ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر از ابتدای تصویر انجام شد، در حالی که در حالت عمود که طول محدوده تصویربرداری حدود ۰/۹۲ متر بوده است، محاسبه دبی تنها در یک مقطع با فاصله ۰/۵ متر از ابتدای تصویر صورت پذیرفت. لازم به ذکر است که آزمایش‌های صورت گرفته در این قسمت از مطالعه با فرض ثابت بودن منبع نوری است، که این نکته می‌تواند یکی از محدودیت‌های تحقیق باشد.

### ۳-۴ بررسی اثر ابعاد پنجره کاوش

در ارتباط با بررسی بیشتر در این تحقیق در خصوص ابعاد پنجره کاوش بر میزان خطای اندازه‌گیری دبی جریان مورد بررسی و بحث قرار گرفته است. در جداول (۳ و ۴) به ترتیب مقادیر دبی جریان و میزان خطای نسبی اندازه‌گیری برای عمق‌های مختلف ارائه شده است. میزان دبی جریان در جدول (۳) از متوسط مقادیر دبی محاسبه شده در مقاطع ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متری به دست آمده است.

جدول ۳. مقادیر دبی جریان اندازه‌گیری شده توسط روش سرعت‌سنجی تصویری بزرگ‌مقیاس بر حسب لیتر بر ثانیه

Flow depth (cm) exploration window (pixels)	12.5	15.5	18.5
10	52.3	50.3	35.3
20	36	37.3	37.7
30	27.3	33.3	29.7
40	20.3	25	25.3

**Table.3.** The flow rate values measured by the large-scale image velocimetry method in liters per second



شکل ۸. خطای نسبی اندازه‌گیری دبی جریان در کانال آزمایشگاهی برحسب عدد فرود برای ابعاد پنجره کاوش متفاوت

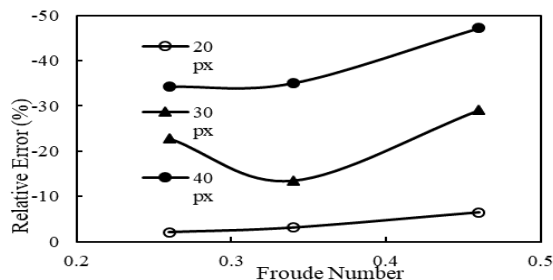


Fig. 8. The relative error of flow rate measurement in the laboratory channel in terms of Froude number for different dimensions of the exploration window

### ۳-۶ تحلیل حساسیت روی ضریب سرعت

با بررسی کمی مقادیر در جدول (۵) می‌توان دریافت که متوسط میزان قدر مطلق خطای نسبی اندازه‌گیری دبی جریان برای ضرایب سرعت ۰/۸، ۰/۸۵، ۰/۹، ۰/۹۵ و به ترتیب برابر ۰/۹، ۰/۹۵، ۰/۹۵، ۰/۹ و ۰/۸۵ درصد است. بنابراین ضرایب تبدیل سرعت در بازه ۰/۸۵ تا ۰/۹ بهترین نتیجه را به دست می‌دهند.

با دقت در نمودار شکل (۹) می‌توان دریافت که خطای اندازه‌گیری دبی جریان برای ضرایب تبدیل سرعت در بازه ۰/۸۵ تا ۰/۹ دارای کمترین مقادیر بوده و با نزدیک شدن ضرایب تبدیل سرعت به ۰/۸ و ۰/۹۵، مقادیر خطا به شدت افزایش می‌یابد. مقادیر ضریب سرعت برای سه عمق مختلف در ضریب سرعت حدود ۰/۸۸ دارای دقت یکسانی هستند. از این منظر شاید بتوان ضریب سرعت ۰/۸۸ را به عنوان ضریب تبدیل سرعت مناسب انتخاب نمود.

جدول ۵. میزان خطای نسبی اندازه‌گیری دبی جریان توسط روش سرعت‌سنجی تصویری بزرگ‌مقیاس برای ضرایب تبدیل سرعت مختلف

Flow depth (cm)	12.5	15.5	18.5
Coefficient			
flow velocity			
0.8	-12	-8.8	-7.8
0.85	-6.5	-3.1	-2.1
0.9	-1	2.6	3.7
0.95	4.5	8.3	9.4

Table 5. The relative error rate of flow rate measurement by large-scale image velocimetry method for different speed conversion coefficients

۲۰ پیکسل در مطالعات آزمایشگاهی قابل اعتمادتر می‌باشد و با توجه به اینکه بررسی و حساسیت‌سنجی صورت گرفته در عمق‌های مختلف صورت گرفته است می‌توان نتایج را برای سایر عمق‌ها در مطالعات آزمایشگاهی گسترش داد.

### ۳-۵ بررسی اثر مشخصات هیدرولیکی جریان

در شکل (۷) خطای نسبی اندازه‌گیری دبی جریان در کانال بر حسب عمق جریان برای ابعاد پنجره کاوش مختلف ارائه شده است.

شکل ۷. خطای نسبی اندازه‌گیری دبی جریان در کانال آزمایشگاهی برحسب عمق جریان برای ابعاد پنجره کاوش مختلف

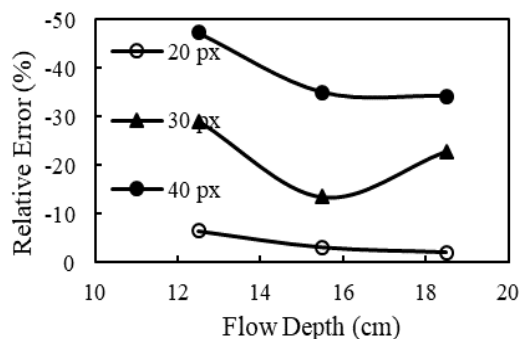


Fig. 7. The relative error of flow rate measurement in the laboratory channel according to the flow depth for different dimensions of the exploration window

همان‌گونه که گفته شد کمترین میزان خطا مربوط به ابعاد پنجره کاوش ۲۰ پیکسل است. اما با دقت در این شکل می‌توان دریافت که به‌طور کلی با افزایش عمق جریان، میزان خطای نسبی اندازه‌گیری دبی کاهش می‌یابد. برای مقایسه دقیق‌تر برای ابعاد پنجره کاوش ۲۰ پیکسل، خطای نسبی در عمق ۱۲/۵ سانتی‌متر حدوداً ۳ برابر عمق ۱۸/۵ سانتی‌متر است. این نسبت برای ابعاد پنجره کاوش ۳۰ و ۴۰ پیکسل به ترتیب برابر ۱/۳ و ۱/۴ است.

برای بررسی بیشتر در شکل (۸) مقادیر خطای نسبی اندازه‌گیری دبی جریان در کانال بر حسب عدد فرود جریان برای ابعاد پنجره کاوش مختلف ارائه شده است. با دقت در این شکل می‌توان دریافت که به‌طور کلی با افزایش عدد فرود جریان، میزان خطای نسبی اندازه‌گیری دبی افزایش می‌یابد.

شکل ۹. مقادیر مطلق خطا نسبی برحسب ضریب سرعت در عمق‌های مختلف

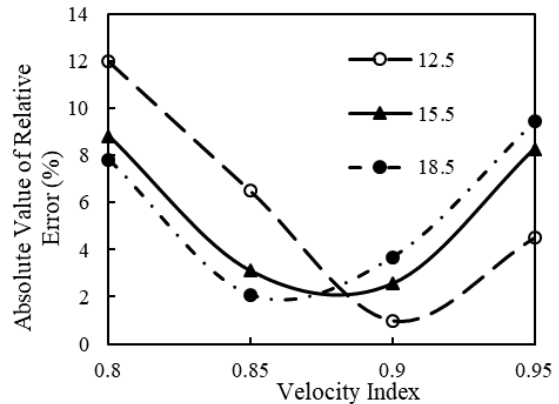


Fig. 9. absolute absolute relative error according to the velocity coefficient at different depths

#### ۴- نتیجه‌گیری

هدف اصلی این پژوهش، بررسی حساسیت‌سنجی رویکرد سرعت‌سنج تصویری ذرات در مقیاس بزرگ در یک مطالعه آزمایشگاهی است. در این پژوهش، قابلیت‌های این تکنیک نسبت به پارامترهای محیطی ارزیابی شده است و در ادامه، اثر هر کدام از این پارامترها بر اساس نتایج بیان می‌شود.

در خصوص تراکم شبکه محاسباتی، مقایسه نتایج نشان می‌دهد که مقادیر سرعت متوسط سطحی جریان در دو شبکه یادشده یعنی  $8 \times 30$  و  $15 \times 60$ ، اختلاف آنها قابل توجه نیست و در نتیجه در همه حالات از شبکه  $8 \times 30$  استفاده شده است. نکته قابل توجه دیگر در این تصاویر آن است که با استفاده از روش LSPIV، جریان‌های عرضی نیز به خوبی برداشت شده‌اند.

در ارتباط با بررسی اثر موقعیت دوربین، همان‌گونه که مورد بحث واقع شد، در حالت عمود در بسیاری از نقاط شبکه، مقادیر سرعت سطحی بسیار کوچک و نزدیک به صفر می‌باشند که علت آن، عدم انعکاس مناسب نور امواج سطحی آب در لنز دوربین می‌باشد. به همین دلیل، مقادیر دبی حاصل از جانمایی عمود دوربین بسیار کوچک و غیر واقعی می‌باشد. بدین ترتیب، جانمایی مایل دوربین در این تحقیق مورد تایید قرار می‌گیرد.

در خصوص نتایج پنجره کاوش، می‌توان دریافت که انتخاب ابعاد پنجره کاوش معادل ۲۰ پیکسل، کمترین خطای نسبی را در بین دیگر نتایج دارد.

در ارتباط با مشخصات هیدرولیکی جریان، همان‌گونه که گفته شد، کمترین میزان خطا مربوط به ابعاد پنجره کاوش ۲۰ پیکسل می‌باشد که به‌طور کلی با افزایش عمق جریان، میزان خطای نسبی اندازه‌گیری دبی کاهش می‌یابد. برای مقایسه دقیق‌تر برای ابعاد پنجره کاوش ۲۰ پیکسل، خطای نسبی در عمق ۱۲/۵ سانتی‌متر حدوداً ۳ برابر عمق ۱۸/۵ سانتی‌متر است. این نسبت برای ابعاد پنجره کاوش ۳۰ و ۴۰ پیکسل به ترتیب برابر ۱/۳ و ۱/۴ است.

در ارتباط با تحلیل حساسیت بر روی ضریب سرعت نیز با بررسی کمی مقادیر، می‌توان دریافت که متوسط میزان قدر مطلق خطای نسبی اندازه‌گیری دبی جریان برای ضرایب سرعت ۰/۸، ۰/۸۵، ۰/۹، ۰/۹۵ و به ترتیب برابر ۹/۵، ۳/۹، ۲/۴ و ۷/۴ درصد می‌باشد. بنابراین، ضرایب تبدیل سرعت در بازه ۰/۸۵ تا ۰/۹ بهترین نتیجه را به دست می‌دهند.

به‌طور کلی با بررسی و مقایسه پارامترهای بحث‌شده در پژوهش و انتخاب موارد بهینه، می‌توان نشان داد که به واسطه کارکرد سیستم سرعت‌سنج سطحی تصویری در مقیاس بزرگ، می‌توان مقادیر دبی و سرعت جریان را با دقت مطلوبی برآورد کرد. این امر در این مطالعه در یک کانال آزمایشگاهی در عمق‌های ۱۲/۵، ۱۵/۵ و ۱۸/۵ ترسیم شده است و نتایج نشان داده است که روش سرعت‌سنج تصویری ذرات به‌عنوان یک روش غیر تماسی و غیر مخرب، به‌خوبی برای اندازه‌گیری دبی و سرعت جریان در مقیاس بزرگ مناسب است.

#### ۵- اعلام تعارض منافع

نویسندگان این پژوهش اعلام می‌کنند که هیچ نوع تعارض منافی وجود ندارد.

#### ۶- مراجع

- [1] Perks, M., A. Russell, and A.G (2016). Large, Advances in flash flood monitoring using UAVs. *Hydrology and Earth System Sciences*,. 20(1): p. 1-1.

- [12] Fujita, I. and Y. Kunita (2011). Application of aerial LSPIV to the 2002 flood of the Yodo River using a helicopter mounted high density video camera. *Journal of Hydro-environment Research*, 5(4) p. 323-331.
- [13] Tauro, F., et al (2016). Flow monitoring with a camera: a case study on a flood event in the Tiber river. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(2): p. 1-11.
- [14] Fujita, I. and S. Komura (1994). Application of video image analysis for measurements of river-surface flows. *Proceedings of hydraulic engineering*, 38: p. 733-738.
- [15] Jodeau, M., et al (2008). Application and evaluation of LS-PIV technique for the monitoring of river surface velocities in high flow conditions. *Flow Measurement and Instrumentation*, 19(2): p. 117-127.
- [16] Muste, M., H.-C. Ho, and D. Kim (2011). Considerations on direct stream flow measurements using video imagery: Outlook and research needs. *Journal of Hydro-environment Research*, 5(4): p. 289-300.
- [17] Weitbrecht, V., G. Kühn, and G. Jirka (2002). Large scale PIV-measurements at the surface of shallow water flows. *Flow Measurement and Instrumentation*, 13(5-6): p. 237-245.
- [18] Harpold, A., et al (2006). Stream discharge measurement using a large-scale particle image velocimetry (LSPIV) prototype. *Transactions of the ASABE*, 49(6): p. 1791-1805.
- [19] Soloff, S.M., R.J. Adrian, and Z.-C. Liu (1997). Distortion compensation for generalized stereoscopic particle image velocimetry. *Measurement science and technology*, 8(12): p. 1441.
- [20] Raffel, M., C.E. Willert, and J. Kompenhans (1998). Particle image velocimetry: a practical guide. Vol. 2.: Springer.
- [21] Jodeau, M., et al (2019). Fudaa-LSPIV Version 1.7. 1 User Manual. Lyon: IRSTEA France.
- [2] Braud, I., et al (2014). Multi-scale hydrometeorological observation and modelling for flash flood understanding. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(9): p. 3733-3761.
- [3] Mohajeri S. H (2018). Determination of the Longitudinal Velocity Profile of Turbulent Flow over Rough Beds Using Double Averaging Method. *Modares Civil Engineering journal*.vol. 18, no. 4, pp. 265-276., (In Persian).
- [4] de Lima, J.L. and J.R (2014). Abrantes, Using a thermal tracer to estimate overland and rill flow velocities. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(10): p. 1293-1300.
- [5] Farina, G., et al (2014). Three methods for estimating the entropy parameter M based on a decreasing number of velocity measurements in a river cross-section. *Entropy*, 16(5): p. 2512-2529.
- [6] Jolley, M.J., et al (2021). Considerations When Applying Large-Scale PIV and PTV for Determining River Flow Velocity. *Frontiers in Water*,.
- [7] Safarzadeh, Z. and a. Safarzadeh (2016). Experimental Study of Turbulent Flow Structures in Two Groyne Field using PIV Method. *Modares Civil Engineering journal*, 16(1): p. 69-80. (In Persian).
- [8] Safarzadeh.A , Salehi S.A (2014). Hydrodynamic study of the mixing layer surrounded by a shallow flow separation zone using the SPIV method - Part 1: Medium flow structure, *Hydraulic magazine\_8*(1), 39-56. (In Persian).
- [9] Safarzadeh.A , Salehi S.A (2014). Hydrodynamic study of the mixing layer surrounded by a shallow flow separation zone using the SPIV method - Part 2: Characteristics of turbulence, momentary and spatial structures, *Hydraulic magazine*, 8(1), pp. 57-72. (In Persian).
- [10] Bras, R.L (1990). Hydrology: an introduction to hydrologic science.: Addison Wesley Publishing Company.
- [11] Creutin, J., et al (2003). River gauging using PIV techniques: a proof of concept experiment on the Iowa River. *Journal of Hydrology*, 277(3-4): p. 182-194.

# Sensitivity analysis of Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) in laboratory scale

Ashkan Noori<sup>1</sup>, Seyed Hossein Mohajeri<sup>2</sup>, Mostafa Nabipour<sup>3</sup>, Mohammad Sadegh Khani<sup>1</sup>,  
Mojtaba Mehraein<sup>4</sup>

1. Master graduate, Department of Civil Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran
2. Assistant professor of Civil Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran
3. PhD graduate, Department of Civil and Environmental Engineering, Technical and Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
4. Associate professor of Civil Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran

## Abstract

Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) is an optical measurement technique that has gained popularity in recent years due to its ability to estimate flow parameters such as discharge and velocity. In this study, we investigated the influence of environmental parameters on the accuracy of LSPIV measurements in laboratory-scale experiments. We conducted experiments in a laboratory flume with varying camera positions, camera tilt angles, window sizes, and flow coefficients. We utilized image processing methods to calculate the discharge and velocity fields and evaluated the accuracy of LSPIV measurements at different depths.

Our results showed that the optimal window size for LSPIV measurements was 20 pixels. This finding was consistent with previous studies that demonstrated that larger window sizes can lead to underestimation of velocity values due to the smoothing effect of the averaging process. A smaller window size helps in capturing more details of the flow field, which leads to more accurate velocity estimation. Regarding camera position, we found that tilted camera angles provided more accurate results compared to vertical camera positions. This finding was attributed to the fact that tilted cameras can capture more particles and have a better view of the flow structure, resulting in more accurate velocity measurements. This finding is consistent with previous studies that have shown that the camera position and angle can significantly impact the accuracy of LSPIV measurements. The flow coefficient is a dimensionless parameter that describes the relationship between the velocity of the flow and the velocity of the particles. In our study, we investigated the influence of the flow coefficient on the accuracy of LSPIV measurements. We found that the optimal flow coefficient was between 0.85 and 0.90. Selecting an appropriate flow coefficient is essential for accurate LSPIV measurements, and our findings are consistent with previous studies that have shown the importance of selecting an appropriate flow coefficient. Furthermore, we evaluated the effect of the depth of the flow on the accuracy of LSPIV measurements. Our results showed that LSPIV measurements were accurate at depths of 12.5, 15.5, and 18.5 cm, with relative error values of 6.5%, 3.1%, and 2.1%, respectively.

These findings demonstrate the potential of LSPIV as an accurate and effective technique for estimating flow parameters at different depths in laboratory and field-scale studies. Our findings can be used to optimize LSPIV measurements in laboratory and field-scale studies. We highlight the importance of selecting appropriate environmental parameters to obtain accurate LSPIV measurements and provide recommendations for the optimal selection of these parameters. By selecting appropriate computational network, camera position, optimal window size, hydraulic characteristics, and flow coefficient, the LSPIV system can accurately estimate discharge and velocity values in laboratory conditions. Future studies can explore the influence of other environmental parameters, such as lighting conditions and particle seeding density, on the accuracy of LSPIV measurements.

**Keywords:** Flow measurement, particle image velocity measurement, open channel flow, CCTV, sensitivity measurement