

امکان‌سنجی کاربرد مفهوم سرعت مشخصه در برآورد دبی جریان در مقاطع مرکب

زهرا قربانی^۱، عبدالرضا ظهیری^{۲*}، حسین خلیلی شایان^۳، امیر احمد دهقانی^۴، خلیل قربانی^۵

- ۱- دانشجوی مقطع دکتری سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
 - *۵۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
 - ۳- دانش‌آموخته مقطع دکتری سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران.
 - ۴- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
- تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۱۶

چکیده

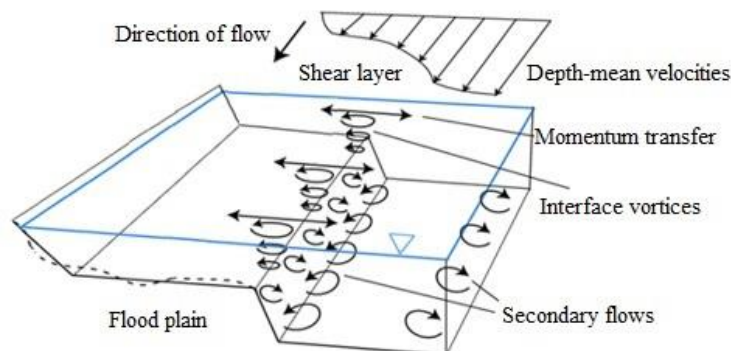
تعیین دبی جریان در رودخانه‌ها از روش سرعت-سطح مقطع به‌ویژه تحت شرایط سیلابی، با چالش‌های جدی همراه است. یک روش جایگزین، استفاده از مفهوم سرعت مشخصه مبتنی بر تعمیم سرعت سطحی به سرعت متوسط و دبی جریان است. با توجه به اینکه کارایی روش سرعت مشخصه برای مقاطع مرکب هنوز ناشناخته می‌باشد، بنابراین طی پژوهش حاضر با تکیه بر برداشت‌های آزمایشگاهی، شاخص سرعت در مقاطع مرکب در شیب کف ثابت و به ازای عمق نسبی ۰/۳، ۰/۴۲ و ۰/۵، زبری نسبی ۰/۰۳۱-۰/۰۰۳ و عدد فرود ۰/۷۹-۰/۱۴ مطالعه شده است. نتایج نشان داد مقدار بهینه شاخص سرعت جهت برآورد دبی در کل مقطع مرکب با متوسط قدر مطلق خطای نسبی ۳/۳ درصد، ۰/۸۸ می‌باشد. همچنین شاخص سرعت در مقطع اصلی ۰/۹۲ و در سیلاب‌دشت ۰/۸۶ می‌باشد و در صورت استفاده از آنها، برآورد بهتری از دبی در کانال‌های مرکب به دست می‌آید. همچنین نتایج نشان داد افزایش پارامترهای زبری نسبی و عدد فرود جریان و کاهش عمق نسبی، سبب کاهش شاخص سرعت می‌گردد. بررسی مدل‌های تحلیلی توزیع سرعت نیز نشان داد که قانون توانی سرعت با شاخص صحیح توانی نسبت به سایر مدل‌ها برآورد بهتری از شاخص سرعت ارائه می‌دهد.

کلیدواژگان: سرعت سطحی، شاخص سرعت، شرایط سیلابی، دبی جریان، کانال‌های مرکب

مقدمه

عمیق به نام مجرای اصلی و یک یا دو دشت سیلابی تشکیل می‌شوند. در مقاطع مرکب رودخانه‌ها، ضریب زبری دشت سیلابی با ضریب زبری مقطع اصلی متفاوت بوده و به دلیل تبادل جریان بین مقطع اصلی و سیلاب‌دشت‌ها، محاسبه دبی با روش‌های معمول با خطای زیادی همراه است (Zahiri & Shabani, 2018). پدیده انتقال مومنتم بین دو بخش عمیق و کم‌عمق جریان در مقاطع مرکب باعث بروز پیچیدگی‌های بسیاری در مطالعه این مقاطع شده و مشخصه‌های جریان از جمله توزیع سرعت و دبی عبوری را تحت تأثیر قرار می‌دهد، شدت و ضعف مکانیسم‌های ایجاد شده (شکل ۱) به شکل هندسی مقطع و عمق نسبی جریان عبوری وابسته است (Kordi, 2005).

سیلاب‌ها در طبقه‌بندی‌های جهانی در زمره مهم‌ترین بلایای طبیعی قرار می‌گیرند، به‌منظور برنامه‌ریزی و مدیریت سیلاب و کاهش خسارات، باید دبی جریان سیلاب و به‌تبع آن دوره بازگشت سیلاب با دقت مناسبی محاسبه شود (Liu *et al.*, 2021). اندازه‌گیری زمانی آورد رودخانه‌ها و مسیل‌ها و به‌خصوص اندازه‌گیری جریان‌های سیلابی با تأکید بر تخمین دبی پیک سیلاب‌ها اهمیت ویژه‌ای در جمع‌آوری اطلاعات پایه مدیریتی و نیز تخمین حجم آورد سالیانه رودخانه‌ها دارد (Zhang *et al.*, 2021; Xia *et al.*, 2021). رودخانه‌های طبیعی در زمان وقوع سیلاب و به‌ویژه در بازه‌های میانی و انتهایی رودخانه‌ها به شکل مقطع مرکب ظاهر می‌شوند. آبراهه‌های مرکب از یک بخش



شکل ۱- مکانیسم هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب و در مرز تماس مقطع اصلی و دشت سیلابی (Shiono & Knight, 1991)

Fig. 1- Hydraulic mechanism of flow in compound channels and at the interface of the main channel and flood plain (Shiono & Knight, 1991)

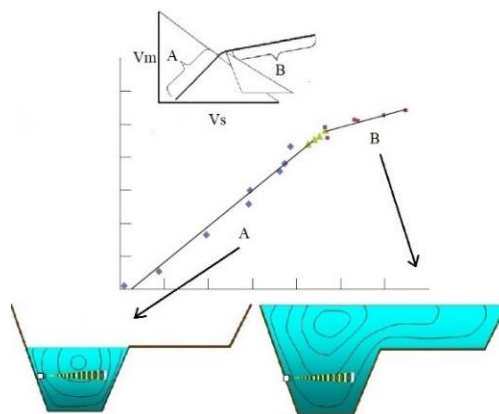
عنوان سرعت سطحی یکی از گزینه‌های برتر جهت تخمین دبی جریان در سیلاب می‌باشد (Costa *et al.*, 2006; Chen *et al.*, 2022; Huang *et al.*, 2023). اندازه‌گیری سرعت سطحی جریان در عرض رودخانه و تعمیم آن به سرعت متوسط جریان می‌تواند در جهت تصحیح روش دبی-اشل در شرایط سیلاب مورد استفاده قرار گیرد (Levesque & Oberg, 2012; Muste *et al.*, 2015; Kästner *et al.*, 2018). این روش، امکان سنجش پیوسته و ایمن سرعت و دبی رودخانه را بدون قرارگیری بهره‌بردار در مقطع رودخانه

سرعت مشخصه در واقع سرعتی است در عمق و عرض مشخصی از آبراهه که اندازه‌گیری آن نسبت به سرعت متوسط راحت‌تر بوده و با تعمیم آن به سرعت متوسط جریان، بتوان دبی جریان را به‌سادگی تخمین زد. از مشکلات و ابهاماتی که در روش سرعت مشخصه وجود دارد تعیین موقعیت سرعت مشخصه و شاخص سرعت متناسب با آن، جهت تعمیم سرعت مشخصه به سرعت متوسط می‌باشد. با توجه به اینکه اندازه‌گیری مستقیم توزیع سرعت عمقی در زمان سیلاب دشوار است، سرعت مشخصه‌ای با

امکان سنجی کاربرد مفهوم سرعت مشخصه در برآورد دبی جریان در مقطع مرکب

(2010, *al.* و متحرک نصب شده روی پهپاد، کوادکوپتر (Detert *et al.*, 2017; Koutalakis and Zaimis, 2022; Fulton *et al.*, 2020a) و تکنیک‌های سرعت‌سنجی تصاویر (Ran SSIV, LSPIV, STIV, PIV *et al.*, 2016; Legleiter *et al.*, 2017; Fujita *et al.*, 2019; Omori *et al.*, 2021; Peña-Haro *et al.*, 2021) یا سرعت سنجی ذرات (PTV) (Patalano *et al.*, 2017) یا سرعت سنجی ردیابی ذرات (Cao *et al.*, 2021) در سطح جهان است. در تمامی این روش‌ها، سرعت سطحی سنجش شده و تخمین دقیق دبی جریان و سرعت متوسط نیازمند استخراج رابطه بین سرعت سطحی و سرعت متوسط مقطع جریان و تعیین شاخص سرعت می‌باشد. شکل ۲ نمونه توسعه رابطه خطی دوگانه بین سرعت مشخصه و سرعت متوسط در یک مقطع مرکب را نشان می‌دهد. در این نمودار، رابطه بین سرعت مشخصه با سرعت متوسط با ترکیب دو معادله خطی ارائه شده که بر اساس این رویکرد به نظر می‌رسد شاخص سرعت باید بر اساس جریان عادی و سیلابی به‌طور جداگانه مورد بحث قرار گیرد.

تحت شرایط سیلابی فراهم می‌نماید. علاوه بر آن سرعت سطحی برخلاف روش معمول دبی-اشل، اثرات پدیده پسماند^۱ (تفاوت دبی جریان در شرایط خیزان و افتان در شرایط سیلابی) را در برمی‌گیرد؛ بدین ترتیب که در شرایط سیلابی، با اندازه‌گیری سرعت سطحی در یک تراز ثابت در دو شاخه صعودی و نزولی هیدروگراف، مقادیر متفاوتی برای دبی‌های جریان به‌دست خواهد آمد (Morlock *et al.*, 2002). همچنین اثرات تغییر هندسه مقطع عرضی رودخانه در طی زمان و ناشی از شرایط هیدرولیکی و رسوبی، با اندازه‌گیری سرعت سطحی نمایان خواهد شد (Levesque & Oberg., 2012). این روش طبق آخرین اطلاعات منتشر شده سازمان USGS آمریکا تا سال ۲۰۱۱ برای تقریباً ۴۷۰ ایستگاه هیدرومتری در آمریکا استفاده شده است (Levesque & Oberg., 2012). استفاده از مفهوم سرعت سطحی به‌عنوان سرعت مشخصه اساس کار دبی‌سنجی ابزارهای غیرتماسی دبی‌سنجی مانند سامر، رادارهای سرعت سطحی^۲ (Welber *et al.*, 2016; Novak *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2017)، دوربین‌های ثابت (Le Coz *et al.*, 2018)



شکل ۲- نمای شماتیکی رابطه بین سرعت مشخصه و سرعت متوسط عمقی در یک مقطع مرکب (Levesque & Oberg, 2012; Le Coz, 2018)

Fig. 2- Schematic view of the relationship between index velocity and depth-mean velocity in a compound section (Levesque & Oberg, 2012; Le Coz, 2018)

سیلابدشت‌ها بر رفتار شاخص سرعت در مقاطع مرکب انجام نشده است. بنابراین طی مطالعه حاضر به بررسی روش سرعت شاخص و کارایی این روش در مقاطع مرکب پرداخته شد.

مواد و روش‌ها

هدف از انجام آزمایش‌ها، نحوه کاربرد روش سرعت مشخصه در شرایط سیلابی (مقاطع مرکب) و تعیین شاخص سرعت مناسب جهت تخمین دبی در کل مقطع مرکب و تعیین محل اندازه‌گیری سرعت مشخصه در عرض مقطع مرکب و همچنین بررسی تأثیر پارامترهای زبری بی‌بعد، عدد فرود، عمق نسبی و عرض نسبی بر شاخص سرعت در کانال‌های مرکب می‌باشد. به‌منظور ساخت کانال مرکب در کانال مستطیلی با عرض ۶۰ سانتی‌متر از ورقه‌های آلومینیومی با ضخامت ۱ میلی‌متر استفاده شد. ارتفاع سیلابدشت در تمام آزمایش‌ها ثابت و برابر با ۷ سانتی‌متر و سه حالت عرض‌های مختلف سیلابدشت ۴۰، ۴۵ و ۵۰ سانتی‌متر در حالت صاف و همچنین یک حالت سیلابدشت با عرض ۴۰ سانتی‌متر با پوشش توری به‌صورت مرکب ساخته شد (شکل ۳) و اندازه‌گیری‌های توزیع سرعت در کانال مرکب، در مقطع اصلی و سیلابدشت در ۷ یا ۸ نقطه عرضی صورت گرفت. شکل ۳ نمایی از کانال مرکب را نشان می‌دهد.

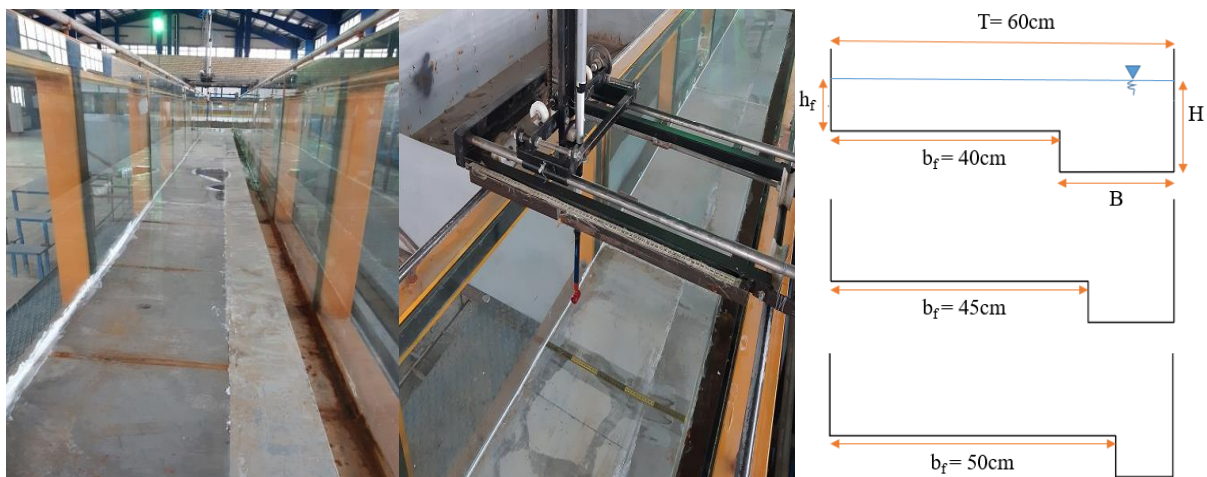
شاخص سرعت از برازش میان داده‌های سرعت سطحی و سرعت متوسط، طریق رابطه ۱ در کانال‌ها تعیین می‌شود (Levesque & Oberg, 2012; Biggs *et al.*, 2021):

$$k = \frac{V_m}{V_s} \quad (1)$$

که در رابطه فوق V_s = سرعت سطحی جریان (متر بر ثانیه)؛ V_m = سرعت متوسط عمقی (متر بر ثانیه) و k = شاخص سرعت (بی‌بعد) می‌باشند. مقدار پیش‌فرض شاخص سرعت در رودخانه‌های بزرگ و عمیق حول مقدار ۰/۸۵ یا ۰/۸۶ در نوسان است (Moramarco *et al.*, 2017; Welber *et al.*, 2016) $\frac{1}{6}$ که از نیمرخ‌های سرعتی که از قانون توانی $\frac{1}{6}$ پیروی می‌کنند نشأت می‌گیرد (Perks, 2020; Fujita, Smart and 2017; Le Coz *et al.*, 2010; Rantz, 1982; Biggs, 2020). همچنین محدوده‌های رایج گزارش شده برای این شاخص در جریان‌های کم‌عمق ۰/۸۰۵ (Weitbrecht *et al.*, 2002)، در رودخانه‌های کوهستانی ۰/۷۹ (Jodeau *et al.*, 2008)، ۰/۸۴-۰/۹ (Turnipseed & Sauer, 2010)، در رودخانه‌های با دبی کم ۰/۵۵۲ (Genç *et al.*, 2015)، ۰/۷۱-۰/۹۲ (Welber *et al.*, 2016)، آبراهه‌های با عمق و سرعت کم ۰/۵۵ (Cipolla *et al.*, 2018)، برای رودخانه‌های طبیعی ۰/۸، کانال‌های بتنی مصنوعی ۰/۹ (Hauet *et al.*, 2018)، در رودخانه‌های طبیعی ۰/۸۴-۰/۹ (Fulton *et al.*, 2020b) و همچنین مقادیر ۰/۵۵۱ (Chen *et al.*, 2022) و ۰/۴۱۳ در محل تلاقی رودخانه‌های خیلی بزرگ (Bahmanpouri *et al.*, 2022) می‌باشد.

بر این اساس، پراکندگی قابل‌توجهی در مقادیر شاخص سرعت از سابقه مطالعاتی، قابل درک است که ضرورت انجام مطالعه‌ای جهت تعیین مقدار بهینه شاخص سرعت را تبیین می‌نماید. همچنین مرور منابع نشان می‌دهد که تاکنون مطالعاتی در خصوص تأثیر پارامترهای عمق، عرض و زبری

امکان سنجی کاربرد مفهوم سرعت مشخصه در برآورد دبی جریان در مقطع مرکب



شکل ۳- نمایی از مقطع عرضی و کانال آزمایشگاهی مرکب

Fig. 3- A view of the cross-section and laboratory compound channel

عرض مقطع مرکب، سرعت‌های متوسط به کمک انتگرال-گیری توزیع‌های عمقی سرعت محاسبه شد.

به‌منظور محاسبه ضریب زبری مانینگ ابتدا فقط در مقطع اصلی کانال، آزمایش‌ها را در دو حالت صاف و زبر انجام داده و جریان با باز و بسته نمودن متعدد دریچه انتهایی به جریان یکنواخت تبدیل شد به طوری که عمق جریان با دقت ۱ میلی‌متر در تمام طول کانال ثابت شد و سپس در این شرایط با معلوم بودن دبی جریان، شیب کف، عمق جریان و هندسه مقطع اصلی، ضریب زبری مانینگ از معادله مانینگ محاسبه شد. در حالت بستر صاف (فلزی)، ضریب زبری مانینگ حدود 0.011 و در حالت بستر با پوشش توری، حدود 0.016 برآورد شد. شاخص سرعت در هر کدام از آزمایش‌ها در عرض‌های مختلف سیلاب‌دشت، در دبی‌ها و اعماق مختلف جریان (0.1 ، 0.12 و 0.14 متر) محاسبه گردید. در جدول ۱ خلاصه‌ای از آزمایش‌های انجام‌شده و محدوده داده‌های آزمایشگاهی ارائه شده است.

به‌منظور کاهش اثر آشفتگی جریان و نیز اطمینان از توسعه‌یافتگی کامل جریان در کانال، برداشت داده‌ها در مقطع انتخابی کانال در فاصله $6/5$ متری از ابتدای کانال انجام شد. سیستم گردش جریان آب در این کانال بدین صورت است که ابتدا جریان از مخزن ذخیره به مخزن ورودی پمپاژ می‌شود. مخزن ورودی در ابتدای کانال قرار دارد که سبب می‌شود آشفتگی جریان آب با ورود به این مخزن کاهش یابد و جریان به حالت آرام وارد کانال شود. پس از ورود جریان به داخل کانال و عبور آن، وارد مخزن خروجی انتهایی کانال شده و پس از آن به داخل مخزن ذخیره می‌ریزد. به‌منظور اندازه‌گیری سرعت سطحی و سرعت جریان در اعماق مختلف از دستگاه میکرومولینه آلمانی (MiniAir20) و جهت اندازه‌گیری نقاط عمقی جریان از ترازسنج دیجیتال با دقت 0.1 میلی‌متر استفاده شد. برای تنظیم دقیق دبی جریان، دستگاه دیجیتالی فرکانس‌سنج روی هر کدام از کانال‌ها نصب شده است. جهت محاسبه دبی‌های جریان مربوط به هر فرکانس، از روش دبی حجمی در مخزن خروجی کانال‌ها استفاده شد. به‌منظور اندازه‌گیری مقدار شاخص سرعت در هر نقطه از

جدول ۱- فهرستی از آزمایش های انجام شده

Table 1- A list of tests performed

شکل مقطع عرضی Cross-section	عدد فرود Froude Number	عدد رینولدز $\times 10^4$ Reynolds Number $\times 10^4$	دبی جریان (لیتر بر ثانیه) Discharge (lit/s)	عرض نسبی b/B	عمق نسبی h/H
جریان در مقطع اصلی کانال مرکب Simple Channels (Inbank)	0.32-0.63	5-11.62	6.64, 13.08, 15.9	-	-
کانال مرکب با سیلابدشت صاف Compound Channels with Smooth floodplain (Overbank)	0.18-0.74	3.23-9.85	7.64, 15.88, 23.91	5	0.3, 0.42, 0.5
	0.15-0.77	3.11-10.18	7.64, 15.88, 23.91	3	0.3, 0.42, 0.5
	0.14-0.77	2.92-10.16	7.64, 15.88, 23.91	2	0.3, 0.42, 0.5
کانال مرکب با سیلابدشت با پوشش توری Compound Channels with floodplain with metal mesh (Overbank)	0.15-0.79	2.89-11.25	7.64, 15.88, 23.91	2	0.3, 0.42, 0.5

در جدول فوق پارامترهای B = عرض مقطع اصلی (متر)؛ b_f = عرض سیلابدشت (متر)؛ H = عمق جریان در مقطع اصلی (متر)؛ h_f = عمق جریان در سیلابدشت (متر) می باشند.

که در آن، پارامتر P_i = محیط مقطع خیس شده جریان (متر) و n_i = ضریب زبری مانینگ در هر بخش کانال مرکب (ثانیه بر متر به توان یک سوم) و P_T = محیط کل مقطع خیس شده جریان (متر) می باشد. با توجه به محدوده اعداد رینولدز و فرود جریان در جدول ۱، تمامی آزمایش های پژوهش حاضر در حالت جریان زیر بحرانی و رژیم آشفته قرار دارند، بنابراین از بررسی عدد رینولدز جریان صرف نظر شد. در ادامه به بررسی تأثیر پارامترهای بی بعد T/H ، زبری نسبی، عمق نسبی و عرض نسبی سیلابدشت و عدد فرود جریان بر روی شاخص سرعت پرداخته شد.

بررسی رویکردهای تحلیلی بر اساس توابع توزیع قائم

سرعت

در این حالت مقادیر شاخص سرعت در عرض کانال مرکب، از معادلات توزیع سرعت توانی، لگاریتمی و معادله ترکیبی لگاریتمی-سهموی محاسبه گردید و مقادیر شاخص سرعت در دو بخش سیلابدشت و مقطع اصلی در نمودارها مشخص شده است. پروفیل قائم سرعت اندازه گیری شده در کانال های باز را می توان به خوبی با قانون توانی سرعت (رابطه ۴) نشان داد (Nelson et al., 2017):

$$V = Ay^m \quad (4)$$

تحلیل ابعادی بر اساس پارامترهای مورد بررسی در

آزمایش های کانال های مرکب

با انجام تحلیل ابعادی به روش π باکینگهام، پس از ساده سازی ها و گروه بندی متغیرهای مهم، پارامترهای بی بعد مؤثر بر ارتباط بین سرعت سطحی و سرعت متوسط جریان را می توان با رابطه (۲) نشان داد:

$$k = f\left(\frac{T}{H}, \frac{nV^*}{R^{\frac{2}{3}}}, \frac{h_f}{H}, \frac{b_f}{B}, Fr, Re\right) \quad (2)$$

که در آن n = ضریب زبری مانینگ (ثانیه بر متر به توان یک سوم)، T = عرض سطح آزاد آب (متر)، R = شعاع هیدرولیکی جریان (متر)، V^* = سرعت برشی (متر بر ثانیه)، Fr = عدد فرود (بی بعد) و Re = عدد رینولدز جریان (بی بعد) می باشند. در کانال مرکب با پوشش توری در سیلابدشت در پارامتر زبری نسبی، n_e = زبری معادل (ثانیه بر متر به توان یک سوم) جایگزین n شد. n_e از رابطه ۳ (Yen, 1992) محاسبه گردید (Bazargan and Rajabi, 2020):

$$n_e = \frac{\sum P_i R_i^{\frac{1}{3}} n_i}{P_T R_T^{\frac{1}{3}}} \quad (3)$$

امکان سنجی کاربرد مفهوم سرعت مشخصه در برآورد دبی جریان در مقطع مرکب

که $V =$ سرعت جریان رودخانه در هر نقطه از جریان (متر بر ثانیه) با فاصله y از کف آبراهه (متر)، $A =$ ضریب تجربی (بی بعد) و $m =$ شاخص قانون توانی توزیع سرعت (بی بعد) می باشند. جدول ۲ بدین منظور قابل استفاده است (Biggs et al., 2021).

جدول ۲- مقادیر مختلف شاخص قانون توانی توزیع سرعت بر اساس زبری بستر (Le Coz et al., 2011; Fujita, 2018)

Table 2- Different values of the velocity distribution power law index based on site roughness (Le Coz et al., 2011; Fujita, 2018)

نرمال	صاف	زبر	خیلی زبر
Normal	Smooth	Rough	Very rough
0.143-0.167	0.1	0.25	0.333-0.5

که $g =$ شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه) و $S_f =$ شیب خط انرژی (بی بعد) می باشند. بر اساس رابطه فوق پارامتر k با ضریب زبری مانینگ ارتباط عکس دارد.

معادلات پروفیل سرعت لگاریتمی - سهموی دارای دو قسمت است که یکی از آن ها لگاریتمی و یکی سهموی است:

$$V = \frac{V_*}{\kappa} \ln\left(\frac{y}{z_0}\right) \quad (9)$$

برای $y/h < 0.2$

$$V = \beta \frac{V_*}{\kappa} \left[\frac{y}{h} - \frac{1}{2} \left(\frac{y}{h}\right)^2 + \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{0.2h}{z_0}\right) - 0.18 \right] \quad (10)$$

برای $y/h > 0.2$

در رابطه فوق z_0 ارتفاع زبری مطلق (متر) می باشد. با یکپارچه سازی معادلات فوق در سراسر عمق جریان و با فرض ضریب ثابت تجربی $\beta = 6/25$ ، سرعت متوسط عمقی به صورت زیر خواهد بود:

$$V_m = \frac{V_*}{\kappa} \left[\ln\left(\frac{0.2h}{z_0}\right) + 0.85 + \frac{z_0}{h} \right] \quad (11)$$

بنابراین در این حالت شاخص سرعت به صورت زیر خواهد شد (Nelson et al., 2017):

$$k = \frac{\ln\left(\frac{0.2h}{z_0}\right) + 0.85 + \frac{z_0}{h}}{\ln\left(\frac{0.2h}{z_0}\right) + 2} \quad (12)$$

با در نظر گرفتن توزیع لگاریتمی و توزیع لگاریتمی - سهموی، شاخص سرعت تابعی از ضریب زبری مانینگ (ارتفاع زبری)

در این پژوهش با استفاده از جدول فوق مقادیر شاخص توانی در مقاطع صاف $0/1$ و برای مقاطع با پوشش توری $0/25$ انتخاب شد.

با انتگرال گیری از رابطه ۴، سرعت میانگین عمقی به صورت رابطه زیر خواهد بود:

$$V_m = \int_0^h V(y) dy = \left(\frac{A}{m+1}\right) h^m \quad (5)$$

که h عمق کل جریان (متر) است. نهایتاً طبق این قانون، شاخص سرعت برابر خواهد بود با:

$$k = \frac{1}{m+1} \quad (6)$$

بنابراین با در نظر گرفتن تابع توزیع توانی سرعت، شاخص سرعت فقط تابع شاخص توانی خواهد بود و در تمامی اعماق جریان برابر با عدد ثابت خواهد شد (Nelson et al., 2017).

در توزیع لگاریتمی که سرعت در هر عمق به صورت تابعی از عمق کل مقطع، سرعت سطحی، شیب، زبری بستر و ... می باشد، شاخص سرعت متفاوت خواهد بود. رابطه توزیع لگاریتمی سرعت به صورت زیر می باشد:

$$V = V_s + \frac{V_*}{\kappa} \ln\left(\frac{y}{h}\right) \quad (7)$$

که $\kappa = 0/4$ ثابت وان-کارمن (بی بعد) می باشد. در این شرایط شاخص سرعت از رابطه زیر قابل محاسبه است:

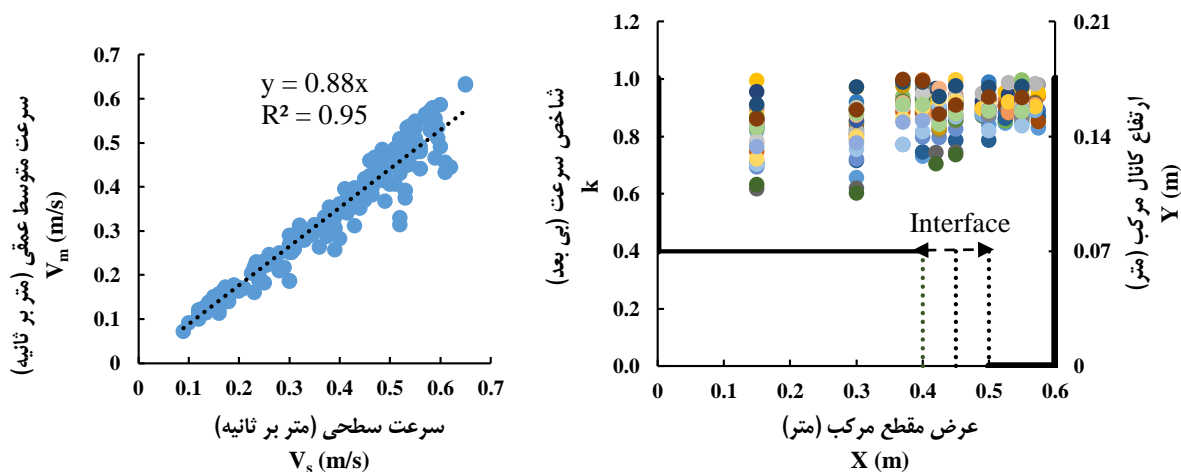
$$k = 1 - \frac{\sqrt{gRS_f}}{V_s \kappa} = 1 - \left(\frac{7.64 \sqrt{RS_f}}{V_s}\right) = \frac{1}{1 + \left(\frac{7.64n}{R^{1/6}}\right)} \quad (8)$$

مقادیر شاخص سرعت در عرض مقطع مرکب شکل ۴ توزیع های عرضی مقادیر شاخص سرعت را در دبی-ها و اعماق نسبی مختلف در عرض های مختلف سیلابدشت نشان می دهد. با توجه به این شکل، دامنه تغییرات مقادیر شاخص سرعت در محدوده کانال اصلی تغییرات کمتری نسبت به بخش سیلابدشتها دارد. در مرز بین سیلابدشتها و مقاطع اصلی نیز به دلیل آشفتگی جریان و تنش برشی زیاد، محدوده تغییرات شاخص سرعت گسترش یافته است. با برآزش میان کل داده های سرعت سطحی و سرعت متوسط در عرض مقطع مرکب، مقدار شاخص سرعت (شیب خط برآزش) برای کانال های مرکب ۰/۸۸ حاصل شد.

و شعاع هیدرولیکی (عمق کل جریان) خواهد بود درحالی- که در تابع توزیع توانی، شاخص سرعت فقط تابع شاخص توانی (m) خواهد بود اما مقدار این شاخص بر حسب زبری بستر تعیین می شود (Nelson et al., 2017).

نتایج و بحث

با بررسی توزیع های عمقی و عرضی سرعتها در کانال مرکب، مقادیر شاخص سرعت در هر نقطه عرضی کانال با توجه به مقادیر سرعت سطحی و سرعت متوسط محاسبه گردید.



شکل ۴- مقادیر شاخص سرعت در عرض مقاطع مرکب

Fig. 4- Values of the velocity index in the width of the compound sections

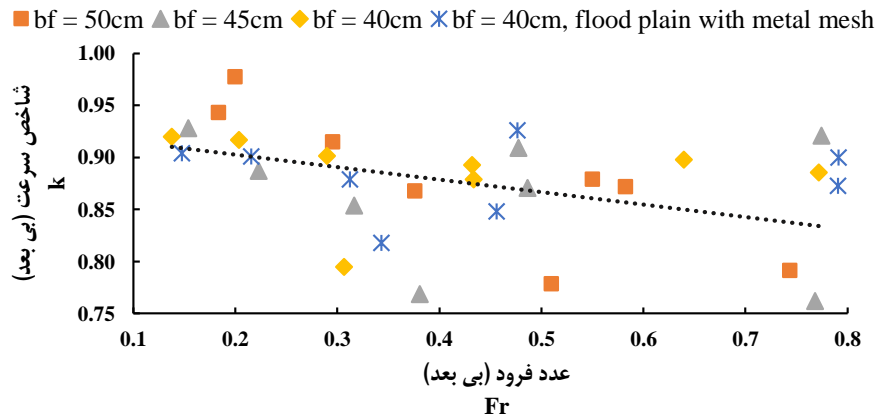
شد که در تمامی آزمایشها عدد فرود جریان در محدوده ۰/۷۹-۰/۱۴ و حالت جریان زیربحرانی می باشد. با توجه به شکل ۵ با افزایش اعداد فرود در مجموعه داده های آزمایشگاهی کانال مرکب، شاخص سرعت شیب کاهشی دارد. همچنین با افزایش عدد فرود (افزایش سرعت متوسط عمقی و کاهش عمق جریان)، پراکندگی دامنه تغییرات شاخص سرعت بیشتر خواهد شد. روابط برآزش آماری جفت داده ها با توجه به پراکندگی نقاط، R^2 مناسبی نشان نداد و ارائه نشد.

به منظور انجام تحلیل ابعادی و بررسی تأثیر هر یک از پارامترهای بی بعد، از شاخص سرعت در کل عرض مقطع مرکب در هر آزمایش میانگین گرفته شد. بدین صورت تأثیر هر یک از پارامترهای بی بعد با توجه به آزمایش های انجام شده روی مقاطع مرکب مشخص شد.

بررسی اثر عدد فرود جریان بر تغییرات شاخص سرعت در کانال مرکب

با محاسبه میانگین شاخص سرعت در عرض مقاطع مرکب و با محاسبه عدد فرود جریان در کانال های مرکب مشخص

امکان سنجی کاربرد مفهوم سرعت مشخصه در برآورد دبی جریان در مقطع مرکب



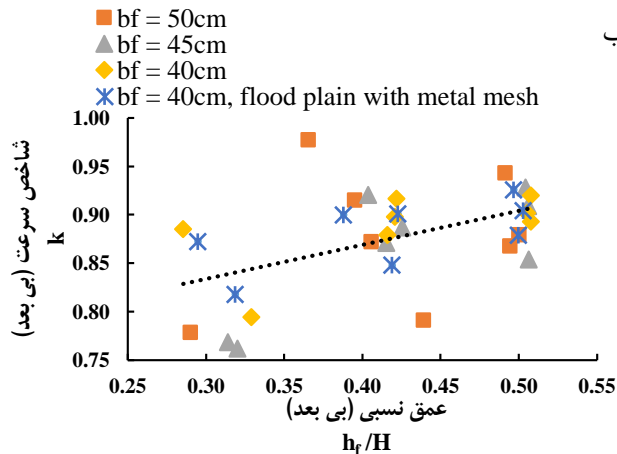
شکل ۵- تغییرات شاخص سرعت نسبت به عدد فرود جریان در کانال مرکب

Fig. 5- Velocity index changes in relation to Froude number of flow in the compound channel

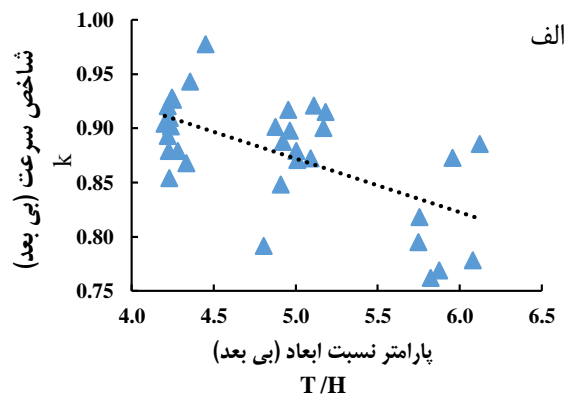
شاخص سرعت کاهش می‌یابد اما با افزایش عمق نسبی جریان در سیلاب‌دشت، شاخص سرعت افزایش می‌یابد. بنابراین در کانال‌های عریض نسبت به کانال‌های غیرعریض مقادیر شاخص سرعت کمتر می‌باشد و تأثیر دیواره‌ها که با افزایش عمق جریان همراه است سبب افزایش شاخص سرعت می‌شود. شاخص سرعت در بردارنده نسبت سرعت‌ها می‌باشد و در اعماق بالا، مقادیر سرعت متوسط و سطحی به یکدیگر نزدیک‌تر می‌شوند و شاخص سرعت به عددی نزدیک به یک می‌رسد. روابط برازش آماری با توجه به R^2 پایین، به دلیل تعداد بالا و پراکندگی نقاط قابل ارائه نبود و به نشان دادن روند کلی اثر پارامترها اکتفا شد.

بررسی تأثیر پارامتر T/H و عمق نسبی سیلاب‌دشت بر شاخص سرعت

به‌طور کلی به‌منظور بررسی تأثیر عمق کل جریان در کانال‌های مرکب، از پارامتر T/H و جهت بررسی اثر عمق جریان در سیلاب‌دشت از پارامتر نسبت عمق جریان در سیلاب‌دشت به عمق کل جریان استفاده شد. در این پژوهش آزمایش‌های کانال مرکب در سه عرض سیلاب‌دشت، سه عمق نسبی و سه دبی در شکل ۶ الف و ب رسم شد. در تمامی آزمایش‌ها، ارتفاع بخش سیلاب‌دشت، ثابت و برابر با ۷ سانتی‌متر می‌باشد. همان‌طور که از شکل ۶ مشخص می‌باشد با افزایش پارامتر T/H



ب

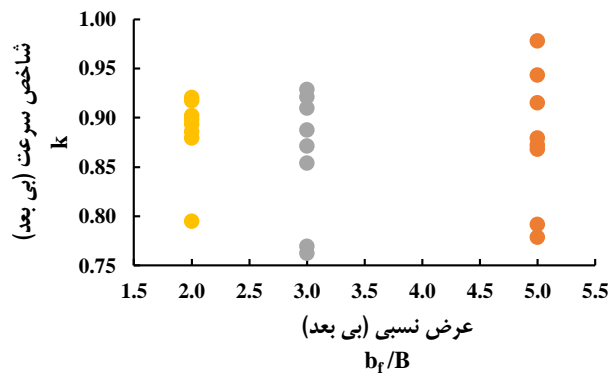


شکل ۶- تغییرات شاخص سرعت نسبت به الف- عمق نسبی کل جریان ب- عمق نسبی سیلاب‌دشت

Fig. 6- Velocity index changes in relation to a- relative depth of the total flow b- relative depth of flood plain

افزایش یابد دامنه تغییرات شاخص سرعت پراکنده تر خواهد شد. با افزایش عرض نسبی سیلابدشتها، میزان تأثیر سیلابدشتها روی نرخ کاهش سرعت بیشتر شده و شاخص سرعت مقادیر متفاوتی را در عرض های نسبی بالاتر دارد.

بررسی تأثیر پارامتر عرض نسبی در کانال مرکب بر شاخص سرعت
با توجه به تحلیل ابعادی صورت گرفته به منظور بررسی تأثیر تغییرات عرض سیلابدشتها در کانال های مرکب بر روی شاخص سرعت، از پارامتر عرض نسبی استفاده شد. با توجه به شکل ۷ هر چه عرض نسبی در کانال های مرکب

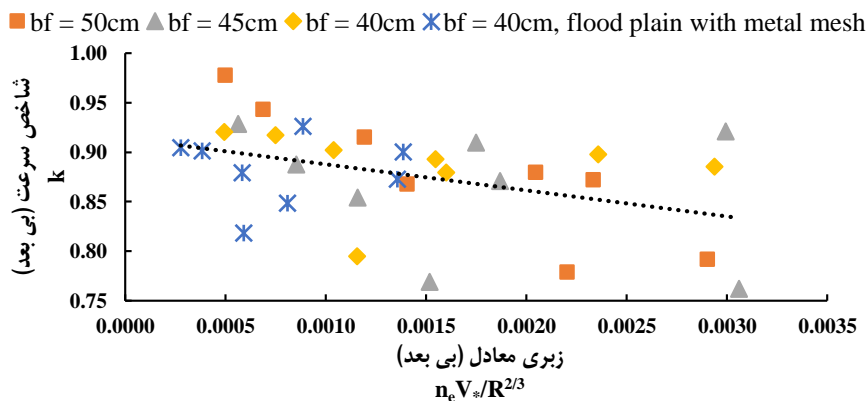


شکل ۷- تغییرات شاخص سرعت نسبت به پارامتر عرض نسبی در کانال مرکب

Fig. 7- Velocity index changes in relation to the relative width parameter in the compound channel

آنالیز ابعادی ترسیم گردید. با توجه به شکل ۸ با افزایش زبری بی بعد، شاخص سرعت کاهش می یابد. به دلیل تأثیر افزایش تنش و سرعت برشی روی پروفیل سرعت، در زبری های بالاتر مقادیر شاخص سرعت کاهش می یابد. به دلیل پراکندگی نقاط، روابط آماری ارائه نشد.

بررسی اثر زبری بی بعد در کانال مرکب بر تغییرات شاخص سرعت
به منظور بررسی اثر زبری در کانال های مرکب، سرتاسر عرض سیلابدشت ۴۰ سانتی متر با پوشش توری یکنواخت زبر گردید. در شکل ۸ نمودار پارامتر زبری بی بعد حاصل از



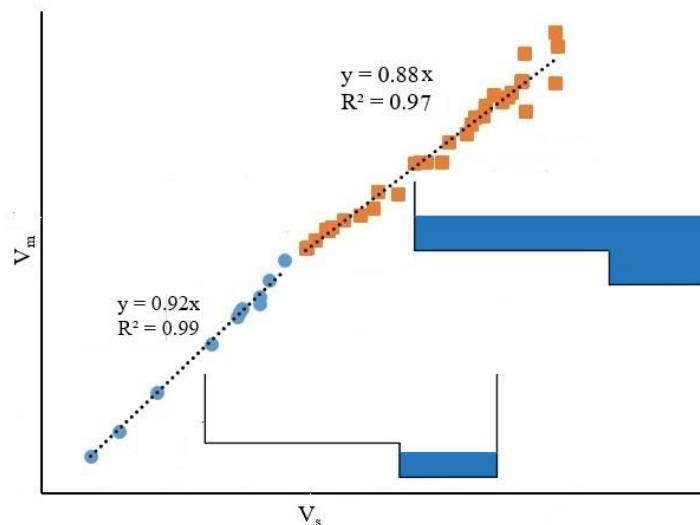
شکل ۸- تغییرات شاخص سرعت نسبت به پارامتر ضریب زبری نسبی در کانال مرکب

Fig. 8- Velocity index changes in relation to the relative roughness coefficient parameter in the compound channel

امکان سنجی کاربرد مفهوم سرعت مشخصه در برآورد دبی جریان در مقطع مرکب

سیلابدشت‌ها افزایش یابد میزان پراکندگی و تغییرات شاخص سرعت نیز بیشتر خواهد شد. این نتیجه حاکی از آن است که مقدار شاخص سرعت در شرایط عادی و سیلابی رودخانه متفاوت می‌باشد. بنابراین با مقایسه میان داده‌های سرعت سطحی و متوسط هنگامی که جریان در مقطع اصلی جریان دارد نسبت به حالت سیلابی مشخص شد که مقدار شاخص سرعت در حالت جریان عادی (Inbank) (Ghorbani *et al.*, 2023) ۰/۹۲ و در حالت سیلابی (Overbank) ۰/۸۸ می‌باشد (شکل ۹).

بررسی روند تغییرات پارامترهای بی‌بعد در کانال‌های مرکب و ساده نشان می‌دهد افزایش عدد فرود و زبری نسبی در کانال اصلی و سیلابدشت‌ها سبب کاهش شاخص سرعت خواهد شد. بنابراین مقاومت بستر در شرایط عادی و سیلابی رابطه معکوس با شاخص سرعت دارد. همچنین بررسی‌ها نشان داد که شاخص سرعت در کانال‌های ساده و مرکب، با عمق نسبی جریان رابطه‌ای مستقیم دارد اما با افزایش عرض کانال در شرایط عادی، شاخص سرعت کاهش می‌یابد. همچنین اضافه شدن سیلابدشت‌ها به کانال اصلی نیز به دلیل تأثیر روی سرعت‌ها، سبب تغییرات شاخص سرعت می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که هر چه مقدار عرض



شکل ۹- شکل شماتیکی برازش میان داده‌های سرعت سطحی و سرعت متوسط در شرایط عادی و سیلابی کانال

Fig. 9- Schematic shape of fitting between the data of surface velocity and average velocity in inbank and overbank conditions of open channels

شاخص سرعت کمتر از حالت عادی آن می‌باشد. مقادیر دبی کانال مرکب با استفاده از سه حالت کلی تخمین زده شد. در حالت اول با استفاده از مقدار شاخص سرعت ۰/۸۵ ارائه شده توسط محققین، در حالت دوم با استفاده از مقدار بهینه شاخص سرعت به دست آمده ۰/۹۲ در شرایط عادی (Inbank) (Ghorbani *et al.*, 2023) و در حالت سوم با مقدار بهینه شاخص سرعت به دست آمده ۰/۸۸ در مقطع مرکب محاسبه گردید. سپس مقادیر $RMAE =$ متوسط قدر مطلق خطای نسبی (درصد) $MRE =$ بیشترین خطای

با ترسیم نمودار فوق مشاهده شد که شیب نمودار در حالت عادی و شرایط سیلابی با هم متفاوت می‌باشد (مشابه شکل ۲). این شیب مقدار شاخص سرعت را نشان می‌دهد. در شرایط سیلابی، سیلابدشت‌ها بر سرعت‌ها تأثیر می‌گذارند و سبب کاهش سرعت در مقطع اصلی می‌شوند. اما تأثیر سیلابدشت‌ها بر سرعت متوسط بیشتر از سرعت سطحی می‌باشد چون هر چه نقطه مدنظر به کف کانال نزدیک‌تر باشد، تنش برشی بستر تأثیر بیشتری بر میزان کاهش سرعت آن دارد. بنابراین در حالت سیلابی رودخانه‌ها، مقدار

$$MRE = \max \left| \frac{Q_{exp} - Q_{cal}}{Q_{exp}} 100 \right|_i \quad (14)$$

برآورد دبی (درصد) نیز به ترتیب با استفاده از روابط زیر محاسبه شد و در جدول ۳ ارائه گردید.

که در روابط فوق پارامترهای Q_{exp} = دبی واقعی (مشاهداتی) (لیتر بر ثانیه)؛ Q_{cal} = دبی محاسباتی (لیتر بر ثانیه) و N = تعداد آزمایش ها (بی بعد) می باشند.

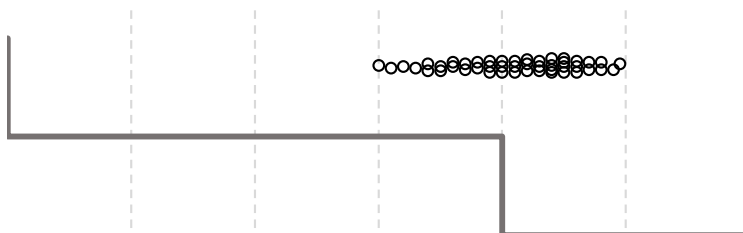
$$RMAE = \frac{\sum_{i=1}^N \left| \frac{Q_{exp} - Q_{cal}}{Q_{exp}} 100 \right|}{N} \quad (13)$$

جدول ۳- مقادیر خطای نسبی تخمین دبی در کل عرض مقطع مرکب

پارامترهای آماری خطا Error statistics parameters	در مقاطع مستطیلی ساده In simple rectangular sections (Inbank) k = 0.92	مقدار پیش فرض محققین The default value of researchers k = 0.85	در مقاطع مرکب و شرایط سیلابی In compound sections and flood conditions (Overbank) k = 0.88
متوسط قدر مطلق خطای نسبی (درصد) RMAE (%)	5.2	4.4	3.3
بیشترین خطای برآورد دبی (درصد) MRE (%)	12.8	13.1	10.1

تراکم نقاط با شاخص سرعت بهینه در محدوده مرز بین سیلاب دشت و مقطع اصلی کانال مرکب قرار دارد. با توجه به شکل ۱۰ با در نظر گرفتن نقطه صفر در نقطه شروع سیلاب دشت رودخانه، ۷۱ درصد نقاط در یک چهارم انتهایی سیلاب دشت و نیمه ابتدایی مقطع اصلی قرار دارند. به عبارت دیگر با اندازه گیری سرعت سطحی در این محدوده با استفاده از شاخص سرعت ۰/۸۸ تخمین دبی به مقدار واقعی آن نزدیک تر می باشد.

مقادیر خطای نسبی تخمین دبی در جدول فوق نشان می دهد که در شرایط سیلابی، مقدار شاخص سرعت با شرایط عادی رودخانه متفاوت می باشد و با مقداری تعدیل مقدار پذیرفته شده محققین (۰/۸۵)، خطای تخمین دبی کمتر خواهد شد و دبی جریان به صورت بهتری برآورد می گردد. بنابراین مقدار بهینه شاخص سرعت ارائه شده برای تخمین دبی در شرایط سیلاب ۰/۸۸ می باشد. با بررسی موقعیت قرارگیری مقدار بهینه شاخص سرعت ۰/۸۸ در عرض کل مقطع مرکب مشخص شد بیشترین



شکل ۱۰- موقعیت قرارگیری نقاط با شاخص سرعت ۰/۸۸ در عرض مقطع مرکب

Fig. 10- The location of points with a velocity index of 0.88 across the compound section

امکان سنجی کاربرد مفهوم سرعت مشخصه در برآورد دبی جریان در مقطع مرکب

سرعت متوسط مقدار شاخص سرعت در مقطع اصلی ۰/۹۲ و در سیلابدشت ۰/۸۶ حاصل گردید. به منظور برآورد دبی جریان در مقطع اصلی از شاخص بهینه این مقطع (۰/۹۲) و شاخص بهینه کل مقطع مرکب (۰/۸۸) استفاده شد و پارامترهای آماری خطای تخمین دبی در کانال اصلی با استفاده از روابط زیر محاسبه شد و در جدول ۴ ارائه شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_{exp} - Q_{cal})^2} \quad (15)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |Q_{exp} - Q_{cal}|}{N} \cdot 100 \quad (16)$$

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{exp} - Q_{cal})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{exp} - \bar{Q}_{exp})^2} \quad (17)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^N Q_{exp} - \sum_{i=1}^N Q_{cal}}{\sum_{i=1}^N Q_{exp}} \quad (18)$$

در بسیاری از مطالعات علمی از جمله برای محاسبات میزان انتقال بار بستر و معلق رودخانه‌ها در زمان سیل، فقط دبی جریان در مقطع اصلی رودخانه مؤثر بوده و دبی سیلابدشت‌ها در عمل در این فرآیند نقشی ندارد (Ackers, 1992). برای تعیین حجم رسوب بستر و رسوب معلق عبوری از هر ایستگاه هیدرومتری در رودخانه، باید دبی مقطع اصلی را از دبی کل سیل تفکیک نمود و سپس در روابط تجربی محاسبه ظرفیت حمل رسوب قرار داد. همچنین به دلیل اختلاف زیاد در شرایط هندسی و هیدرولیکی مجرای اصلی رودخانه و سیلابدشت‌های آن، سرعت متوسط جریان در رودخانه معیار خوبی برای اظهارنظر در خصوص رفتار رودخانه مانند فرسایشی یا رسوب‌گذار بودن نیست و برای پیش‌بینی تغییرات مورفولوژی (تغییر شکل مقطع و شیب طولی) رودخانه‌ها، تعیین سرعت و دبی در مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی به صورت تفکیک شده لازم است (Zahiri et al., 2015). بنابراین تعیین دبی در مقطع اصلی رودخانه در شرایط سیلابی دارای اهمیت می‌باشد. بدین منظور در این روش مقادیر شاخص سرعت در مقطع اصلی و سیلابدشت به طور جداگانه محاسبه شد. از برآزش داده‌های سرعت سطحی و

جدول ۴- مقادیر پارامترهای خطای آماری تخمین دبی در مقطع اصلی کانال مرکب

Table 4- The values of statistical error parameters of discharge estimation in the main channel of the compound channel

پارامترهای آماری خطا Error statistics parameters	k = 0.92	k = 0.88
RMSE	0.0010	0.0012
MAE (%)	0.074	0.096
ENS	0.926	0.881
CRM	0.089	0.129

E_{NS} نسبت به شاخص سرعت بهینه کل مقطع مرکب، برآورد بهتری از دبی واقعی جریان در مقطع اصلی نشان می‌دهد.

با توجه به تفکیک صورت گرفته و محاسبه مقدار شاخص سرعت بهینه در کانال اصلی ($k_c = 0/92$) و سیلابدشت

با توجه به جدول فوق و مقادیر پارامترهای خطای محاسبه شده، مقدار شاخص سرعت ۰/۹۲ با کمترین مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین قدرمطلق خطاها (MAE) و ضریب باقی‌مانده (CRM) و بیشترین ضریب کارایی نش- ساتکلایف (Nash and Sutcliffe, 1970)

شخص های سرعت بهینه به دست آمده برای این دو بخش نیز محاسبه شد و با حالت قبل که یک شاخص بهینه برای کل کانال مرکب با توجه به $(k_f = 0.16)$ مقدار دبی کل کانال مرکب با توجه به پارامترهای آماری خطای تخمین دبی در هر دو حالت محاسبه گردید و در جدول ۵ ارائه گردید.

جدول ۵- مقادیر پارامترهای آماری تخمین دبی در کانال مرکب

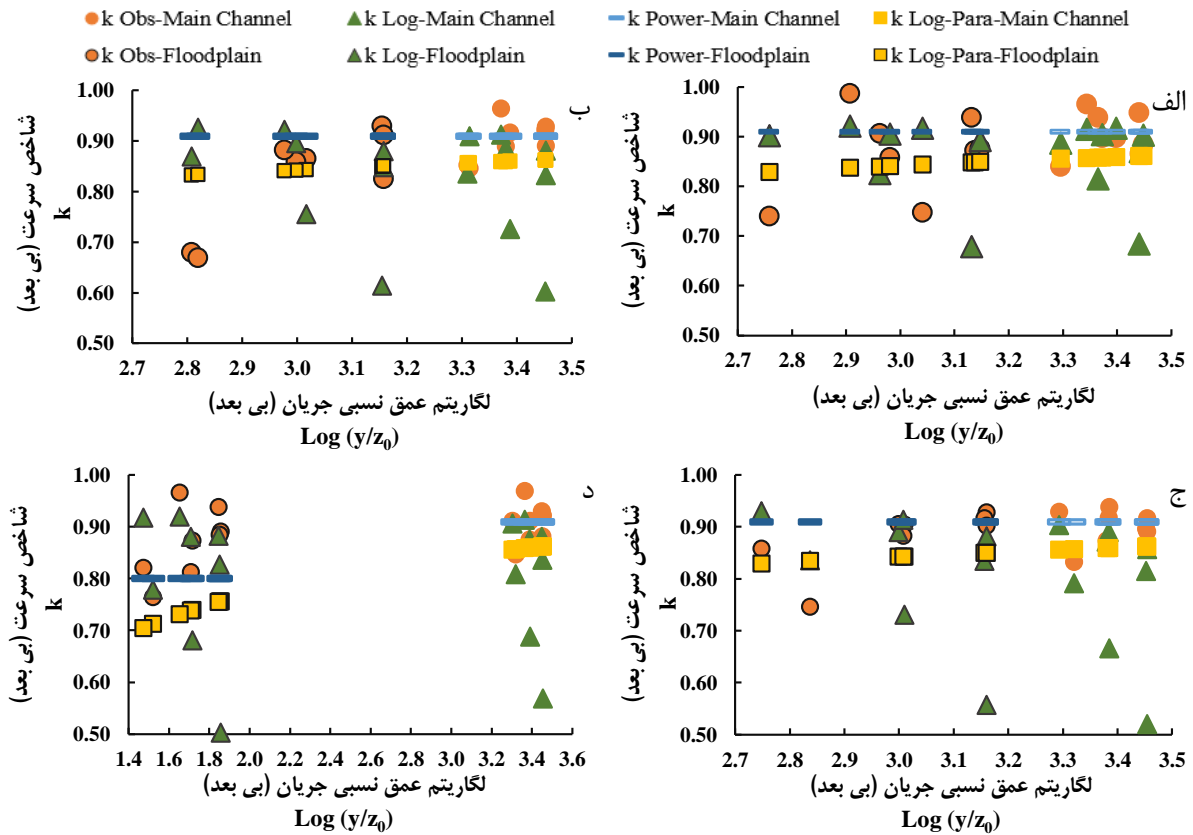
Table 5- Values of statistical parameters of flow estimation in compound channel

پارامترهای آماری خطا Error statistics parameters	شاخص سرعت بهینه در مقطع اصلی و سیلاب دشت $k_c = 0.92, k_f = 0.86$	شاخص سرعت بهینه مقطع مرکب $k = 0.88$
RMSE	0.0018	0.0024
MAE (%)	0.134	0.183
E_{NS}	0.922	0.859
CRM	0.071	0.109

تحلیل شاخص سرعت بر اساس پروفیل های سرعت شکل ۱۱ مقادیر متوسط شاخص سرعت را بر اساس معادلات توزیع سرعت، در هر مقطع عرضی در سیلاب دشت ها و مقاطع اصلی نشان می دهد. با مقایسه مقادیر شاخص سرعت از این روش ها با داده های آزمایشگاهی که در مقطع اصلی و سیلاب دشت کانال برداشت شد، مشاهده می شود دامنه تغییرات این شاخص از $0.99-0.5$ متغیر می باشد و توزیع لگاریتمی کمترین مقادیر شاخص سرعت را نشان می دهد و توزیع توانی در مقطع اصلی کانال مقادیر نزدیک تری نسبت به داده های مشاهداتی نشان می دهد.

با مشاهده مقادیر پارامترهای آماری خطای تخمین دبی در حالت تفکیک مقطع اصلی و سیلاب دشت و حالت کل مقطع مرکب مشخص شد کمترین مقادیر RMSE، MAE و CRM و بیشترین مقادیر E_{NS} مربوط به حالت تفکیک دبی ها در سیلاب دشت و مقطع اصلی می باشد. بنابراین استفاده از شاخص بهینه تفکیک شده در مقطع اصلی و سیلاب دشت نسبت به شاخص سرعت بهینه در کل مقطع، برآورد بهتری از دبی واقعی جریان در کل مقطع مرکب می دهد.

امکان سنجی کاربرد مفهوم سرعت مشخصه در برآورد دبی جریان در مقطع مرکب



شکل ۱۱- مقادیر شاخص سرعت در سیلاب‌دشت و مقطع اصلی الف-عرض سیلاب‌دشت ۵۰ سانتی‌متر ب- عرض سیلاب‌دشت ۴۵ سانتی‌متر ج- عرض سیلاب‌دشت ۴۰ سانتی‌متر د- عرض سیلاب‌دشت با پوشش توری ۴۰ سانتی‌متر

Fig. 11- Velocity index values in the flood plain and the main channel a- Width of the flood plain 50 cm b- Width of the flood plain 45 cm c- Width of the flood plain 40 cm d- Width of the flood plain with metal mesh 40 cm

مجموع همه دبی‌های جرئی با دبی واقعی مقایسه شد. مقادیر متوسط قدرمطلق خطای نسبی تخمین دبی در کل مقطع مرکب و کانال اصلی در جدول ۶ ارائه گردید.

به‌منظور محاسبه دبی از این روش‌ها، مقادیر شاخص سرعت در مقطع اصلی و سیلاب‌دشت محاسبه شد و در سرعت‌های سطحی هر جز مقطع عرضی برداشت شده اعمال گردید و دبی در هر جز مقطع عرضی محاسبه شد و در نهایت

جدول ۶- مقادیر خطای نسبی تخمین دبی در مقطع اصلی و کل کانال مرکب

Table 6- The relative error values of the flow estimation in the main channel and the entire compound channel

متوسط قدر مطلق خطای نسبی (درصد) RMAE (%)	توزیع لگاریتمی-سهموی سرعت Logarithmic-Parabolic velocity profile	توزیع توانی سرعت Power law velocity profile	توزیع لگاریتمی سرعت Logarithmic velocity profile
کانال اصلی Main channel	4.9	3	11.6
کانال مرکب Compound channel	6.9	3.9	12.5

هیدرومتری وابسته است. بررسی های این تحقیق نشان داد مقدار شاخص سرعت در شرایط عادی و سیلابی با یکدیگر متفاوت بوده و با اندکی تعدیل مقدار پیش فرض پذیرفته شده سایر محققین (۰/۸۵) می توان میزان دقت در تخمین دبی در شرایط سیلابی را بهبود بخشید. بنابراین در شرایطی که داده اندازه گیری در دسترس نباشد می توان با مقدار بهینه شاخص سرعت ۰/۸۸ و اندازه گیری سرعت سطحی در مرز سیلاب دشت و مقطع اصلی رودخانه ها و اندازه گیری مقطع عبوری جریان، دبی جریان را با دقت مناسب برآورد نمود. همچنین مقادیر پارامترهای خطا نشان می دهند در صورتی که از شاخص های سرعت بهینه تفکیک شده در مقطع اصلی (۰/۹۲) و سیلاب دشت (۰/۸۶) استفاده شود دقت تخمین دبی بیشتر خواهد شد. بنابراین روش سرعت سطحی می تواند در آینده جایگزین مناسبی برای منحنی دبی-اشل باشد. به منظور تعمیم شاخص سرعت به شرایط صحرائی نیاز به اندازه گیری های صحرائی در شرایط مختلف رودخانه ها و مطالعات بیشتر می باشد. با مطالعه این روش بر روی رودخانه ها و استفاده از تئوری آنتروپی می توان این روش را گسترش داد.

مقادیر جدول فوق و نمودارهای مربوطه ارائه شده نشان می دهند توزیع توانی خطای کمتری در برآورد دبی در مقطع اصلی و کل کانال مرکب نشان می دهد. توزیع توانی وابسته به پارامتر m (شاخص توانی) می باشد و در صورتی می توان تخمین درستی از دبی جریان محاسبه نمود که مقدار شاخص توانی به درستی انتخاب گردد.

نتیجه گیری

روش اندازه گیری سرعت های سطحی در شرایط سیلابی رودخانه ها به منظور تخمین دبی جریان کارایی بالایی دارد اما دقت تخمین دبی در این روش به شدت به دقت در تخمین شاخص سرعت وابسته است. مقدار شاخص سرعت (k) به عوامل زیادی از جمله عدد فرود، زبری نسبی بستر، عمق نسبی جریان و شکل هندسی مجرا بستگی دارد. بررسی ها نشان داد که در مقاطع مرکب، پارامترهای عدد فرود و زبری نسبی رابطه عکس با شاخص سرعت و پارامتر عمق نسبی رابطه مستقیم با شاخص سرعت دارند. همچنین مقدار شاخص سرعت در کانال های عریض نسبت به کانال های غیرعریض کمتر می باشد. بنابراین مقدار شاخص سرعت به اطلاعات هندسی و هیدرولیکی محل ایستگاه

مراجع

- Ackers, P. (1992). Hydraulic design of two-stage channels. *J. Water Maritime Eng.* 96, 247-257.
- Bahmanpouri, F., Barbetta, S., Gualtieri, C., Ianniruberto, M., Filizola, N., Termini, D. & Moramarco, T. (2022). Prediction of river discharges at confluences based on Entropy theory and surface-velocity measurements. *Journal of Hydrology*, 606, 127404.
- Bazargan, J. & Rajabi, M. (2020). Estimation of Discharge in Straight Compound Channels Based on the Equivalent Roughness Using the Particle Swarm Optimization Algorithm. *J. of Iran-Water Resources Research*, 15(4), 214-226 (In Persian).
- Biggs, H., Smart, G., Holwerda, N., Doyle, M., McDonald, M. & Ede, M. (2021). River discharge from surface velocity measurements - A field guide for selecting alpha. *Envirolink Advice Report*. Christchurch, New Zealand.
- Cao, L., Weitbrecht, V., Li, D. & Detert, M. (2021). Airborne feature matching velocimetry for surface flow measurements in rivers. *Journal of Hydraulic Research*, 59(4), 637-650.
- Chen, Y.C., Hsu, Y.C. & Zai, E.O. (2022). Streamflow Measurement Using Mean Surface Velocity. *Water*. 14(15), 2370.
- Chen, Y.C., Liao, Y.J. & Chen, W.L. (2018). Discharge estimation in lined irrigation channels by using surface velocity radar. *Paddy Water Environ*, 16, 857-866.

- Cipolla, S., Nones, M. & Maglionico, M. (2018). *Estimation of flow discharge using water surface velocity in reclamation canals: a case study*, Proc. of the 5th IAHR Europe Congress - New Challenges in Hydraulic Research and Engineering, Editor(s) Aronne Armanini and Elena Nucci.
- Costa, J. E., Cheng, R. T., Haeni, F. P., Melcher, N., Spicer, K. R., Hayes, E., Plant, W., Hayes, K., Teague, C. & Barrick, D. (2006). Use of radars to monitor stream discharge by noncontact methods. *Water Resour. Res.*, 42, W07422.
- 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.
- Detert, M., Johnson, E. & Weitbrecht, V. (2017) Proof-of-concept for low-cost and non-contact synoptic airborne river flow measurements. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8-10), 2780-2807.
- Fujita, I. (2017). Discharge measurements of snowmelt flood by space-time image velocimetry during the night using far-infrared camera. *Water*, 9(4), 269.
- Fujita, I. (2018). *Principles of surface velocity gaugings. The 4th IAHR-WMO-IAHS Training Course on Stream Gauging*.
- Fujita, I., Notoya, Y., Tani, K. & Tateguchi, S. (2019) Efficient and accurate estimation of water surface velocity in STIV. *Environmental Fluid Mechanics*, 19(5), 1363-1378.
- Fulton, J. W., Anderson, I. E., Chiu, C. L., Sommer, W., Adams, J. D., Moramarco, T., Bjerklie, D. M., Fulford, J. M., Sloan, J. L., Best, H. R., Conaway, J. S., Kang, M. J., Kohn, M. S., Nicotra, M. J. & Pulli, J. J. (2020a). QCam: SUAS-based Doppler radar for measuring river discharge. *Remote Sensing*, 12(20), 3317.
- Fulton, J. W., Mason, Ch. A., Eggleston, J. R., Nicotra, M. J., Chiu, Ch., Henneberg, M. F., Best, H. R., Cederberg, J. R., Holnbeck, S. R., Lotspeich, R. R., Laveau, Ch. D., Moramarco, T., Jones M. E., Gourley, J. J. & Wasielewski, D. (2020b). Near-Field Remote Sensing of Surface Velocity and River Discharge Using Radars and the Probability Concept at 10 U.S. Geological Survey Streamgages. *Remote Sens*, 12(8), 1296.
- Genç, O., Ardiçlıoğlu, M. & Agrıralıoğlu, N. (2015). Calculation of mean velocity and discharge using water surface velocity in small streams. *Journal of Flow Measurement and Instrumentation*, 41, 115–120.
- Ghorbani, Z., Zahiri, A.R., Khalili Shayan, H., Dehghani, A.A. & Ghorbani, Kh. (2023). Experimental Investigation of Effective Factors on the Velocity Index for Calculating Discharge in Open Channels. *Accepted in Iranian journal of irrigation and drainage*, 5(17) (In Persian).
- Hauet, A., Morlot, Th. & Daubagnan, L. (2018). Velocity profile and depth-averaged to surface velocity in natural streams: A review over a large sample of rivers. *E3S Web of Conferences* 40, 06015, *River Flow*.
- Huang, Y., Chen, H., Liu, B., Huang, K., Wu, Z. & Yan, K. (2023). Radar Technology for River Flow Monitoring: Assessment of the Current Status and Future Challenges. *Water*, 15(10), 1904.
- Jodeau, M., Hauet, A., Paquier, A., Le Coz, J. & Dramais, G. (2008). Application and evaluation of LSPIV technique for the monitoring of river surface velocities in high flow conditions. *Journal of Flow Measurement and Instrumentation*, 19(2), 117–127.
- Kästner, K., Hoitink, A.J.F., Torfs, P.J.J.F., Vermuelen, B., Ningshi, N.S. & Pramulya, M. (2018). Prerequisites for accurate monitoring of river discharge based on fixed-location velocity measurements. *Water resources research*, 54(2), 1058-1076.
- Kim, Y., Muste, M., Hauet, A., Krajewski, W. F., Kruger, A. & Bradley, A. (2008). Stream discharge using mobile large-scale particle image velocimetry: A proof of concept. *Water Resources Research*, 44(9).
- Kordi, E. (2005). Estimation of critical depth in open compound channel. Master's thesis on water structures, Mazandaran University (In Persian).
- Koutalakis, P. & Zaimis, G. N. (2022). River Flow Measurements Utilizing UAV-Based Surface Velocimetry and Bathymetry Coupled with Sonar. *Hydrology*, 9(8), 148.
- Le Coz, J. (2018). *Discharge rating using the velocity index method. 4th IAHR-WMO-IAHS Training Course on Stream Gauging Lyon-Villeurbanne, France. 2–4 September 2018*.

- Le Coz, J., Duby, P., Dramais, G., Camenen, B., Laronne, J., Zamler, D. & Zolezzi, G. (2011). *Use of emerging non-intrusive techniques for flood discharge measurements. 5th International Conference on Flood Management*. Tokyo, Japan.
- 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.
- Legleiter, C.J., Kinzel, P.J. & Nelson, J.M. (2017). Remote measurement of river discharge using thermal particle image velocimetry (PIV) and various sources of bathymetric information. *J. Hydrol.*, 554, 490–506.
- Levesque, V. A. & Oberg, K. A. (2012). Computing Discharge Using the Index Velocity Method; U.S. Geological Survey Techniques and Methods 3–A23, p. 148.
- Liu, B., Wang, Y., Xia, J., Quan, J. & Wang, J. (2021). Optimal water resources operation for rivers-connected lake under uncertainty. *Journal of Hydrology*, 595, 125863.
- Moramarco, T., Barbetta, S., & Tarpanelli, A. (2017). From surface flow velocity measurements to discharge assessment by the entropy theory. *Water*, 9(2), 120.
- Morlock, S. E., Nguyen, H. T. & Ross, J. H. (2002). Feasibility of acoustic Doppler velocity meters for the production of discharge records from U.S. Geological Survey streamflow-gaging stations. *Water-Resources Investigations Report* (No. 2001-4157). US Department of the Interior, US Geological Survey.
- Muste, M., Cheng, Z., Hulme, J. & Vidmar, P. (2015). *Considerations on discharge 783 estimation using index-velocity rating curves. Proceedings of the 35 IAHR World Congress*, June 28– July 3-2015, Delft – The Hague, the Netherlands.
- Nash, J. E. & Sutcliffe, J. V. (1970). River Flow Forecasting Through Conceptual Models: Part I. A Discussion of Principles. *Journal of Hydrology*, 3(10), 282-290.
- Nelson, J. M., Kinzel, P. J., Legleiter, C. J., McDonald, R. R., Overstreet, B. & Conaway, J. S. (2017). *Using remotely sensed data to estimate river characteristics including water-surface velocity and discharge. In 37th IAHR World Congress*, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Novak, G., Rak, G., Prešerena, T. & Bajcar, T. (2017). Non-intrusive measurements of shallow water discharge. *Flow Meas. Instrum.*, 56, 14–17.
- Omori, Y., Fujita, I. & Watanabe, K. (2021). Application of an Entropic Method Coupled with STIV for Discharge Measurement in Actual Rivers. In IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*, (945)1, p. 012036. IOP Publishing.
- Patalano, A., García, C. & Rodríguez, A. (2017). Rectification of Image Velocity Results (RIVER): A simple and user-friendly toolbox for large scale water surface Particle Image Velocimetry (PIV) and Particle Tracking Velocimetry (PTV). *Computers and Geosciences*, 109, 323-330.
- Peña-Haro, S., Carrel, M., Lüthi, B., Hansen, I. & Lukes, R. (2021). Robust image-based streamflow measurements for real-time continuous monitoring. *Frontiers in Water*, 3, 175.
- Perks, M. T. (2020). KLT-IV v1. 0: Image velocimetry software for use with fixed and mobile platforms. *Geoscientific Model Development*, 13(12), 6111-6130.
- Ran, Q. H., Li, W., Liao, Q., Tang, H. L. & Wang, M. Y. (2016). Application of an automated LSPIV system in a mountainous stream for continuous flood flow measurements. *Hydrol. Process*, 30(17), 3014–3029.
- Rantz, S. E. (1982). *Measurement and computation of streamflow* (Vol. 2175). US Department of the Interior, Geological Survey.
- Shiono, K. & Knight, D. W. (1991). Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel. *Journal of fluid mechanics*, 222, 617-646.
- Smart, G. & Biggs, H. (2020). Remote gauging of open channel flow: Estimation of depth averaged velocity from surface velocity and turbulence. *Proceedings of River Flow*, Delft, Netherlands.
- Turnipseed, D. & Sauer, V. (2010). *Discharge measurements at gaging stations* (No. 3-A8). US Geological Survey.

- 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.
- 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). *Journal of Water Resources Research*, (52), 1108–1126.
- Xia, C., Liu, G., Zhou, J., Meng, Y., Chen, K., Gu, P., Yang, M., Huang, X. & Mei, J. (2021). Revealing the impact of water conservancy projects and urbanization on hydrological cycle based on the distribution of hydrogen and oxygen isotopes in water. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 40160–40177.
- Yen, B.C. (1992). Hydraulic resistance in open channels. Channel flow resistance-Centennial of Manning's Formula 1-135.
- Zahiri, A. & Shabani, M. A. (2018). Modeling of stage-discharge relationship in compound channels using multi-stage gene expression programming. *Iranian journal of Eco Hydrology*, 5(1), 37-48. (In Persian).
- Zahiri, A.R. Salehi, M. & Ghorbani, Kh. (2015). Computation of the main channel and flood plains discharges using new methods of optimization. *J. of Water and Soil Conservation*, 22(1), 25-48 (In Persian).
- Zhang, J., Guo, L., Huang, T., Zhang, D., Deng, Z., Liu, L. & Yan, T. (2021). Hydro-environmental response to the inter-basin water resource development in the middle and lower Han River, China. *Hydrology Research*, 53(1), 141-155.



Feasibility of Applying the Concept of Index Velocity in Estimating Discharge in Compound Channels

Zahra Ghorbani, Abdolreza Zahiri*, Hossein Khalili Shayan, Amir Ahmad Dehghani, Khalil Ghorbani

*Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

Received:30 August 2023, Accepted:7 November 2023, Email: Zahiri.areza@gmail.com
[https://doi.org/ 10.22092/IDSER.2023.363374.1553](https://doi.org/10.22092/IDSER.2023.363374.1553)

Extended Abstract

Introduction

Determining the discharge in rivers using the cross-sectional area-velocity method, especially under flood conditions, is associated with serious challenges. Due to advances in measurement techniques, many researchers have strongly suggested the use of non-contact methods. The non-contact method that use surface velocity radar to determine the discharge are becoming more and more popular especially in flood conditions. This method is to use the concept of index velocity based on the generalization of surface velocity to mean velocity and discharge. Also index-velocity method was used for discharge monitoring or recording at streamflow- gaging stations with flow reversals, backwater effects, hysteresis effects and channel-roughness changes that the use of conventional "stage-discharge rating" method impractical or impossible. During floods, natural rivers appear in the form of a compound cross-section in their middle and end sections. Due to momentum exchange between main channel and flood plains, the flow hydraulic in compound channels is complicate. Most studies in index-velocity method are focused on prediction of the discharge in simple channels. Due to the hydraulic difference between the flow of simple and compound cross-sections, the velocity index (ratio of surface velocity to average velocity) for compound channels is still unknown.

Methodology

The purpose of this study is how to apply the index velocity method in flood conditions (compound sections) and actually determine the optimal velocity index in compound sections and the highest percentage of its location in the width of the compound section. Also, by performing dimensional analysis, the influence of relative roughness parameters, Froude number, relative depth and relative width on the velocity index in compound channels was investigated. In order to build a laboratory compound channel, a channel with a rectangular cross-section with a width and height of 60 cm with a metal frame and glass walls was used. The height of the flood plain in all tests is constant and equal to 7 cm and three different widths of the flood plain 40, 45 and 50 cm in the smooth state and also one state of the flood plain with a width of 40 cm with metal mesh in compound form was made. Velocity distribution measurements were made in the compound channel, in the main channel and floodplain at 7 or 8 transverse points. In the present study, the velocity index in compound channels at a fixed bed

slope of 0.1% and for the relative depth of the main section is 4.2-6.12 relative roughness 0.0003-0.0031 and Froude number 0.14-0.79 has been studied.

Results and discussion

By examining the velocity index values across the compound cross-section it was found that the range of average of the velocity index in the width of the compound channels is 0.76-0.98 and with 63% relative frequency is in the range of 0.87-0.93. By fitting between all surface velocity and average velocity data in the entire compound cross-section, it was determined that the optimal value of the velocity index (with $R^2=0.95$) for compound channels is 0.88 with value of absolute relative error of about 0.01-10.06% and an average relative error of 3.3%. The results showed that the increase in the relative roughness and Froude number of the approaching flow and the decrease in the relative depth in the floodplain cause a decrease in the velocity index. The relative error values of discharge estimation showed that in flood conditions (overbank), the velocity index value is different from the normal conditions (inbank) of the river and considering the same velocity index value for both normal and flood conditions will cause more error in the discharge estimation. By examining the location of the optimal value of the velocity index of 0.88 in the entire width of the compound section, it was determined that 71% of the density of points is located on the border of the compound channel and in the last quarter of the flood plain and the first half of the main section. Also, the velocity index is 0.92 in the main channel and 0.86 in flood plain, and if use them, a better estimate of the discharge in the compound channel is obtained. Analytical models of velocity distribution also showed that the velocity power law provides the best estimation of the velocity index than other models if the power index is chosen correctly.

Conclusion

The results showed that the use of the velocity index value of 0.88 for compound channels has an average relative error of about 3.3% in flow estimation. Therefore, by adjusting the default value, it is possible to improve the accuracy of flow estimation in flood conditions. In situations where the possibility of direct measurement in open channels (flood conditions) is not available, it is possible to use the cross section, the surface velocity at the border of flood plain and the main channel and the optimal velocity index of 0.88 can be accurately estimated.

Keywords: Surface Velocity, Velocity Index, Flood Conditions, Flow Discharge, Compound Channels