

(OPEN ACCESS)

Estimation of flow discharge and lateral velocity distribution of rivers in flood conditions with image processing of UAV (Unmanned Aerial vehicle)

Ehsan Ghasemi¹, Abdolreza Zahiri^{*2}, Mohsen Lashkarbolok³,
Khalil Ghorbani⁴, Farhad Akbarpoor⁵

1. Ph.D. Student in Water Structures, Dept. of Water Sciences and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: ghasemi_e67@yahoo.com
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Water Sciences and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: azahiri@gau.ac.ir
3. Assistant Prof., Dept. of Civil Engineering, Golestan University, Gorgan, Iran. E-mail: m.lbolok@gu.ac.ir
4. Professor, Dept. of Water Sciences and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: ghorbani.khalil@gau.ac.ir
5. Manager of Shahriar Water Resources Bureau, Tehran Regional Water Company, Tehran, Iran. E-mail: farhad.akbarpoor@gmail.com

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Full Paper	Background and Objectives: River flooding is a natural phenomenon that can have devastating effects on human life and cause significant economic losses. Determining flood flow discharge is crucial in hydraulic and hydrological studies, as well as in the design of water structures along the river. Various approaches exist for studying river flooding and determining flow discharge, each with its own errors and limitations. Estimation of flow discharge at hydrometric stations using the stage-discharge relationship has always been one of the most prominent methods for determining river flow discharge, But the basic and important limitation of this method is that for flood discharges, it must be extrapolated from the curve, which is associated with error and uncertainty. Also, another method such as the velocimeters and the acoustic doppler devices, are not only risky but also very costly and time-consuming in natural river flow conditions and especially during floods. Using velocity measurement methods based on surface flow imaging is an approach that has gained attention as a non-contact method in open channel flows. In this study, a new Particle Image Velocimetry (PIV) technique using drone images has been used, which accurately, quickly, and without contact and disturbance to the water flow pattern, calculates the lateral velocity distribution and flow discharge during river floods.
Article history: Received: 10.27.2024 Revised: 02.26.2025 Accepted: 04.12.2025	
Keywords: Drone, Flood discharge, Image processing, Lateral velocity distribution, PIVLAB	
	Materials and Methods: To achieve the research objectives, drone filming was conducted at the Ziarat River section at its confluence with the Qara-Tappeh River during the May 2023 flood. In this way, the imaging of the river flow surface at a height of 40 meters was performed by a UAV vertically for 40 seconds at a frequency of 30 frames per second using a drone. After processing the images in PIVLAB software within the MATLAB environment, the surface velocity of the flow in the cross section of the river was calculated and finally the lateral

velocity distribution and river flow discharge under flood conditions were calculated using the velocity-area method and compared with the measured data.

Results: In this study, the velocity index (k) was used to measure the discharge and convert the surface velocity to the average velocity of the section using image-based tracking methods. With the help of this method, the lateral velocity distribution and flow discharge in the river under flood conditions without contact with the flow in a section was investigated using two algorithms defined in PIVLAB, the results of which show high accuracy in estimating the flow discharge and the lateral velocity distribution in the studied section with this method. so that the flow discharge was estimated and calculated with an error of about 3.5% and the average cross-sectional velocity distribution with an error of about 7%.

Conclusion: Based on the results obtained and considering that accurate measurement of river flood flow in a short time is of particular importance, processing drone images to estimate river flow and also the lateral distribution of river velocity can be an effective measure in this regard.

Cite this article: Ghasemi, Ehsan, Zahiri, Abdolreza, Lashkarbolok, Mohsen, Ghorbani, Khalil, Akbarpoor, Farhad. 2025. Estimation of flow discharge and lateral velocity distribution of rivers in flood conditions with image processing of UAV (Unmanned Aerial vehicle). *Journal of Water and Soil Conservation*, 32 (3), 89-111.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwsc.2026.22912.3769

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

تخمین دبی جریان و توزیع عرضی سرعت رودخانه در شرایط سیلاب با پردازش تصاویر پهپادی

احسان قاسمی¹، عبدالرضا ظهیری^{2*}، محسن لشکرلوک³، خلیل قربانی⁴، فرهاد اکبرپور⁵

1. دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: ghasemi_e67@yahoo.com
2. نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: azahiri@gau.ac.ir
3. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران. رایانامه: m.lbolok@gu.ac.ir
4. استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: ghorbani.khalil@gau.ac.ir
5. مدیر امور آب شهریار، شرکت آب منطقه‌ای تهران، تهران، ایران. رایانامه: farhad.akbarpoor@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی - پژوهشی	سابقه و هدف: طغیان رودخانه‌ها یک پدیده طبیعی است که اثرات مخربی بر زندگی انسان داشته و زیان‌های اقتصادی زیادی به بار می‌آورد. تعیین دبی جریان سیلاب در مطالعات هیدرولیکی و هیدرولوژیکی و نیز طراحی سازه‌های آبی در مسیر رودخانه از اهمیت بالایی برخوردار است. رویکردهای مختلفی در مطالعه طغیان رودخانه‌ها و همچنین تعیین دبی سیلاب وجود دارد که هرکدام از آن‌ها دارای خطاها و محدودیت‌هایی هستند. تخمین دبی جریان در ایستگاه‌های هیدرومتری با استفاده از منحنی دبی - اشل همواره یکی از بارزترین روش‌های تعیین دبی جریان رودخانه‌ها است، اما محدودیت اساسی و مهم این روش این است که برای دبی‌های سیلابی باید از منحنی، برونیابی شود که این روند با خطا و عدم قطعیت همراه است. همچنین روش‌های دیگر، مانند دستگاه سرعت‌سنج مولینه و دستگاه آگوستیک داپلر در شرایط جریان طبیعی رودخانه و به‌ویژه در مواقع سیلابی، علاوه بر مخاطره‌آمیز بودن، بسیار پرهزینه و زمان‌بر است. استفاده از روش‌های سرعت‌سنجی مبتنی بر تصویربرداری از سطح جریان ازجمله رویکردهایی است که اخیراً به‌عنوان یک روش غیرتماسی در مجاری روباز موردتوجه قرار گرفته است. در این پژوهش از تکنیک جدید سرعت‌سنجی تصویری ذرات (PIV) با استفاده از تصاویر پهپادی استفاده شده است که با دقتی مناسب، سریع و بدون تماس با جریان و اختلال در الگوی جریان آب، توزیع عرضی سرعت و همچنین دبی جریان را در مواقع سیلابی رودخانه محاسبه می‌کند.
تاریخ دریافت: 03/08/06 تاریخ ویرایش: 03/12/08 تاریخ پذیرش: 04/01/23	
واژه‌های کلیدی: پردازش تصاویر، پهپاد، توزیع عرضی سرعت، دبی سیلاب، PIVLAB	

مواد و روش‌ها: برای دستیابی به اهداف پژوهش، اقدام به فیلم‌برداری با استفاده از پهپاد از مقطع رودخانه زیارت در محل تلاقی با رودخانه قره‌تپه (استان گلستان) در سیلاب اردیبهشت ۱۴۰۳ شد. بدین ترتیب که تصویربرداری از سطح جریان رودخانه در ارتفاع ۴۰ متری به‌وسیله پهپاد و به‌صورت کاملاً عمودی به‌مدت ۴۰ ثانیه با فرکانس ۳۰ فریم بر ثانیه صورت گرفت. پس از انجام عملیات پردازش تصاویر در نرم‌افزار PIVLAB در محیط MATLAB، سرعت سطحی جریان در مقطع عرضی رودخانه محاسبه شد و در نهایت توزیع عرضی سرعت و دبی جریان رودخانه در شرایط سیلابی با استفاده از روش سرعت-مساحت محاسبه و با داده‌های اندازه‌گیری شده مقایسه شد.

یافته‌ها: در این مطالعه برای اندازه‌گیری دبی و تبدیل سرعت سطحی به‌سرعت متوسط مقطع با روش‌های ردیابی مبتنی بر تصویر، از شاخص سرعت (k) استفاده گردید. به‌کمک این روش توزیع عرضی سرعت و دبی جریان در رودخانه در شرایط سیلابی بدون تماس با جریان در یک مقطع با استفاده از دو الگوریتم تعریف‌شده در PIVLAB موردبررسی قرار گرفت که نتایج آن نشان‌دهنده دقت بالای هر دو الگوریتم در برآورد دبی جریان و توزیع عرضی سرعت در مقطع مورد مطالعه بود به‌طوری‌که دبی و سرعت متوسط جریان به ترتیب با خطای نسبی حدود ۳/۵ و ۷ درصد برآورد و محاسبه گردیدند.

نتیجه‌گیری: براساس نتایج به‌دست آمده و با توجه به این‌که اندازه‌گیری دقیق دبی جریان سیلابی رودخانه‌ها در زمان کوتاه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، عملیات پردازش تصاویر پهپادی جهت تخمین دبی جریان رودخانه و همچنین توزیع عرضی سرعت رودخانه، می‌تواند اقدام مؤثری در این زمینه باشد.

استناد: قاسمی، احسان، ظهیری، عبدالرضا، لشکرلوک، محسن، قربانی، خلیل، اکبرپور، فرهاد (۱۴۰۴). تخمین دبی جریان و توزیع عرضی سرعت رودخانه در شرایط سیلاب با پردازش تصاویر پهپادی. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۳۲ (۳)، ۱۱۱-۸۹.

DOI: 10.22069/jwsc.2026.22912.3769



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

تقاضاهای جدید به منابع آب سطحی که ناشی از افزایش جمعیت و افزایش استانداردهای زندگی جهانی است و همچنین بروز حوادث طبیعی مانند سیل و خشکسالی، مدیران آب را ملزم به بهبود روشهای اندازهگیری جریان رودخانهها نموده است. اندازهگیری دبی جریان رودخانهها به دلیل اهمیت آن در بسیاری از مباحث هیدرولیکی، هیدرولوژیکی و ژئومورفولوژیکی برای درک ویژگیهای حوضههای رودخانهای و سازگاری آنها با تغییرات اقلیمی، یکی از وظایف اصلی در هیدرومتری است. برای دستیابی به این هدف، به ابزار و روشهای دقیق اندازهگیری جریان نیاز است تا بتوان دبی و سرعت جریان را با هزینه کمتر، سریعتر و با اثرات زیست محیطی کمتر اندازهگیری نمود. تاکنون با پیشرفتهای جدید و در حال ظهور، روشها و ابزار مختلفی برای اندازهگیری دبی آبهای سطحی و دینامیک جریان رودخانهها ارائه شده است.

تجهیزات اندازهگیری کنونی از دقت مناسبی در اندازهگیری متغیرهای جریان مثل سرعت لحظه‌ای برخوردار هستند اما این تجهیزات، سرعت جریان را عموماً به صورت نقطه‌ای اندازهگیری کرده و با توجه به سریع بودن فرآیندهای جریان، اندازهگیری میدان سرعت امکان‌پذیر نیست (1). اکثر این رویکردها براساس روش سرعت - مساحت برای اندازهگیری دبی با تکیه بر اطلاعات مربوط به سرعت جریان و سطح مقطع رودخانه است. در کانالهای باز اندازهگیری مستقیم عمق و سرعت جریان در مقطع رودخانه به خصوص در مواقع سیلابی می‌تواند بسیار پرهزینه و دشوار باشد (2 و 3). منحنیهای دبی - اشل به‌طور گسترده‌ای برای تخمین جریان مجاری باز استفاده شده است. با این حال، نتایج به‌دست‌آمده از منحنیهای دبی - اشل به دلیل منابع مختلف خطا مانند

تغییرات مقطع عرضی رودخانه، می‌تواند غیرقابل اعتماد باشد و همچنین از آنجایی که این منحنیها با استفاده از دادههای به‌دست‌آمده در محدوده دبیهای پایین تا متوسط ایجاد می‌شوند، در شرایط جریان سیلابی، ممکن است نادرست باشند (4 و 5). اغلب برآورد دبی بر مبنای رابطه یک‌به‌یک دبی - اشل و یا منحنی سنجه جریان دائمی است که بر پایه اندازهگیری هم‌زمان تراز سطح آب و دبی است و تراز اندازهگیری شده مستقیم با استفاده از منحنی سنجه به دبی تبدیل می‌شود. چنین رویکردی را می‌توان برای رودخانهها در شرایط جریان پایدار مناسب دانست که به‌طور عمده در رودخانههایی با شیب زیاد این‌گونه است. درحالی‌که در زمان طغیان رودخانه منحنیهای سنجه به‌صورت حلقوی درمی‌آیند (6). این بدان معناست که منحنی سنجه جریان دائمی برای توصیف رابطه واقعی دبی - اشل کافی و مناسب نیست. بررسی و ارزیابیهای عددی نشان داده است که استفاده از منحنی سنجه جریان دائمی ممکن است منجر به خطاهای قابل توجهی در حدود بیش از 15٪ در برآورد دبی زمان رخداد سیل شود. هم‌چنین برونیابی منحنی سنجه، بیرون از محدوده اندازهگیریهای مورد استفاده برای تهیه این منحنی نیز خود عامل خطاهای عمده‌ای است (7). در علم هیدرولیک، تهیه نقشه سرعت جریان سطحی برای بررسی اثر عناصر و سازههای جدید مانند سرریزها، ورودی توربینها و سازههای مهندسی رودخانه بر روی مؤلفه‌های سرعت به‌کار می‌رود (8). امروزه سرعت‌سنج‌های الکترونیکی مبتنی بر آکوستیک داپلر که توسط مرز (2010) و هم‌چنین رادار سرعت سطحی که توسط ولبر و همکاران (2016) به کار گرفته شدند، جایگزین ابزار مکانیکی و هم‌چنین روشهای قبلی (جسم شناور، مولینه، منحنی دبی - اشل و ...) شده‌اند. اگرچه این ابزار کارایی و عملکرد بالاتری ارائه داده‌اند، از لحاظ دسترسی، هزینه، دقت و

کاربردهای محدود در جریان‌های آرام داشته‌اند که دلیل آن محدودیت‌های موجود در وضوح تصویر و سرعت تصویربرداری تجهیزات نوری آن زمان بوده است، اما امروزه با افزایش وضوح تصاویر و سرعت تصویربرداری دوربین‌های دیجیتال، این روش جایگزین مناسبی برای روش‌های پرهزینه کنونی می‌باشد و می‌توان از آن برای اندازه‌گیری سرعت جریان‌های آشفته و سریع نیز استفاده کرد (21).

استفاده از تصاویر نوری برای اندازه‌گیری‌های هیدرومتری با استفاده از سرعت‌سنجی ردیابی ذرات و رویکردهای سرعت‌سنجی تصویر ذرات در مقیاس بزرگ (LSPIV) برای اولین بار توسط فوجیتا و همکاران (1998) صورت گرفت (22). آن‌ها روش LSPIV را در فرآیندهای انتقال گاز در پایین‌دست مدل یک سرریز، انتقال یخ در مدل محل تلاقی دو رودخانه و جریان در دشت سیلابی یک رودخانه تشریح نمودند و 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 به‌کار برد. علاوه بر این، رویکرد LSPIV با الگوریتم‌هایی مانند سرعت‌سنجی تصویری فضا-زمان¹ توسط فوجیتا و همکاران (2007)، روش راداری سرعت‌سطحی² توسط کوستا و همکاران (2000) و ولبر و همکاران (2016)، روش سرعت‌سنجی تصویری شناور کروی³ توسط شاین و همکاران (2016) و روش سرعت‌سنجی سطحی موج الکترومغناطیسی⁴ توسط لین و جولین (2006) ارتقا یافتند (23، 24، 25، 26، 27). این روش‌ها به‌خصوص روش LSPIV به‌تدریج مورد

هم‌چنین خطرپذیری به‌خصوص در مواقع سیلابی محدودیت‌هایی در کاربرد دارند (9 و 10). ملچر و همکاران (2002) از یک رادار ثابت 10 گیگاهرتز نصب‌شده بر روی بالگرد برای اندازه‌گیری دبی جریان رودخانه استفاده کردند (11). هم‌چنین کوستا و همکاران (2006) ارزیابی جامعی از تکنیک رادار بر روی بالگرد انجام دادند (12). توسعه علم سنجش‌ازدور با وضوح بالا راه‌جدیدی برای به‌دست‌آمده دبی جریان رودخانه‌ها در بازه‌های فاقد ایستگاه هیدرومتری فراهم می‌کند. پیشرفت‌های زیادی در برآورد دبی جریان رودخانه‌های بزرگ براساس داده‌های سنجش‌ازدور ماهواره‌ای حاصل شده است (13، 14 و 15). بااین‌حال، به دلیل دوره بازبینی طولانی، حساسیت به شرایط آب و هوایی و سایر محدودیت‌های داده‌های ماهواره‌ای، اعمال روش‌های فوق برای رودخانه‌های کوچک و متوسط در مناطق کوهستانی دشوار است (16). به همین دلیل در سال‌های اخیر، ابزار سرعت‌سنجی از راه دور با رویکردهای مبتنی بر تصویربرداری، جایگزین امیدوارکننده در این زمینه بوده و مورد استقبال مهندسين قرار گرفته‌اند. به دلیل انعطاف‌پذیری آن‌ها (استفاده از فقط یک دوربین) و استفاده از حسگرها و سکوهای (پلتفرم) مختلف (مثل حسگرهای RGB و دوربین‌های حرارتی) ابزاری مناسب برای جمع‌آوری داده‌ها تلقی می‌شوند (17 و 18).

با پیشرفت تجهیزات نوری در دو دهه اخیر و به‌کارگیری پردازش تصویر، روش‌هایی برای اندازه‌گیری میدان سرعت جریان مانند روش‌های PIV و LSPIV ابداع شده‌اند. ابزارهای توسعه‌یافته را می‌توان به‌طور کلی به دو دسته مختلف دسته‌بندی کرد: تکنیک‌های مبتنی بر همبستگی (19) و رویکردهای جریان نوری مبتنی بر انرژی کلاسیک (20) که هر دو دسته نرم‌افزار، می‌توانند نتایج دقیقی ارائه دهند. شاید در دو دهه گذشته، این روش‌ها تنها جنبه تئوری با

1- Space-time image velocimetry (STIV)
2- Surface Velocity Radar (SVR)
3- Spherical Float Image Velocimetry (SFIV)
4- Electromagnetic Wave Surface Velocimeter (ESV)

استقبال در علوم مختلف قرار گرفت اما هنوز به طور گسترده توسط پژوهشگران هیدرومتری استفاده نشده است.

همواره با ظهور سیستم‌های هواپیمایی بدون سرنشین و از راه دور، فناوری LSPIV تبدیل به یک روش کارآمد برای پیشرفت سریع در تکنیک‌های پردازش تصویر و بینایی کامپیوتری با استفاده از نرم‌افزار و سخت‌افزارهای جمع‌آوری و ذخیره‌سازی تصویر شده است. توسعه فتوگرامتری هوایی با وسایل نقلیه بدون سرنشین (UAV) برای به‌دست آوردن تغییرات دینامیکی در یخچال‌های کوهستانی (28، 29 و 30) مورفولوژی رودخانه (31)، کیفیت آب (32)، کدورت آب (33) رویدادهای سیل و تغییرات در منطقه ساحلی (34) استفاده شده است.

برای اندازه‌گیری سرعت متوسط و دبی جریان از روش‌های ردیابی مبتنی بر تصویر علاوه بر سرعت جریان سطحی، پارامتر دیگری نیز باید در نظر گرفته شود. بنابراین، متداول‌ترین راه برای تبدیل سرعت سطحی به سرعت متوسط استفاده از ضریبی موسوم به شاخص سرعت (k) است (35 و 36). در نظر گرفتن شاخص سرعت صحیح به علت تأثیر زیاد بر خطای تخمین دبی در رویکردهای سنجش از دور مهم است (37). مقادیر متفاوتی برای این شاخص توسط پژوهشگران مختلف گزارش شده است. موسته و همکاران (2008) بیان کردند که مقدار این شاخص بین 0/79 تا 0/93 متغیر است (38) اما مقادیر کم‌تر از 0/55 برای رودخانه‌های با دبی کم نیز اندازه‌گیری شده است (39). مقدار این شاخص توسط ویتبرجت و همکاران (2002) در جریان کم عمق 0/805 محاسبه شد (40). از طرفی برای رودخانه‌های طبیعی مقدار شاخص 0/8 گزارش شده است (41). هم‌چنین برای کانال‌های با انواع مختلف شکل‌زبری مانند تلماسه‌ها یا شکنج‌ها، شاخص سرعت مقدار 0/659 تا 0/91

گزارش شد (42). معمولاً هرچه جریان عمیق‌تر باشد، مقدار این شاخص بزرگ‌تر فرض می‌شود و به شکل مقطع رودخانه نیز وابسته است (43). هم‌چنین مقدار شاخص سرعت می‌تواند در یک مقطع به دلیل اعماق متفاوت تغییر کند (44). معمولاً رودخانه‌های کوچک با بستر ناهموار، شاخص سرعت پایین‌تری را نشان می‌دهند، در حالی که در کانال‌های مصنوعی با پوشش بتنی مقادیر آن بالاتر است. به دلیل نیمرخ‌های سرعت نامنظم یا اثرات باد مقدار این ضریب حتی بیش‌تر از 1/1 هم گزارش شده است (45). اوسوریو کانو و همکاران (2013) مقدار شاخص را برای کانال‌های آزمایشگاهی 0/62-0/77 محاسبه کردند (46). مورامارکو و همکاران (2017) بیان کردند که شاخص سرعت برای نسبت‌های ابعادی بزرگ در رودخانه‌ها 0/85 است (47).

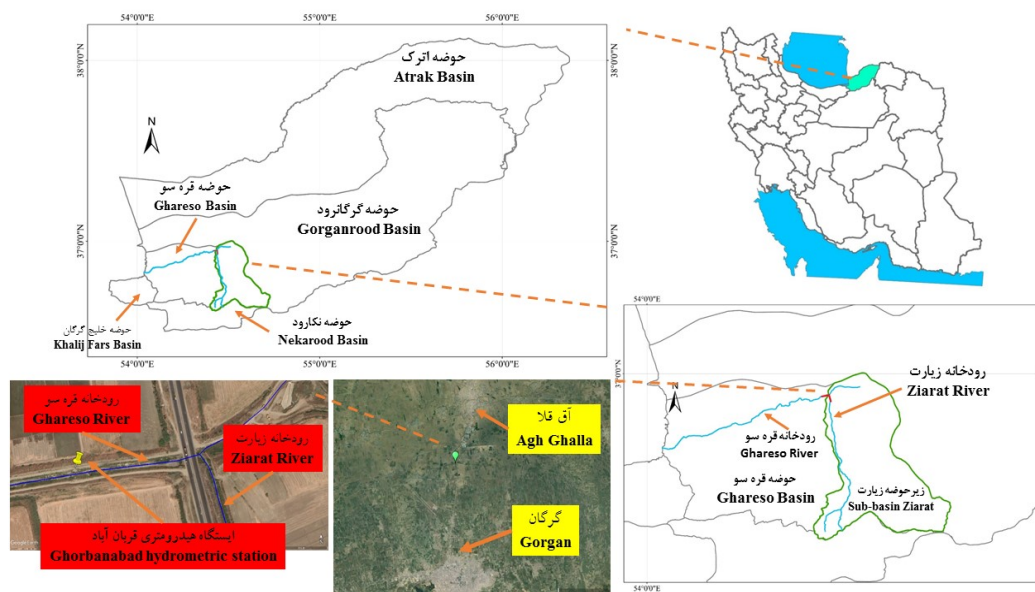
در این مطالعه، با استفاده از فیلم‌برداری به کمک پهپاد از جریان سیلابی رودخانه زیارت و انجام عملیات پردازش تصاویر با الگوریتم PIVLAB در محیط متلب، دبی و نیز توزیع عرضی سرعت جریان در رودخانه شبیه‌سازی شده و با مقادیر مشاهداتی به‌دست آمده از سرعت‌سنج مقایسه شده است. به‌طور کلی در این روش تخمین دقیقی از دبی رودخانه و توزیع عرضی سرعت بدون تماس و اختلال در سطح جریان و از راه دور به‌خصوص در مواقع سیلابی و هم‌چنین به‌طور مداوم و در شرایط جریان مختلف به‌دست می‌آید.

مواد و روش‌ها

موقعیت ایستگاه مورد مطالعه: بازه مورد مطالعه مسیر کوتاهی از رودخانه زیارت در قسمت شمالی شهرستان گرگان و قسمت جنوبی شهرستان آق‌قلا و در حوالی روستای قربان‌آباد است. این رودخانه از ارتفاعات روستای زیارت سرچشمه می‌گیرد و حوضه آبریز آن

حاضر توسط شرکت آب منطقه‌ای گلستان اداره می‌گردد. عملیات بازدید و تصویربرداری از سیلاب در این منطقه توسط پهپاد در تاریخ 22 اردیبهشت 1403 انجام شد. در طول عملیات تصویربرداری، تراز سطح آب در ایستگاه هیدرومتری 79 سانتی متر بود.

در حدود 638/5 کیلومتر مربع است که رودخانه‌ای به طول 49 کیلومتر و عرض حدود 15 متر در آن جریان دارد و در مواقع سیلابی شدید، جریان طغیان کرده و جاده ارتباطی گرگان - آق‌قلا را تخریب می‌کند. منطقه مورد مطالعه در فاصله بسیار نزدیکی از ایستگاه هیدرومتری قربان‌آباد قرار گرفته است که در حال



شکل 1- موقعیت محدوده طرح مطالعاتی.

Figure 1. The location of the scope of the study plan.

که دارای لرزش‌گیر سه‌جهته برای ثبت تصاویری بدون محوشدگی و ضبط ویدئوهایی بدون لرزش با کیفیت 4k است. ویدئوی این پهپاد در هر ثانیه 30 فریم را برداشت می‌کند (30fps) تا تبدیل به یک فیلم کاملاً روان و بدون نقص گردد.

تجهیزات مورد استفاده: برای تهیه فیلم‌ها و تصاویر از سطح جریان رودخانه از یک پهپاد پیشرفته (مدل Mavic Air Combo) استفاده شد که امکان ارسال تصاویر و ویدئو را تا برد 4 کیلومتر دارد (شکل 2). این پهپاد به یک دوربین 12 مگاپیکسلی مجهز است



شکل 2- پهپاد مورد استفاده در این مطالعه (مدل Mavic Air Combo).

Figure 2. The drone used in this study (Mavic Air Combo model).

نمودن صفحه اندازه‌گیری حذف شده است و از ذرات فوق‌میلی‌متری به‌عنوان ردیاب استفاده می‌کند. همان‌طور که گفته شد در این روش نیازی به استفاده از نور لیزر نیست و از نورهای محیطی معمولی برای اندازه‌گیری بهره‌گیری می‌شود. پس از محاسبه سرعت سطحی جریان و همچنین تهیه نقشه‌های سرعت جریان با استفاده از شاخص سرعت، در نهایت مقدار دبی رودخانه با توجه به سطح مقطع پیمایش شده از رودخانه با نقشه‌برداری، محاسبه شد.

برای محاسبه سرعت و دبی جریان در رودخانه از ابزار سرعت‌سنج (مولینه) الکترومغناطیسی مدل SENSARC2 استفاده شد (شکل 3).

در این پژوهش برای عملیات پردازش تصاویر از ابزاری موسوم به نرم‌افزار متن باز PIVLAB که در محیط متلب کدنویسی شده است استفاده شد (37). پردازش تصاویر شامل تصحیح انحراف (اعوجاج) لنز با استفاده از اطلاعات دوربین مانند مشخصات درونی (یعنی فاصله کانونی، ابعاد مؤثر حسگر، ابعاد تصویر) و مشخصات فرعی دوربین (یعنی ارتفاع و جهت دوربین) به‌منظور کاهش خطاهای ناشی از کجی زاویه دید و ... است که توسط نرم‌افزار PIVLAB و یا سایر نرم‌افزارهای مناسب دیگر انجام می‌گردد. برای اندازه‌گیری میدان دوبعدی سرعت بر روی سطح جریان نسخه‌ای از تکنیک متداول PIV می‌باشد که در آن استفاده از نور لیزر برای قابل‌رؤیت



شکل 3- سرعت‌سنج الکترومغناطیسی مدل SENSARC2.

Figure 3. Electromagnetic velocity meter model SENSARC2.

متقابل شباهت بین دو تصویر را با جابجایی یکی نسبت به دیگری اندازه‌گیری می‌کند. بدین‌صورت که ابتدا تصاویر متوالی به تعدادی منطقه کوچک تقسیم می‌شود که معمولاً به عنوان پنجره‌های جستجو نامیده می‌شوند. سپس با اجرای یک الگوی مطابقت برای هر دو تصویر متوالی، سطح ضریب همبستگی هر پنجره بازجویی در تصویر اول با نواحی بررسی مجاور خود در محدوده مشخص در تصویر دوم با استفاده از

تعیین سرعت و دبی جریان؛ همان‌طور که قبلاً هم اشاره شد برای محاسبه و اندازه‌گیری میدان سرعت سطحی جریان رودخانه با استفاده از پردازش تصاویر از تکنیک PIV استفاده شد. بسته نرم‌افزاری PIVLAB مبتنی بر الگوریتم همبستگی متقابل برای دو تصویر متوالی است.

در عملیات ثبت تصویر، اغلب از همبستگی متقابل برای ترازکردن دو تصویر استفاده می‌شود. همبستگی

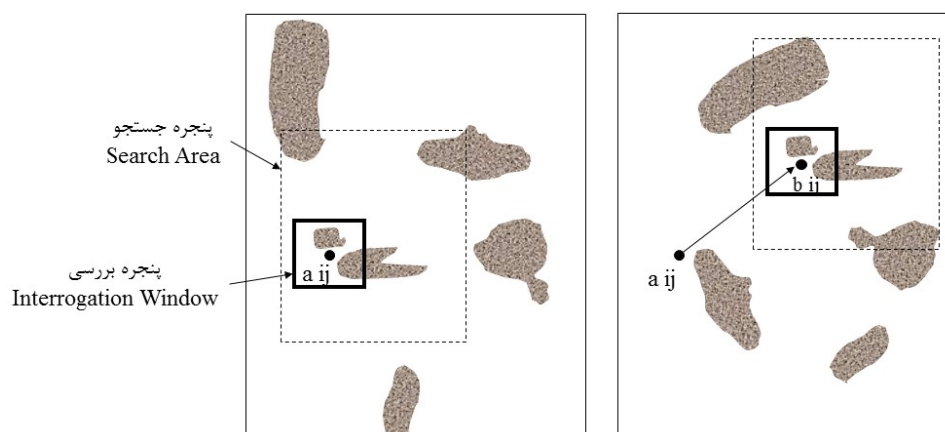
(سمت راست) مربوط به زمان $t+dt$ مشخص گردیده است. نواحی بررسی موجود در پنجره جستجو که با خطچین مشخص شده است برای یافتن مقصد احتمالی الگوی موردنظر بازرسی می‌شوند. به‌طوری‌که ضریب انطباق¹ ناحیه بررسی به مرکزیت نقطه a_{ij} با نواحی بررسی موردنظر (مثلاً ناحیه بررسی به مرکزیت نقطه b_{ij} که با R_{ab} نشان داده می‌شود محاسبه و ناحیه بررسی با بزرگ‌ترین مقدار ضریب انطباق به عنوان مقصد جابجایی ذرات ردیاب تعیین می‌گردد به‌عبارت دیگر موقعیت بالاترین قله همبستگی نشان‌دهنده جابه‌جایی متوسط ذرات در داخل پنجره بازجویی است (شکل 5). با داشتن جهت و مقدار جابه‌جایی در زمان dt بردار سرعت برای ناحیه بررسی موردنظر به‌دست می‌آید. این فرآیند تا محاسبه بردار سرعت برای تمامی نواحی موجود در تصویر ادامه می‌یابد و به‌این‌ترتیب میدان سرعت برای هر دو تصویر متوالی حاصل می‌گردد.

رابطه زیر محاسبه می‌گردد (رابطه 1). در حقیقت این الگوریتم بر اساس تشخیص الگوهای شکل‌گرفته توسط ذرات ردیاب در نواحی بررسی عمل می‌کند.

$$R_{ab} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (a_{ij} - \bar{a}_{ij}) \cdot (b_{ij} - \bar{b}_{ij})}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (a_{ij} - \bar{a}_{ij})^2 \cdot \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (b_{ij} - \bar{b}_{ij})^2}} \quad (1)$$

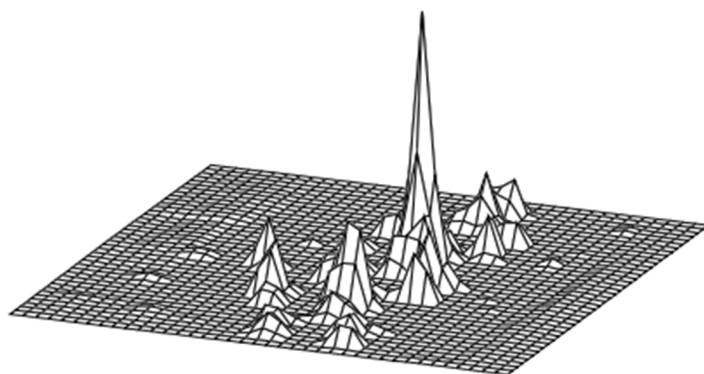
که در این رابطه، M و N اندازه نواحی بررسی بر حسب پیکسل، i و j به‌ترتیب مختصات عناصر در ماتریس‌های تصویر a و b ، a_{ij} و b_{ij} مقادیر توزیع شدت سطح‌خاکستری (متغیر از 0 تا 255 برای هر تصویر 8 بیتی) به‌ترتیب در تصویر اول و دوم و خط افقی روی پارامترها میانگین شدت برای هر ناحیه بررسی است.

همان‌طورکه در شکل 4 مشخص است پنجره بررسی که درون آن الگویی توسط ذرات ردیاب تشکیل شده است با مرکزیت a_{ij} در تصویر اول (سمت چپ) مربوط به زمان t و در تصویر دوم



شکل 4- نمایش تصویری الگوریتم انطباق ضربدری مورد استفاده برای تشخیص جابجایی ذرات ردیاب.

Figure 4. Visual representation of the cross matching algorithm used to detect the displacement of tracer particles.



شکل 5- بزرگترین مقدار ضریب انطباق به عنوان مقصد جابجایی ذرات ردیاب.

Figure 5. The largest value of the adaptation coefficient as the destination of the movement of tracer particles.

پنجره به طور پیش فرض فعال است و در اکثر مواقع بهترین نتایج را ارائه می دهد. همبستگی گروهی در PIVLAB دارای تمام تکنیک های همبستگی پیشرفته منظم (گذرهای متعدد، تغییر شکل پنجره و...) است. پیاده سازی همبستگی گروهی توسط سانتیاگو و همکاران (1998) معرفی شده است که این رویکرد به ویژه در سرعت سنجی تصویر ذرات با وضوح میکرون (micro-PIV و μ PIV) مفید است، زیرا می تواند با تراکم ذرات ردیاب کم، جایی که الگوریتم های استاندارد PIV شکست می خورند، مقابله کند هر چند نیاز به تعداد زیادی تصویر دارد (48). با همبستگی گروهی، PIVLAB مجموعه ای از تصاویر پراکنده را تجزیه و تحلیل می کند و ماتریس های همبستگی حاصل را قبل از استفاده از الگوریتم جستجوی پیک، میانگین گیری می کند. این منجر به نسبت سیگنال به نویز بسیار بهتری می شود و وضوح برداری بسیار بالایی برای چگالی ذرات بسیار کم امکان پذیر است و به طور قابل توجهی استحکام تحلیل را افزایش می دهد و بایاس و خطای جابجایی RMS را کاهش می دهد.

روش انجام داده برداری: اولین گام برای برداشت داده ها تهیه فیلم خام ویدئویی از موقعیت مورد نظر با استفاده از پهپاد است. بدین صورت که پهپاد با پرواز

اساس کار دبی سنج ها در ابزارهای غیر تماسی و تکنیک های سرعت سنجی تصاویر (PIV، LSPIV و STIV) بر مبنای اندازه گیری سرعت سطحی جریان در عرض رودخانه و تعمیم آن به سرعت متوسط جریان است. شاخص سرعت از برازش بین داده های سرعت سطحی و سرعت متوسط و به کمک رابطه 2 تعیین می شود:

$$k = \frac{V_m}{V_s} \quad (2)$$

که در آن، k شاخص سرعت (بی بعد)، V_m سرعت متوسط عمقی (متر بر ثانیه) و V_s سرعت سطحی جریان (متر بر ثانیه) است.

برای محاسبه میانگین سرعت عرضی و دبی رودخانه با استفاده از سرعت سطحی آب، اقدام به اندازه گیری جریان در مقطعی از رودخانه با پردازش تصاویر پهپادی شد. پردازش تصاویر با PIVLAB دارای سه الگوریتم همبستگی مختلف است، همبستگی متقاطع مستقیم تک گذر¹، همبستگی تبدیل فوریه مستقیم با گذرهای متعدد و پنجره های تغییر شکل² و همبستگی گروهی³. الگوریتم تغییر شکل

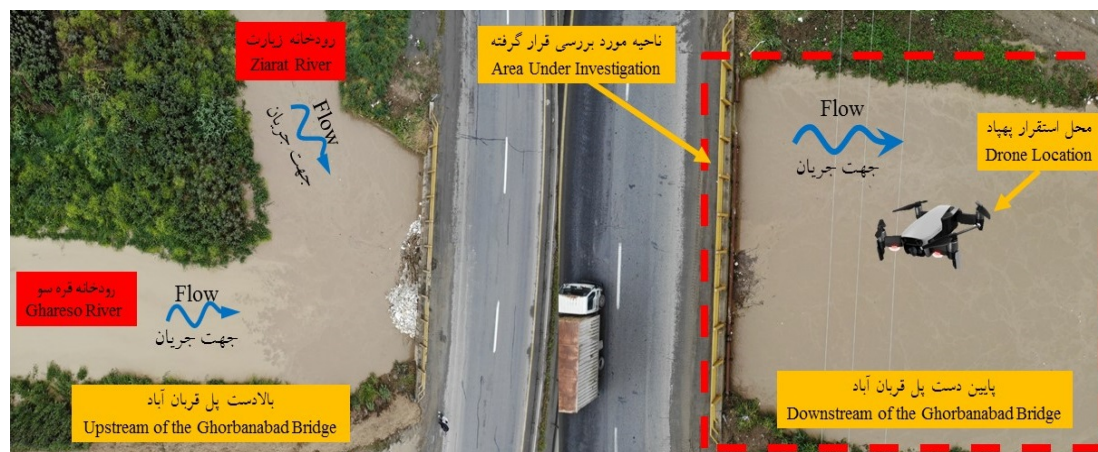
1- Single pass direct cross correlation (DCC)

2- Direct Fourier transform correlation with multiple passes and deforming windows (DFT)

3- Ensemble

ثابت و بدون حرکت و دقیقاً عمود بر مقطع رودخانه جهت کاهش اعوجاج مستقر شد (شکل 6).

در ارتفاع 40 متری بالای جریان رودخانه در محل پایین‌دست پل قربان‌آباد در وضعیت سیلابی، اقدام به تهیه فیلم به مدت 40 ثانیه نمود به‌طوری‌که پهپاد کاملاً



شکل 6- تصاویر هوایی از موقعیت مورد مطالعه در هنگام سیلاب.

Figure 6. Aerial images of the studied location during floods.

تصاویر انجام شد. پارامترهای به‌کار گرفته‌شده در فرایند پردازش تصاویر در جدول 1 آورده شده است.

ویدئویی خام (پردازش‌نشده) به چندین فریم استخراج گردید و اطلاعات ویدئو مانند نرخ‌فریم و مدت‌زمان فیلم ثبت شد. پس از تهیه عکس‌ها اقدامات مربوط به پیش‌پردازش، پردازش و پس‌پردازش

جدول 1- پارامترهای به‌کار گرفته شده در فرآیند پردازش تصاویر.

Table 1. Parameters used in the image processing.

اندازه نهایی ناحیه بررسی Final size of the search area	اندازه پیکسل Pixel size	مدت فیلم‌برداری Filming time	تعداد فریم‌ها Number of frames	فرکانس تصویربرداری Imaging frequency	نوع پهپاد Type of drone
32*32	0.63	40 s	1203	30 fbs	Mavic Air Combo

پردازش تصاویر اقدام به ژئورفرنس‌کردن¹ تصاویر ثبتی شد و در نهایت سرعت سطحی جریان و دبی جریان محاسبه شد (شکل 8).

برای به‌دست آوردن سطح مقطع رودخانه قبل از وقوع سیل در محدوده موردنظر اقدام به عملیات نقشه‌برداری و تهیه نیم‌رخ طولی و عرضی شد (شکل 7). هم‌چنین جهت انجام صحیح عملیات

1- Georeference



شکل 7- مقطع رودخانه در محدوده مورد مطالعه پس از فروکش سیلاب.

Figure 7. The cross section of the river in the study area after the flood subsided.



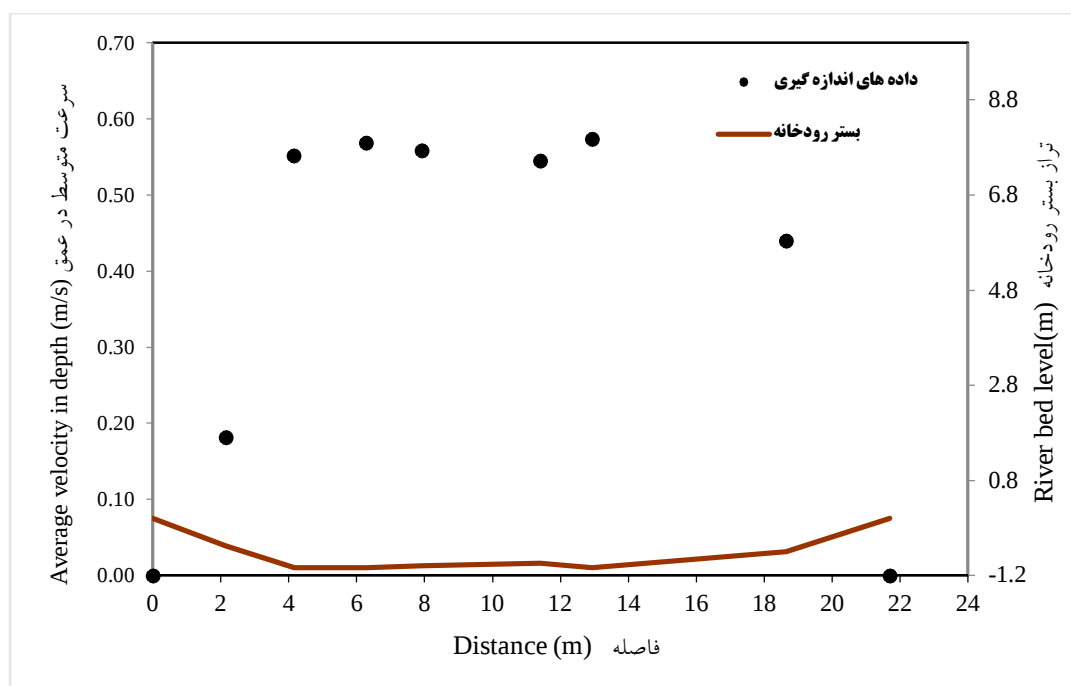
شکل 8- مساحت و عرض رودخانه در مقطع مورد مطالعه برای محاسبه دبی و سرعت عرضی رودخانه.

Figure 8. The area and width of the river in the studied section to calculate the flow discharge and lateral velocity distribution of the river.

اندازه‌گیری شده سرعت در عرض رودخانه به کمک
دستگاه سرعت‌سنج را نشان می‌دهد.

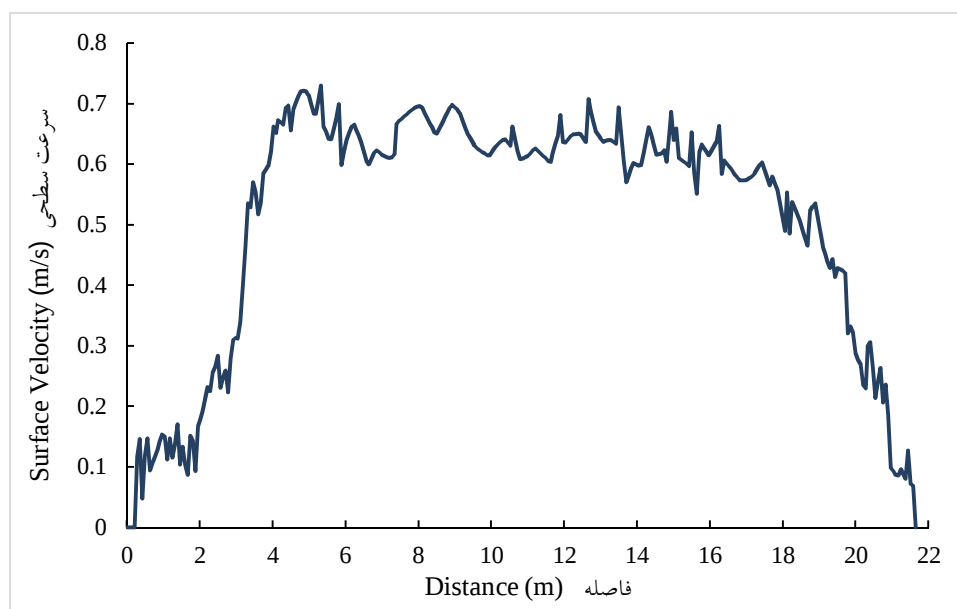
نتایج و بحث

برای اطمینان از درستی و قابلیت کاربرد
الگوریتم‌های تعریف‌شده در PIVLAB از نمودار
شکل 8 استفاده شد که بستر رودخانه و مقادیر

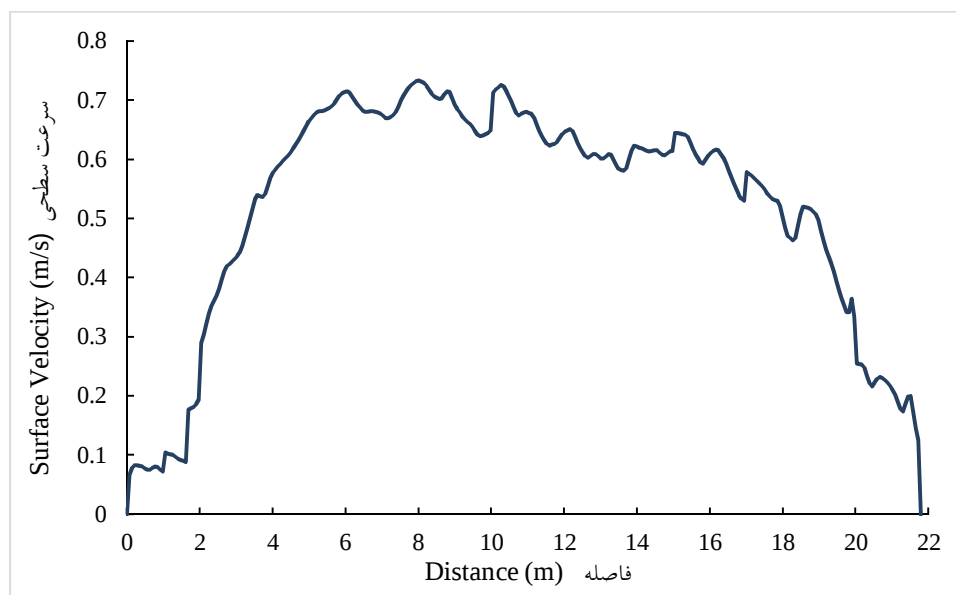


شکل 9- بستر رودخانه و نیمرخ توزیع عرضی سرعت متوسط در عمق رودخانه برای داده‌های اندازه‌گیری شده با دستگاه سرعت‌سنج.
Figure 9. River bed level and Profile of lateral velocity distribution of average velocity in river depth for the measured data with a speedometer.

در شکل‌های 10 و 11 نیمرخ توزیع عرضی سرعت سطحی رودخانه با استفاده از الگوریتم‌های Ensemble و DFT ارائه شده است.



شکل 10- نیمرخ توزیع عرضی سرعت سطحی رودخانه در مقطع A به روش Ensemble.
Figure 10. Profile of lateral velocity distribution of river surface velocity in section A by Ensemble method.

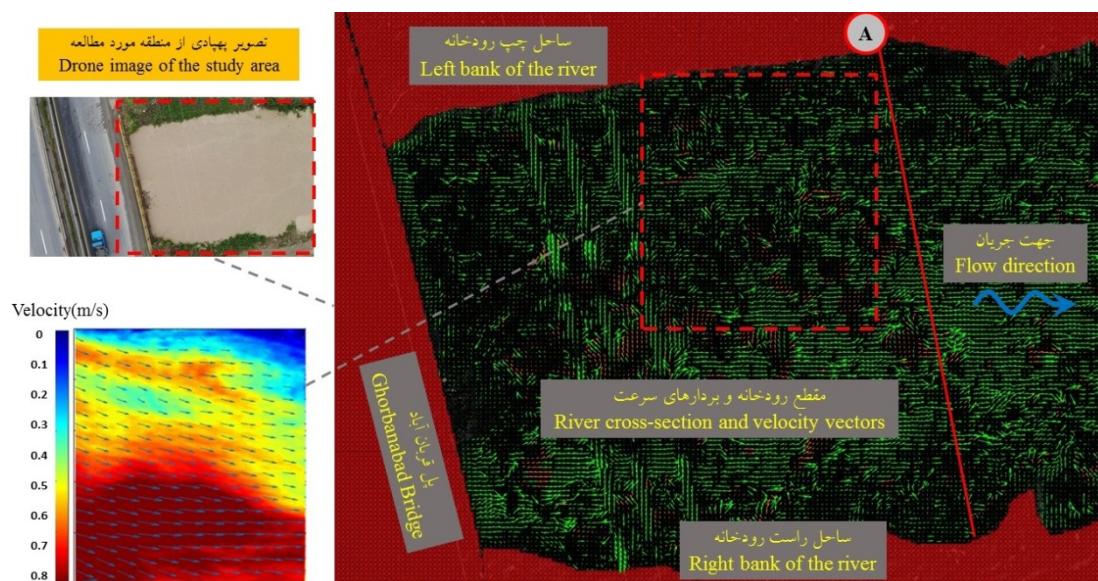


شکل 11- نیمرخ توزیع عرضی سرعت سطحی رودخانه در مقطع A به روش DFT.

Figure 11. Profile of lateral velocity distribution of river surface velocity in section A by DFT method.

که نشان‌دهنده آن است که سرعت طولی در رودخانه به مراتب بیش‌تر از سرعت عرضی است. روند تغییرات سرعت طولی جریان در عرض رودخانه بدین‌صورت است که در هر مقطع ماکزیمم سرعت در محور مرکزی رودخانه رخ می‌دهد و با حرکت به‌سمت سواحل آبراهه کاهش می‌یابد.

در شکل 12 مقطع رودخانه و بردارهای سرعت سطحی حاصل از پردازش تصاویر پهپادی با الگوریتم‌های PIVLAB در مقطع مورد مطالعه نشان داده شده است. همان‌طورکه ملاحظه می‌شود بردارهای سرعت در مقطع رودخانه، اکثراً در جهت جریان بوده و کم‌تر به جهات دیگر منحرف شده‌اند.



شکل 12- بردارهای سرعت سطحی حاصل از پردازش تصاویر پهپادی با استفاده از PIVLAB در مقطع رودخانه.

Figure 12. Surface velocity vectors obtained from processing drone images using PIVLAB in a river cross section.

مقادیر سرعت متوسط سطحی، سرعت متوسط مقطع، شاخص سرعت، دبی جریان و همچنین مشخصات مقطع مورد مطالعه در جدول 2 قابل ملاحظه می‌باشد که همان‌طور که قبلاً هم در مقدمه اشاره شد در اکثر منابع میزان شاخص سرعت 0/85 عنوان شده است که در این پژوهش این مقدار به عنوان شاخص سرعت قابل اعتماد است. در جدول 3 میزان خطای

نسبی سرعت متوسط و دبی جریان در مقطع مورد مطالعه نسبت به داده‌های اندازه‌گیری آورده شده است. همان‌طور که در این جدول قابل ملاحظه است دبی جریان با خطای نسبی حدود 3/5 درصد و سرعت متوسط جریان با خطای نسبی حدود 7 درصد برآورد و محاسبه گردید که نشان‌دهنده انطباق خوب هر دو الگوریتم با داده‌های مشاهداتی است.

جدول 2- نتایج دبی و سرعت متوسط جریان با پردازش تصاویر در مقطع A با دو الگوریتم تعریف شده در PIVLAB.

Table 2. The results of discharge and average flow speed by processing images in section A with two algorithms defined in PIVLAB.

دبی Flow discharge (m ³ /s)	سرعت متوسط Mean velocity (m/s)	سرعت سطحی Surface velocity (m/s)	روش Method
8.32	0.486	-	داده‌های اندازه‌گیری
8.02	0.453	0.532	ENS
8.15	0.449	0.528	DFT

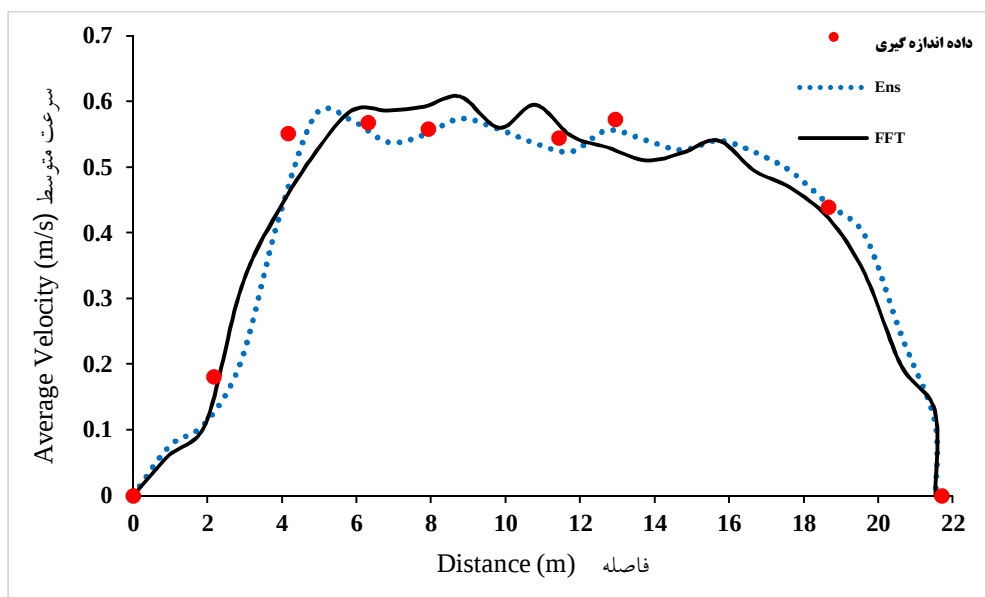
جدول 3- مقایسه میزان خطای الگوریتم‌های محاسباتی در مقطع A نسبت به داده‌های اندازه‌گیری شده.

Table 3. Comparing the error rate of calculation algorithms in section A compared to the measured data.

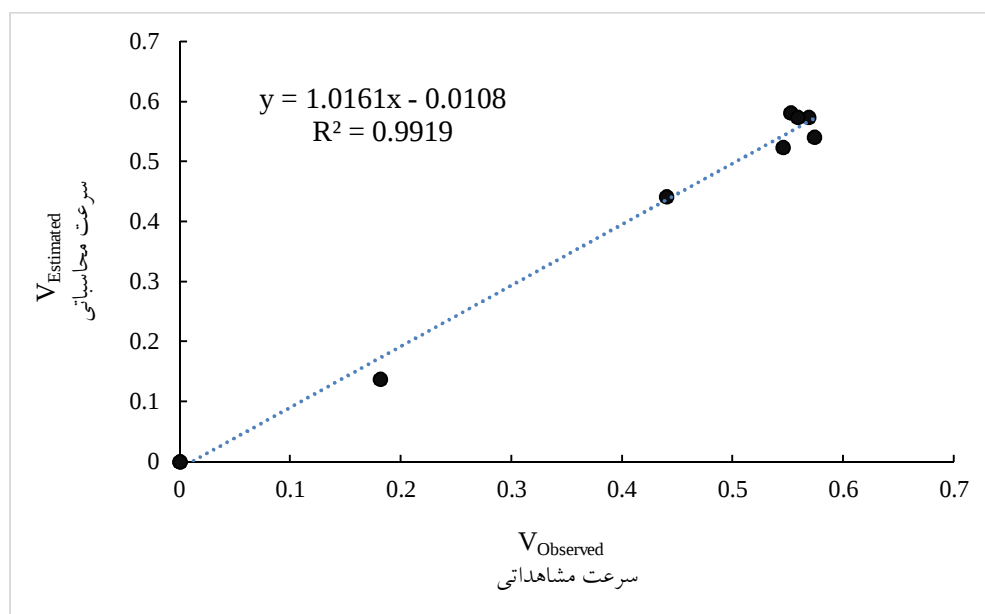
دبی Flow discharge (m ³ /s)	سرعت متوسط Mean velocity (m/s)	درصد خطا Error percentage	روش Method
8.32	0.486	-	داده‌های اندازه‌گیری
8.02	0.435	6.8	ENS
8.15	0.432	7.60	DFT

در نمودار شکل 13 به وضوح قابلیت و کارایی روش‌های مذکور را در تخمین توزیع عرضی سرعت در مقطع رودخانه آشکار می‌کند.

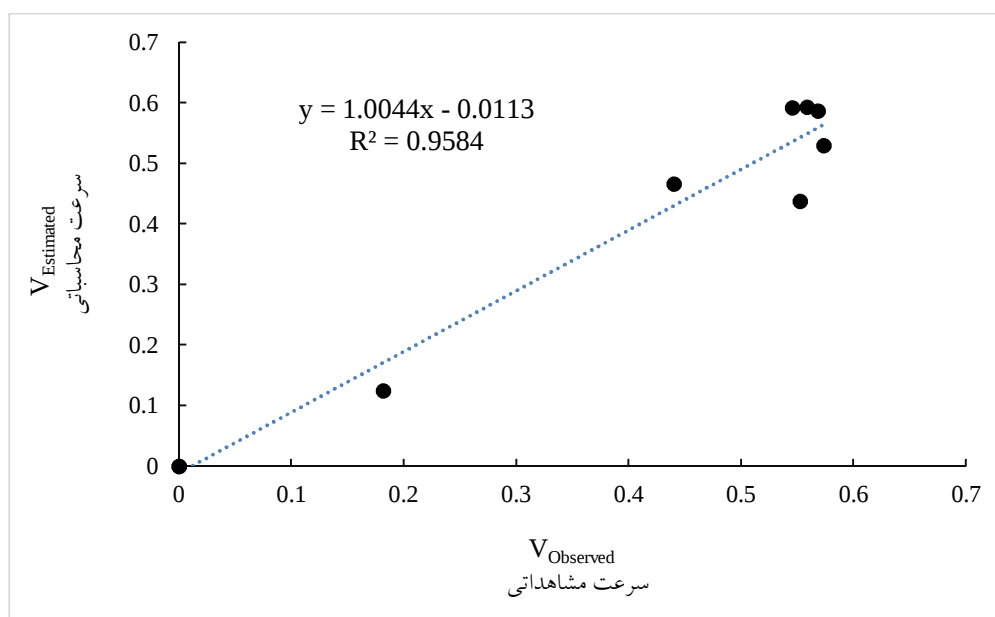
در شکل 14 و 15 به ترتیب نمودار سرعت مشاهداتی و سرعت برآورد شده با الگوریتم Ensemble و DFT نشان داده شده است که دقت مناسب برآورد سرعت به این روش قابل مشاهده است.



شکل 13- مقایسه توزیع عرضی سرعت‌های اندازه‌گیری‌شده در مقطع مورد مطالعه با الگوریتم‌های تعریف شده PIVLAB.
Figure 13. Comparison of lateral velocity distribution of average velocity of measured data in the studied section with PIVLAB's defined algorithms.



شکل 14- مقایسه سرعت‌های مشاهداتی و برآورد شده با الگوریتم Ensemble.
Figure 14. Comparison of measured velocities and estimated with the Ensemble algorithm.



شکل 15- مقایسه سرعت‌های مشاهداتی و برآورد شده با الگوریتم DFT.
Figure 15. Comparison of measured velocities and estimated with the DFT algorithm.

$$KGE = 1 - \sqrt{(CC - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (7)$$

$$CC = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^N (V_o - V_e)^2}{\sum_{i=1}^N (V_o - \bar{V}_o)^2}}$$

$$\alpha = \frac{\sigma_o}{\sigma_e}$$

$$\beta = \frac{\bar{V}_o}{\bar{V}_e}$$

$0.7 < KGE < 1$	Very good
$0.6 < KGE < 0.7$	Good
$0.5 < KGE < 0.6$	Satisfactory
$0.4 < KGE < 0.5$	Acceptable
$KGE < 0.4$	Unsatisfactory

برای ارزیابی نتایج محاسبات سرعت از پردازش تصاویر با داده‌های مشاهداتی که به‌وسیله مولینه به‌دست آمد، است، از شاخص‌های آماری درصد خطای مطلق (AE)، درصد خطای نسبی (RE)، میانگین مربعات خطا (MSE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب گوپتا (KGE) استفاده شد (49). شاخص‌های آماری مذکور به‌ترتیب شامل روابط 3 تا 7 است.

$$AE = |V_o - V_e| \times 100 \quad (3)$$

$$RE = \left| \frac{V_o - V_e}{V_o} \right| \times 100 \quad (4)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ((V_o)_i - (V_e)_i)^2 \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ((V_o)_i - (V_e)_i)^2} \quad (6)$$

در روابط شاخص‌های آماری، N شمار داده‌ها، V سرعت جریان، σ انحراف معیار، نمایه بار بر روی سرعت جریان نشانگر میانگین مقادیر، زیرنویس o نشانگر داده‌های مشاهداتی و زیرنویس e نشانگر

داده‌های محاسباتی هستند. مقادیر یادشده در رابطه‌های 3 تا 7 برای سرعت متوسط رودخانه در مقطع A به تفکیک نوع الگوریتم در جدول 4 آورده شده است.

جدول 4- مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده و الگوریتم‌های به کار گرفته شده با استفاده از شاخص‌های آماری.

Table 4. Comparison of measured data and applied algorithms using statistical indicators.

روش Method	AE	RE	MSE	RMSE	KGE
ENS	2.49	6.74	0.0008	0.028	0.9777
DFT	4.86	11.80	0.003	0.057	0.9660

به‌خوبی مورد استفاده قرار گیرند. در این صورت خطرات مرتبط با اندازه‌گیری مستقیم سرعت جریان در شرایط سیلابی تا حدود زیادی کاهش می‌یابد. در این پژوهش نشان داده شد که با استفاده از تصاویر جریان سطحی رودخانه با پهپاد و بدون تماس با سطح آب و از راه دور می‌توان به‌طور مداوم و در شرایط مختلف جریان، تخمین نسبتاً دقیقی از دبی جریان رودخانه و توزیع عرضی سرعت متوسط را به‌دست آورد. توزیع عرضی سرعت محاسباتی می‌تواند علاوه بر محاسبه دبی جریان در آبراهه، برای تخمین دبی رسوب معلق و بار بستر و نیز شناسایی بازه‌های فرسایش‌پذیر و رسوب‌گذار در عرض رودخانه مورد استفاده قرار گیرد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از داوران محترم مقاله که با نظرات خود موجب بهبود متن حاضر شده‌اند و همچنین از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان که انجام این پژوهش را تسهیل نموده‌اند تشکر می‌نمایند.

بنابر نتایج موجود در جدول 4، هر 5 خطای محاسبه‌شده نشان داد که دقت الگوریتم‌های تعریف‌شده در متلب در برآورد سرعت جریان رودخانه در مقایسه با داده‌های مشاهداتی که برگرفته از ابزار سرعت‌سنج می‌باشد مناسب و قابل‌اتکا است.

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش، کاربرد یکی از ابزار نوین (پهپاد) در تخمین پارامترهای هیدرولیکی سیلاب در آبراهه‌ها توضیح داده‌شده و در یک آبراهه واقعی مورد استفاده قرار گرفته است. پهپادها به‌دلیل امکان استقرار سریع در منطقه، کاربردهای عملیاتی مهمی برای شرایط سیل به‌خصوص در مناطق دورافتاده و نیز در بازه‌های رودخانه‌ای بالادست شهرها و مراکز جمعیتی دارند. عملیات انجام‌شده در این پژوهش، کاربرد موفقیت‌آمیز این ابزار در محاسبات سرعت و دبی جریان در یک آبراهه کوچک نشان داده و در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری مستقیم سرعت و دبی جریان، دقت قابل‌قبولی را نشان داد. بنابراین پهپادها می‌توانند برای آبراهه‌های بزرگ و شرایط سیل‌های بزرگ‌تر نیز

داده‌ها، اطلاعات و دسترسی

در این مقاله، از داده‌های هندسی و هیدرولیکی رودخانه زیارت واقع در استان گلستان در اردیبهشت 1403 استفاده شده است. داده‌های این پژوهش مربوط به رساله دکتری نویسنده اول است که با مکاتبه با نویسنده مسئول قابل دسترسی می‌باشند.

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌ها است.

تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافعی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: آماده‌سازی داده‌ها، انجام محاسبات، تهیه پیش‌نویس مقاله، نویسنده دوم: طرح تحقیق و روش‌شناسی، اصلاح و نهایی‌سازی مقاله، مشارکت در

حمایت مالی

حمایت مالی از این پژوهش در قالب گرنت دانشجویی نویسنده اول این مطالعه بوده است.

منابع

1. Khosro Aghaei, M., & Ayub-zadeh, S. A. (2011). Development of two-dimensional velocity field measurement method and vertical distribution of turbulent shear stress using image processing technique and particle tracking algorithm, master's thesis in the field of water structures engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. [In Persian]
2. Le Coz, J., Camenen, B., Peyrard, X., & Dramais, G. (2012). Uncertainty in open-channel discharges measured with the velocity-area method. *Flow Measurement and Instrumentation*, 26, 18-29.
3. Tauro, F., Piscopia, R., & Grimaldi, S. (2017). Streamflow observations from cameras: Large-scale particle image velocimetry or particle tracking velocimetry. *Water Resources Research*, 53 (12), 10374-10394.
4. Kavetski, D., Kuczera, G., & Franks, S. W. (2006). Bayesian analysis of input uncertainty in hydrological modeling: 2. Application. *Water Resources Research*, 42(3), W03408.
5. McMillan, H., Freer, J., Pappenberger, F., Krueger, T., & Clark, M. (2010). Impacts of uncertain river flow data on rainfall-runoff model calibration and discharge predictions. *Hydrological Processes: International Journal*, 24(10), 1270-1284.
6. Fread, D. L. (1975). Computation of stage-discharge relationships affected by unsteady flow. *American Water Resources Association*, 11(2), 213-228.
7. Baldassarre, G. D., & Montanari, A. (2009). Uncertainty in river discharge observations: a quantitative analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(6), 913-921.
8. 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.
9. Merz, J. (2010). Discharge Measurements in Low Flow Conditions with ADCP Technology First Experiences in Nepal. *Journal of Hydrology and Meteorology*, 7(1), 40-48.

10. Welber, M., Le Coz, J., Laronne, J., Zolezzi, G., Zamler, D., Dramais, G., Hauet, A., & Salvaro, M. (2016). Field assessment of noncontact stream gauging using portable surface velocity radars (SVR). *Water Resources Research*, 52(2), 1108-1126.
11. Melcher, N., Costa, J., Haeni, F., Cheng, R., Thurman, E., Buursink, M., et al. (2002). River discharge measurements by using helicoptermounted radar. *Geophysical Research Letters*, 29(22), 2084.
12. Costa, J. E., Cheng, R. T., Haeni, F. P., Melcher, N., Spicer, K. R., Hayes, E., et al. (2006). Use of radars to monitor stream discharge by noncontact methods. *Water Resources Research*, 42(7), W07422.
13. Garambois, P. A., & Monnier, J. (2015). Inference of effective river properties from remotely sensed observations of water surface. *Adv. Water Research*, 79, 103-120.
14. Gleason, C. J., & Smith, L. C. (2014). Toward global mapping of river discharge using satellite images and at-many-stations hydraulic geometry. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 111(13), 4788-4791.
15. Wang, S., Zhou, F., & Russell, H. (2017). Estimating Snow Mass and Peak River Flows for the Mackenzie River Basin Using GRACE Satellite Observations. *Rem. Sens.* 9(3), 256-258.
16. Yang, S., Wang, P., Wang, J., Lou, H., & Gong, T. (2021). River Flow Estimation Method Based on UAV Aerial Photogrammetry. *Natl. Rem. Sens. Bull*, 25(6), 1284-1293.
17. Muste, M., Fujita, I., & Hauet, A. (2008). Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments. *Water Resources Research*, 44(4), 1-14.
18. Puleo, J. A., Mckenna, T. E., Holland, K. T., & Calantoni, J., (2012). Quantifying riverine surface currents from time sequences of thermal infrared imagery. *Water Resources*, 48, W01527.
19. Thielicke, W., & Stamhuis, E. (2014). PIVlab—towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in MATLAB. *Journal of Open Research Software*, 2(1), e30.
20. Tauro, F., Tosi, F., Mattoccia, S., Toth, E., Piscopia, R., & Grimaldi, S. (2018). Optical tracking velocimetry (OTV): Leveraging optical flow and trajectory-based filtering for surface streamflow observations. *Remote Sensing*, 10(12), 2010.
21. Khosro Aghaei, M., & Ayub-Zadeh, S. A. (2011). Development of two-dimensional velocity field measurement method and vertical distribution of turbulent shear stress using image processing technique and particle tracking algorithm, master's thesis in the field of water structures engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. [In Persian]
22. Fujita, I., Muste, M., & Kruger, A. (1998). Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications. *Journal of Hydraulic Research*, 36(3), 397-414.
23. Fujita, I., Watanabe, H., & Tsubaki, R. (2007). Development of a non-intrusive and efficient flow monitoring technique: The space-time image velocimetry (STIV). *International Journal of River Basin Management*, 5(2), 105-114.
24. Costa, J. E., Spicer, K. R., Cheng, R. T., Haeni, P. F., Melcher, N. B., Thurman, E. M., Plant, W. J., & Keller, W. C. (2000). Measuring stream discharge by non-contact methods: A proof-of-concept experiment, *Geophys. Res. Lett.* 27(4), 553-556.
25. Welber, M., Le Coz, J., Laronne, J., Zolezzi, G., Zamler, D., Dramais, G., Hauet, A., & Salvaro, M. (2016). Field assessment of noncontact stream gauging using portable surface velocity radars (SVR). *Water Resources Research*, 52(2), 1108-1126.

26. 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.
27. Lee, J. S., & Julien, P. Y. (2006). Electromagnetic wave surface velocimetry. *J. Hydraul. Eng.* 132(2), 146-153.
28. Cao, B., Guan, W., Li, K., Pan, B., & Sun, X. (2021). High-Resolution Monitoring of Glacier Mass Balance and Dynamics with Unmanned Aerial Vehicles on the Ningchan No. 1 Glacier in the Qilian Mountains, China. *Remote Sens.* 13(14), 2735.
29. Chandler, B. M. P., Lovell, H., Boston, C. M., Lukas, S., Barr, I. D., Benediktsson, Í. Ö., Benn, D. I., Clark, C. D., Darvill, C. M., Evans, D. J. A., et al. (2018). Glacial geomorphological mapping: A review of approaches and frameworks for best practice. *Earth-Sci. Rev.* 185, 806-846.
30. Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 92, 79-97.
31. Sledz, S., Ewertowski, M. W., & Piekarczyk, J. (2021). Applications of unmanned aerial vehicle (UAV) surveys and Structure from Motion photogrammetry in glacial and periglacial geomorphology. *Geomorphology*, 378, 107620.
32. Lu, Q., Si, W., Wei, L., Li, Z., Xia, Z., Ye, S., & Xia, Y. (2021). Retrieval of Water Quality from UAV-Borne Hyperspectral Imagery: A Comparative Study of Machine Learning Algorithms. *Remote Sens.* 13(19), 3928.
33. Cui, M., Sun, Y., Huang, C., & Li, M. (2022). Water Turbidity Retrieval Based on UAV Hyperspectral Remote Sensing. *Water*, 14(1), 128.
34. Turner, I. L., Harley, M. D., & Drummond, C. D. (2016). UAVs for coastal surveying. *Coast. Eng.* 114, 19-24.
35. Creutin, J. D., Muste, M., Bradley, A. A., Kim, S. C., & Kruger, A. (2003). River gauging using PIV techniques: a proof of concept experiment on the Iowa River. *Journal of Hydrology*, 277(3-4), 182-194.
36. Le Coz, J., Hauet, A., Pierrefeu, G., Dramais, G., & Camenen, B. (2010). Performance of image-based velocimetry (LSPIV) applied to flash-flood discharge measurements in Mediterranean rivers. *Journal of Hydrology*, 394(1-2), 42-52.
37. Dramais, G., Le Coz, J., Camenen, B., & Hauet, A. (2011). Advantages of a mobile LSPIV method for measuring flood discharges and improving stage-discharge curves. *Journal of Hydro-Environment Research*, 5(4), 301-312.
38. Muste, M., Fujita, I., & Hauet, A. (2008). Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments, *Water Resour Research*, 44(4), 1-14.
39. Genç, O., Ardiçlıoğlu, M., & Necati, A. (2015). Calculation of mean velocity and discharge using water surface velocity in small streams. *Flow Measurement and Instrumentation*, 41, 115-120.
40. Weitbrecht, V., Kühn, G., & Jirka, G. H. (2002). Large scale PIV-measurements at the surface of shallow water flows. *Journal of Flow Measurement and Instrumentation*, 13(5-6), 237-245.
41. Hauet, A., Morlot, & Daubagnan, L. (2018). Velocity profile and depth-averaged to surface velocity natural streams: A review over a large sample of rivers. *E3S Web of Conferences*, 40, 06015.
42. Polatel, C. (2006). Large-scale roughness effect on free surface and bulk flow characteristics in open channel flows. Ph.D. Thesis. Iowa Institute of Hydraulic Research. The University of Iowa, Ames, Iowa.
43. Le Coz, J., Hauet, A., Pierrefeu, G., Dramais, G., & Camenen, B. (2010). Performance of image-based velocimetry (LSPIV) applied to flash-flood discharge measurements in Mediterranean rivers. *Journal of Hydrology*, 394(1-2), 42-52.

44. Gunawan, B., Sun, X., Sterling, M., Shiono, K., Tsubaki, R., Rameshwaran, P., & Knight, D.W. (2012). The application of LS-PIV to a small irregular river for in bank and overbank flows. *Flow Measurement and Instrumentation*, 24, 1-12.
45. Fujita, I. (2018). Principles of surface velocity gaugings. *The 4th IAHR-WMO-IAHS Training Course on Stream Gauging*, 2.
46. Osorio-Cano, J. D., Osorio, A. F., & Medina, R. (2013). A method for extracting surface flow velocities and discharge volumes from video images in laboratory. *Journal of Flow Measurement and Instrumentation*, 33, 188-196.
47. Moramarco, T., Barbetta, S., & Tarpanelli, A. (2017). From Surface Flow Velocity Measurements to Discharge Assessment by the Entropy Theory. *Journal of water*. 9(2), 1-12.
48. Santiago J. G., Wereley S. T., Meinhart C. D., Beebe D. J., & Adrian R. J. (1998). A particle image velocimetry system for microfluidics. *Experiments in Fluids*, 25, 316-319.
49. Daneshfaraz, R., Norouzi, R., & Ebadzadeh, P. (2022). Experimental and numerical study of sluice gate flow pattern with non-suppressed sill and its effect on discharge coefficient in free-flow conditions. *J. Hydraul. Struct.* 8(1), 1-20. DOI: 10.22055/jhs.2022.40089.1201.

