

مقاله علمی-پژوهشی

## ارزیابی آزمایشگاهی عوامل مؤثر بر شاخص سرعت برای محاسبه دبی جریان در آبراه‌های روباز

زهرا قربانی<sup>۱</sup>، عبدالرضا ظهیری<sup>۲\*</sup>، حسین خلیلی شایان<sup>۳</sup>، امیر احمد دهقانی<sup>۴</sup>، خلیل قربانی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۳۱

### چکیده

به دلیل مشکلات اندازه‌گیری روش‌های مستقیم برآورد دبی جریان، اخیراً روش‌های غیرمستقیم مبتنی بر مفهوم سرعت سطحی توسعه پیدا کرده‌اند. با توجه به محدود بودن مطالعات صورت گرفته و خلأ ارتباط میان عوامل هندسی و هیدرولیکی آبراهه با شاخص سرعت، طی پژوهش حاضر به بررسی آزمایشگاهی تأثیر پارامترهای بی‌بعد شامل زبری بی‌بعد، عمق نسبی، عدد فرود سطحی جریان و شیب آبراهه بر شاخص سرعت پرداخته شد. نتایج نشان داد که افزایش پارامترهای عمق نسبی، ضریب زبری مانینگ بی‌بعد و عدد فرود سطحی جریان سبب کاهش شاخص سرعت می‌شوند، اما تأثیر پارامتر شیب بستر بر شاخص سرعت مشخص نیست. مقدار متوسط شاخص سرعت در کانال‌های مستطیلی ۰/۹۲ به دست آمد. خطای متوسط خطای این شاخص حدود ۴/۹ درصد برآورد گردید که نشان می‌دهد این مقدار شاخص سرعت، دبی جریان را با تخمین مناسبی برآورد می‌کند. همچنین بررسی مدل‌های تحلیلی توزیع قائم سرعت نشان داد که در حالت بستر صاف، مدل قانون توانی با ۴/۵ درصد میانگین خطا و در حالت بستر با زبری توری، قانون لگاریتمی با ۱۰ درصد میانگین خطا بهترین شاخص سرعت را دارا می‌باشند.

**واژه‌های کلیدی:** برآورد دبی جریان، سرعت سطحی، شاخص سرعت، شیب بستر

### مقدمه

باعث شده است که سیل‌ها در بسیاری از مناطق کره زمین فراوان تر و مخرب تر به نظر برسند (Li et al., 2020; Woolway et al., 2020; Akter et al., 2018). در نتیجه، بهبود نظارت بر جریان رودخانه‌ها به صورت لحظه‌ای و در نظر گرفتن دقت اندازه‌گیری دبی، موضوعی کلیدی برای کشورهای مختلف جهان است (Heritage et al., 2019; Convertino et al., 2019; Lee et al., 2018).

در شرایط سیلاب که به ازاء یک تراز سطح آب ثابت، دو دبی متفاوت در شاخه صعودی و نزولی هیدروگراف سیل اتفاق می‌افتد، منحنی دبی - اشل محدودیت داشته و فقط یک مقدار برای دبی جریان برآورد می‌کند (Levesque and Oberg., 2012). همچنین استفاده از این منحنی در شرایطی که ایستگاه هیدرومتری تحت تأثیر پروفیل برگشتی<sup>۴</sup> جریان باشد، با خطای زیادی در برآورد دبی جریان همراه خواهد بود (Rantz, 1982). بنای توسعه رابطه دبی-اشل در رودخانه‌ها، اندازه‌گیری‌های مستقیم توزیع عمقی سرعت در عرض رودخانه است. اندازه‌گیری مستقیم خصوصیات هیدرولیکی جریان در رودخانه‌ها، نیاز به مشارکت نیروی بهره‌بردار (عامل انسانی) دارد که

تعیین دبی جریان به‌عنوان مهم‌ترین ویژگی رودخانه‌ها به‌منظور مدیریت منابع آب، تحقیقات هیدرولوژیکی، ساخت پروژه‌های حفاظت از آب، پیش‌بینی سیل و کاهش ریسک هیدرولیکی اساسی است (Zhang et al., 2021; Xia et al., 2021; Liu et al., 2021) و به‌طور کلی با استفاده از منحنی‌های دبی - اشل استخراج می‌شود (Tauro et al., 2018). با این حال، در سال‌های اخیر، تغییرات مکرر در رابطه بین بارندگی و رواناب همراه با پارامترهای اقلیمی و محیطی

۱- دانشجوی مقطع دکتری سازه‌های آبی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران

۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران

۳- دانش‌آموخته مقطع دکتری سازه‌های آبی، دانشگاه تهران، ایران

۴- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران

\*- ایمیل نویسنده مسئول: (Email: zahiri.arez@gmail.com)

آبزی و اجسام شناور هستند که منجر به خطاهای اندازه گیری قابل توجه می شود (Al Sawaf et al., 2020; Geay et al., 2018).

نه تنها خطرات ایمنی را به همراه دارد، بلکه مشکلاتی نظیر کارایی ضعیف و دشواری های اندازه گیری در طول سیلاب های شدید ایجاد می کند (Huang et al., 2022; Zhao et al., 2021; Khan et al., 2021). روش های تماسی در معرض آسیب دیدگی شن، گونه های



شکل ۱- نمونه هایی از ابزارهای سنجش سرعت سطحی جریان

برای کانال های با انواع مختلف شکل زبری (دون ها و شیارهای ثابت) (Polatel., 2006)،  $0/79$  برای رودخانه کوهستانی آرک<sup>۳</sup> در فرانسه در دبی های مختلف جریان ( $5/5-115 \text{ m}^3/\text{s}$ ) (Jodeau et al., 2008)،  $0/397-1/175$  (مقادیر شاخص بزرگ تر از ۱ در محل قوس آبراهه و نیز در شرایطی که سرعت حداکثر در زیر سطح آزاد آب رخ دهد مشاهده شده است) (Gunawan et al., 2012)،  $0/62-0/77$  برای کانال های آزمایشگاهی (Osorio-Cano et al., 2013)،  $0/552$  در رودخانه های ترکیه (دبی های کم  $0/34-3/93 \text{ m}^3/\text{s}$ ) (Genç et al., 2015)،  $0/71-0/92$  (al., 2016)،  $0/85$  برای نسبت های ابعادی بزرگ در رودخانه ها (Moramarco et al., 2017)،  $0/55$  در آبراهه های با عمق کم و سرعت کم (Cipolla et al., 2018)، برای رودخانه های کوهستانی حدود  $0/8$  و برای کانال های بتنی مصنوعی  $0/9$  (Hauet et al., 2018)،  $0/84-0/9$  (Fulton et al., 2020)،  $0/71$  در رودخانه طبیعی و  $0/67$  در کانال بتنی مصنوعی (Chen et al., 2022) و همچنین مقادیر پارامتر آنتروپی در رودخانه های خیلی بزرگ با تکیه بر پایش سرعت های سطحی  $0/551$  و  $0/413$  (Bahmanpouri et al., 2022) اشاره نمود. برخی مقادیر بالای گزارش شده (مانند مقادیر بیش از  $1/1$ ) به دلیل توزیع های نامنظم سرعت یا اثرات باد رخ می دهد. معمولاً رودخانه های کوچک

استفاده از روش های مبتنی بر اندازه گیری سرعت سطحی جریان به عنوان سرعت مشخصه<sup>۱</sup> دارای مزایای ویژه ای از جمله در برداشتن اثرات پدیده پسماند<sup>۲</sup>، نشان دادن اثرات تغییر سطح مقطع رودخانه، امکان سنجش پیوسته سرعت سطحی و در نتیجه دبی جریان، عدم نیاز به بهره بردار و عامل انسانی از طریق نصب سنجنده سرعت سطحی و تشخیص شکست در منحنی دبی-اشل با ترسیم تغییرات سرعت سطحی در مقابل عمق جریان و تشخیص پراکندگی در این نقاط می باشد (Levesque and Oberg., 2012). تعیین دبی جریان از این روش نیازمند استخراج رابطه بین سرعت سطحی و سرعت متوسط است. این روش تا سال ۲۰۱۱ برای تقریباً ۴۷۰ ایستگاه هیدرومتری در آمریکا استفاده شده است (Levesque and Oberg., 2012). اخیراً مفهوم این روش در ابزارهای سرعت سنجی نظیر سامر، کوآدکوپتر، پهپاد، رادارهای سرعت غیرتماسی و ... توسعه پیدا کرده است (شکل ۱).

دقت در تخمین دبی جریان به میزان قابل توجهی به دقت در تخمین شاخص سرعت ( $k$ ) وابسته است. از جمله مقادیر گزارش شده این شاخص توسط محققین مختلف می توان به مقدار  $0/805$  برای جریان های کم عمق (Weitbrecht et al., 2002)،  $0/659-0/91$

هیدرولیکی آبراهه (عرض آبراهه، شیب بستر، عمق جریان، زبری بستر)، انجام آزمایش‌هایی را به منظور درک ارتباط شاخص سرعت با پارامترهای مذکور ضروری می‌سازد.

### مواد و روش‌ها

هدف از انجام آزمایش‌ها بررسی تأثیر پارامترهای زبری، عمق نسبی، عدد فرود و شیب آبراهه بر شاخص سرعت سطحی می‌باشد. به این منظور از دو کانال با مقطع مستطیلی با عرض‌های ۴۰ و ۶۰ سانتی‌متر استفاده شد. در سراسر طول کانال‌ها ریلی نصب شده است که تجهیزات اندازه‌گیری از قبیل عمق‌سنج و سرعت‌سنج (میکرومولینه) می‌توانند روی آن قرار گیرند و در جهت طول و عرض کانال حرکت کنند. دیواره‌های کانال‌ها، برای مشاهده روند آزمایش‌ها، از جنس شیشه می‌باشند. شکل ۲ نمای کلی این کانال‌ها را نشان می‌دهد.

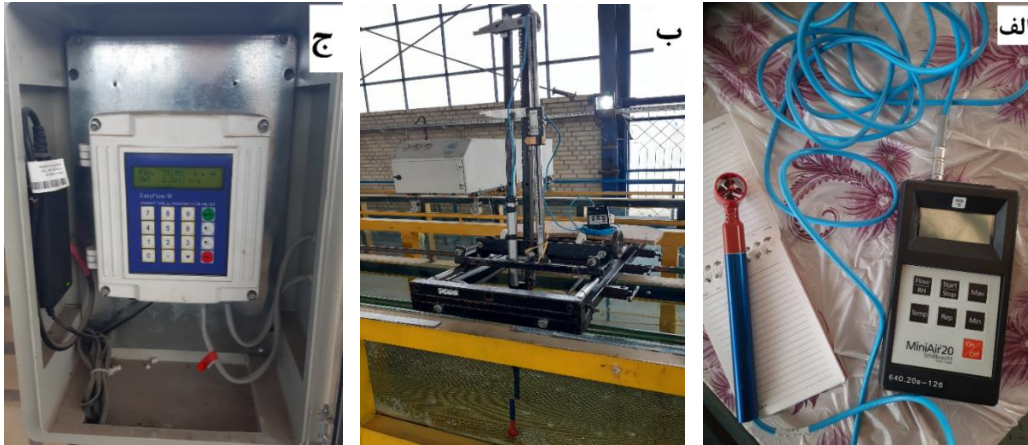
با بستر ناهموار، شاخص سرعت پایین‌تری را نشان می‌دهند، درحالی‌که در کانال‌های مصنوعی با پوشش بتنی مقادیر آن بالاتر است (Fujita., 2018). مقادیر تنوع در شاخص سرعت را می‌توان با انتخاب دقیق مکان‌های اندازه‌گیری کاهش داد، به‌عنوان مثال از مکان‌هایی با پوشش گیاهی غوطه‌ور، اثرات باد، تغییر هندسه (یعنی زمانی که مسیر جریان از نظر طولی یکنواخت نیست که معمولاً به دلیل انقباض کانال رخ می‌دهد، مانند پل، آستانه، یا سرریز) و بادهای قوی اجتناب نمود (Randall, 2021). ضریبی است که تابع شرایط هندسی و هیدرولیکی محل اندازه‌گیری بوده و علاوه بر شکل مقطع عرضی به ناهمگونی توزیع سنگ‌دانه‌ها در عرض رودخانه‌ها، زبری بستر و پوشش گیاهی، غوطه‌وری نسبی عناصر زبری در مقیاس بزرگ و ماهیت دینامیک رودخانه‌ها و اعداد فرود و رینولدز جریان وابسته می‌باشد (Muste et al., 2008; Gunawan et al., 2012). به‌طور کلی مرور منابع نشان می‌دهد که محدوده شاخص سرعت در مطالعات پیشین بسیار وسیع بوده و عدم وجود مطالعه جامع پیرامون ارتباط بین شاخص سرعت با پارامترهای هندسی و



شکل ۲- نمایی از کانال‌های آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق

شد (شکل ۳ الف و ب). سرعت سطحی جریان با میکرومولینه آلمانی اندازه‌گیری شد به طوری که پره دستگاه کاملاً داخل جریان آب قرار گرفت. برای تنظیم دقیق دبی جریان دو دستگاه دیجیتال فرکانس-سنج در هر دو کانال نصب شد. این دستگاه‌ها طوری طراحی شده‌اند که با تغییر فرکانس دستگاه، دبی جریان نیز تغییر می‌یابد و هر فرکانس معرف دبی مشخصی است. دبی جریان در هر دو کانال از روش دبی حجمی مخزن ذخیره محاسبه گردید و با داده‌های دستگاه دبی‌سنج الکترومغناطیس (شکل ۳ ج) مقایسه شد که اختلاف چندانی نداشت. سرعت سطحی و سرعت متوسط جریان به کمک برداشت توزیع عمقی سرعت و از روش دبی حجمی جریان محاسبه شد.

سیستم گردش جریان آب در این کانال‌ها بدین صورت است که در ابتدا جریان از مخزن ذخیره به مخزن ورودی پمپاژ می‌شود. مخزن ورودی در ابتدای هر دو 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 کانال‌ها شده و پس از آن به داخل مخزن ذخیره می‌ریزد. به‌منظور اندازه‌گیری سرعت جریان از دستگاه میکرومولینه آلمانی (MiniAir20) و اندازه‌گیری نقاط عمقی جریان از ترازسنج دیجیتال با دقت ۰/۱ میلی‌متر استفاده شد. با نصب هر دو دستگاه روی آرايه کانال، توزیع‌های طولی و عرضی سرعت برداشت



شکل ۳- تجهیزات اندازه‌گیری شامل: الف- میکرومولینه آلمانی، ب- ترازسنج دیجیتال و ج- دبی‌سنج الکترومغناطیس

پلاستیکی ثابت گردید. محاسبه ضریب زبری مانینگ با برقراری جریان یکنواخت انجام شد (عمق جریان با دقت ۱ میلی‌متر در تمام طول کانال ثابت شد). آزمایش‌های کانال با عرض ۶۰ سانتی‌متر نیز در سه دبی جریان ۷/۶۴، ۱۵/۸۸ و ۲۳/۹۱ لیتر بر ثانیه و سه عمق متفاوت انجام شد. آزمایش‌ها در حالت جریان زیربحرانی و در هر دو شرایط جریان یکنواخت (عمق‌های نرمال شیب‌های ۰/۰۵ و ۰/۱ درصد) و غیریکنواخت (سایر اعماق در شیب‌های ۰/۰۵ و ۰/۱ درصد و تمامی اعماق شیب صفر درصد و آزمایش‌های کانال با عرض ۶۰ سانتی‌متر) انجام شد. در جدول ۱ خلاصه‌ای از شرایط 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 با عرض ۴۰ سانتی‌متر در فاصله ۴/۵ متر و در کانال با عرض ۶۰ سانتی‌متر در فاصله ۶/۵ متری از ابتدای کانال و در سه نقطه عرضی انجام شد. آزمایش‌ها در کانال با عرض ۴۰ سانتی‌متر در سه شیب طولی صفر، ۰/۰۵ و ۰/۱ درصد، سه عمق جریان متفاوت و سه دبی جریان ۶/۶۴، ۱۳/۰۸ و ۱۵/۹۱ لیتر بر ثانیه در دو حالت بستر صاف (فلزی) با ضریب زبری مانینگ ۰/۰۱۱ و بستر با زبری توری با ضریب زبری مانینگ ۰/۰۱۶ انجام گرفت. به‌منظور ایجاد بستر با زبری توری در کانال با عرض ۴۰ سانتی‌متر در کل بستر کانال توری

جدول ۱- فهرستی از آزمایش‌های انجام‌شده

مجارى روباز	عمق آب (m)	شیب بستر (%)	دبی جریان (l/s)	عدد رینولدز $\times 10^4$	عدد فرود جریان	عدد رینولدز برشی
کانال با عرض ۴۰ سانتی‌متر	۰/۰۶۲ - ۰/۱۸۳	۰/۰۰۵، ۰	۱۵/۹۱، ۱۳/۰۸، ۶/۶۴	۳/۶۲ - ۱۱/۶۲	۰/۰۸ - ۰/۶۳	۰/۲۶ - ۱/۱۵
کانال با عرض ۴۰ سانتی‌متر با پوشش توری	۰/۰۴۸ - ۰/۱۸۳	۰/۰۰۵، ۰	۱۵/۹۱، ۱۳/۰۸، ۶/۶۴	۳/۶۷ - ۱۱/۲۸	۰/۰۸ - ۰/۵۴	۷/۷۱ - ۳۹
کانال با عرض ۶۰ سانتی‌متر	۰/۰۶۵ - ۰/۱۷۵	۰/۱	۲۳/۹۱، ۱۵/۸۸، ۷/۶۴	۳/۲۳ - ۱۳/۰۵	۰/۰۶ - ۰/۷۴	۰/۱۸ - ۱/۶۸

دبی جریان با ترسیم نیمرخ عمقی توزیع سرعت رودخانه وجود دارد؛ بنابراین بخش نتایج و بحث به دو قسمت قابل تفکیک می‌باشد: ۱- بخش تحلیلی شاخص سرعت بر اساس توزیع‌های سرعت، ۲- بخش تحلیل ابعادی بر اساس پارامترهای مورد بررسی در آزمایش‌ها.

#### ۱- تئوری شاخص سرعت بر اساس توزیع‌های سرعت

کاربردهای عملی در مهندسی هیدرولیک نشان داده‌اند که توزیع قائم سرعت اندازه‌گیری شده در کانال‌های باز را می‌توان به‌خوبی با قانون توانی سرعت (رابطه ۲) نشان داد (Nelson et al., 2017):

با توجه به محدوده اعداد فرود و رینولدز جریان در جدول فوق، تمامی آزمایش‌های پژوهش حاضر در حالت جریان زیربحرانی و رژیم آشفته قرار دارند. همچنین محدوده اعداد رینولدز برشی آزمایش‌ها نشان می‌دهد آزمایش‌های این پژوهش در بستر بدون زبری از نوع بستر صاف و در حالت ایجاد زبری توری از نوع بستر انتقالی می‌باشد.

#### نتایج و بحث

علاوه بر روش داده‌برداری و تعیین نسبت سرعت متوسط به سرعت سطحی، رویکردهای تحلیلی نیز به‌منظور بررسی و تخمین

سرعت جریان رودخانه در هر نقطه از جریان با فاصله  $y$  از کف آبراهه، ضریب تجربی و  $m$  شاخص قانون توانی توزیع سرعت می‌باشند. جدول ۲ بدین منظور قابل استفاده است (Biggs et al., 2021).

$$k = \frac{V_m}{V_s} \quad (۱)$$

$$V = Ay^m \quad (۲)$$

که  $V_s$  سرعت سطحی جریان،  $V_m$  سرعت متوسط عمقی،  $V$

جدول ۲- مقادیر مختلف شاخص قانون توانی توزیع سرعت (Biggs et al., 2021)

شرایط نرمال	بستر صاف	بستر زبر	بستر خیلی زبر
۰/۱۴۳-۰/۱۶۷	۰/۱	۰/۲۵	۰/۳۳۳-۰/۵

$$V = \frac{V_*}{\kappa} \ln\left(\frac{y}{z_0}\right) \quad (۹)$$

برای

$$y/H < 0.2$$

$$V = \beta \frac{V_*}{\kappa} \left[ \frac{y}{H} - \frac{1}{2} \left(\frac{y}{H}\right)^2 + \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{0.2H}{z_0}\right) - 0.18 \right] \quad (۱۰)$$

برای

$$y/H > 0.2$$

در رابطه فوق  $z_0$  ارتفاع زبری مطلق می‌باشد. با یکپارچه‌سازی معادلات فوق در سراسر عمق جریان و با فرض ضریب ثابت تجربی  $\beta$  برابر با ۶/۲۵، سرعت متوسط عمقی به صورت زیر خواهد بود:

$$V_m = \frac{V_*}{\kappa} \left[ \ln\left(\frac{0.2H}{z_0}\right) + 0.85 + \frac{z_0}{H} \right] \quad (۱۱)$$

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

$$k = \frac{\ln\left(\frac{0.2H}{z_0}\right) + 0.85 + \frac{z_0}{H}}{\ln\left(\frac{0.2H}{z_0}\right) + 2} \quad (۱۲)$$

بنابراین طبق تحلیل ارائه شده فوق علاوه بر رابطه ۱، روابط ۴، ۶، ۷، ۸ و ۱۲ نیز برای محاسبه شاخص سرعت قابل استفاده می‌باشند.

## ۲- تحلیل ابعادی

با انجام تحلیل ابعادی و گروه‌بندی متغیرهای مهم به صورت پارامترهای بی‌بعد، تعداد متغیرهای آزمایشگاهی کاهش یافته و نتایج برای حالت‌های مشابه معتبر خواهد بود. پارامترهای مؤثر بر ارتباط بین سرعت سطحی و سرعت متوسط جریان (شاخص سرعت  $k$ ) را می‌توان با رابطه (۱۳) نشان داد:

$$f(B, H, S_0, V_*, n, g, \mu, \rho) = 0 \quad (۱۳)$$

که در این رابطه  $B$  عرض کانال،  $H$  عمق جریان،  $S_0$  شیب کف بستر،  $V_*$  سرعت برشی،  $n$  ضریب زبری مانینگ،  $g$  شتاب ثقل،  $\mu$  لزجت دینامیکی سیال،  $\rho$  چگالی سیال می‌باشند. با انتخاب پارامترهای تکراری  $H$ ،  $V_s$  و  $\rho$ ، پس از انجام تحلیل ابعادی به روش  $\pi$  باکینگهام و ساده‌سازی‌ها خواهیم داشت:

$$k = \frac{V_m}{V_s} = f\left(\frac{B}{H}, S_0, \frac{nV_*}{\frac{1}{R^{1/6}}}, Fr_s, Re\right) \quad (۱۴)$$

با انتگرال‌گیری از رابطه ۲، سرعت میانگین عمقی به صورت رابطه زیر خواهد بود:

$$V_m = \int_0^H V(y) dy = \left(\frac{A}{m+1}\right) H^m \quad (۳)$$

که  $H$  عمق کل جریان است. نهایتاً طبق رابطه نلسون و همکاران (۲۰۱۷) شاخص سرعت برابر خواهد بود با:

$$k = \frac{1}{m+1} \quad (۴)$$

بنابراین با در نظر گرفتن تابع توزیع توانی سرعت، شاخص سرعت فقط تابع شاخص توانی ( $m$ ) 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 ... می‌باشد، شاخص سرعت متفاوت خواهد بود. رابطه توزیع لگاریتمی سرعت به صورت زیر می‌باشد:

$$V = V_s + \frac{V_*}{\kappa} \ln\left(\frac{y}{H}\right) \quad (۵)$$

که  $\kappa = ۰/۴$  ثابت وان-کارمن و  $V_*$  سرعت برشی جریان می‌باشد. در این شرایط شاخص سرعت از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$k = 1 - \frac{\sqrt{gRS_f}}{V_s \kappa} = 1 - \left(\frac{7.64\sqrt{RS_f}}{V_s}\right) \quad (۶)$$

که  $S_f$  شیب خط انرژی و  $g$  شتاب ثقل می‌باشند. با جایگذاری معادلات مقاومت جریان شزی و مانینگ در رابطه فوق، به ترتیب معادلات (۷) و (۸) حاصل خواهند شد:

$$k = \frac{1}{1 + \left(\frac{7.64}{C}\right)} \quad (۷)$$

$$k = \frac{1}{1 + \left(\frac{7.64n}{R^{1/6}}\right)} \quad (۸)$$

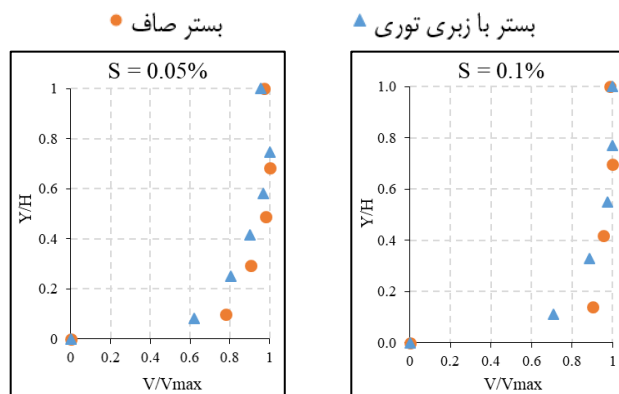
بر اساس روابط فوق پارامتر  $k$  تقریباً با ضریب زبری شزی ارتباط مستقیم و با ضریب زبری مانینگ ارتباط عکس دارد.

معادلات توزیع سرعت لگاریتمی و سهموی دارای دو قسمت است که یکی از آن‌ها لگاریتمی و یکی سهموی است:

جریان بستگی دارد. طبق رابطه فوق و متغیرهای بیان شده، ارتباط بین شاخص سرعت با پارامترهای فوق شناسایی شده و نمودارهای بی بعد ارائه شد.

قبل از انجام آزمایش‌ها با انتخاب سه مقطع در هر دو کانال توزیع‌های سرعت برداشت شد و با بررسی توزیع‌ها و در نظر گرفتن اثر دریچه انتهایی و توسعه یافتگی جریان، بهترین مقطع انتخاب شد. شکل ۴ نمونه‌ای از توزیع بی بعد سرعت‌ها را در بستر صاف (با ضریب زبری مانینگ ۰/۱۱) و بستر با زبری توری (با ضریب زبری مانینگ ۰/۱۶) در دبی جریان ۱۳/۰۸ لیتر بر ثانیه در دو شیب نشان می‌دهد.

در رابطه فوق  $Fr_s$  عدد فرود سطحی جریان می‌باشد که با توجه به انتخاب پارامتر تکراری سرعت سطحی جریان و بی بعد نمودن پارامتر شتاب ثقل ( $g$ ) بدین صورت ظاهر شده است. پارامتر بی بعد شده ضریب زبری مانینگ نیز با توجه به همبستگی بالا با شاخص سرعت  $k$  (به دلیل تأثیر همزمان سرعت برشی و ضریب زبری مانینگ) انتخاب گردید. از آنجایی که آزمایش‌های این تحقیق در شرایط جریان آزاد صورت گرفت و با توجه به جدول ۱ که عدد رینولدز همواره در محدوده جریان متلاطم قرار دارد از بررسی آن صرف نظر شد؛ بنابراین شاخص سرعت به شیب کف کانال، نسبت عرض کانال به عمق جریان، زبری کف کانال و عدد فرود سطحی



شکل ۴- نمونه‌ای از توزیع‌های سرعت اندازه‌گیری شده در دبی ۱۳/۰۸ لیتر بر ثانیه در حالت بستر با زبری توری و حالت صاف

توری کمتر از بستر صاف می‌باشد و این مدل‌ها به پارامتر زبری حساس می‌باشند. نتایج این شکل نشان می‌دهد روابط تحلیلی ارائه شده به منظور محاسبه شاخص سرعت با استفاده از این دو توزیع در راستای نتایج آزمایشگاهی بوده و خطای ناچیزی در تخمین دبی در حالت بستر صاف دارند، اما در حالت زبر، این مدل‌ها نسبت به زبری حساس تر عمل می‌کنند. میانگین قدر مطلق خطای محاسباتی شاخص سرعت در سه مدل توانی، لگاریتمی و لگاریتمی- سهموی نسبت به شاخص سرعت به دست آمده از آزمایش‌ها به ترتیب در حالت بستر صاف ۴/۵، ۱۰ و ۱۴/۸ درصد محاسبه گردید. مدل توزیع توانی در بستر صاف و مدل توزیع لگاریتمی در بستر با زبری توری میانگین خطای کمتری در برآورد شاخص سرعت دارند.

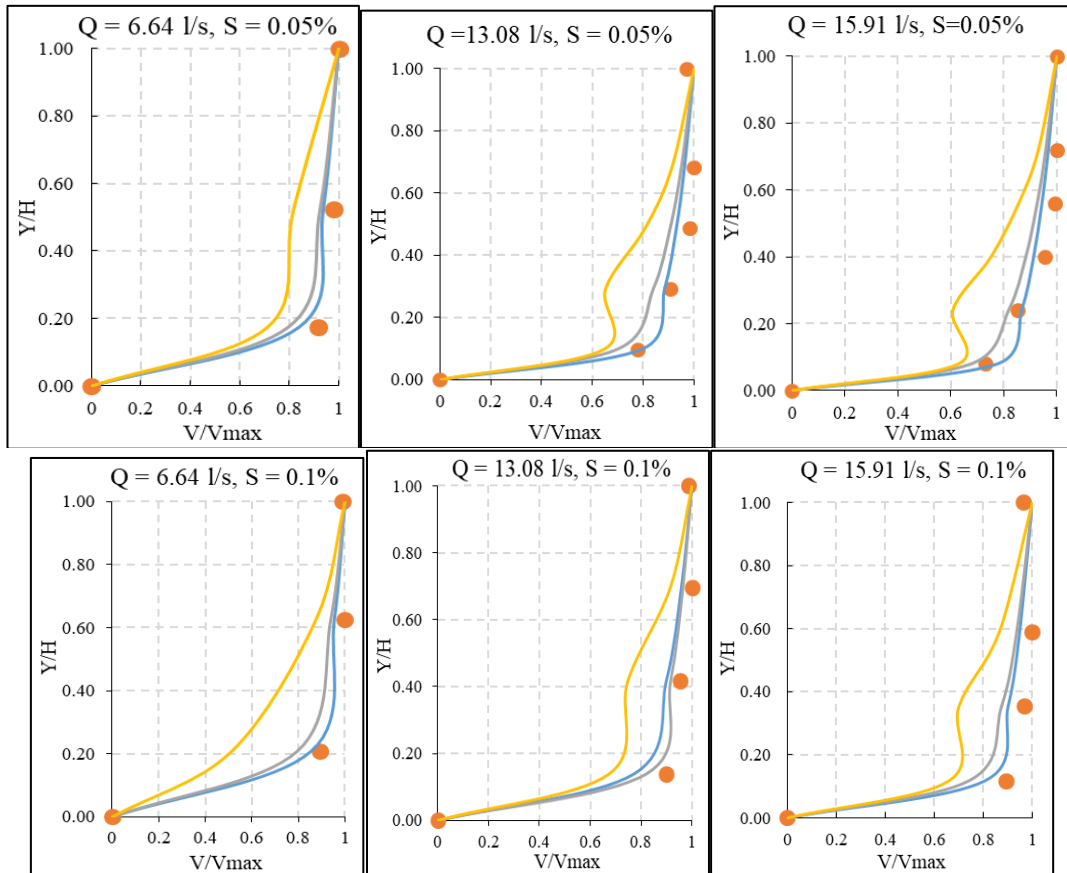
به طور کلی استفاده از شاخص سرعت در مدل‌های توزیع توانی، توزیع لگاریتمی و توزیع لگاریتمی- سهموی با توجه به داده‌های آزمایشگاهی این پژوهش سبب تخمین دبی جریان با میانگین قدر مطلق خطای کمتر از ۱۰ درصد در مقایسه با واقعیت می‌باشد. همچنین با استفاده از شاخص سرعت ۰/۹۲ (میانگین شاخص سرعت داده‌های آزمایشگاهی)، میانگین قدر مطلق خطا حدود ۴/۹ درصد به دست خواهد آمد.

### ۱- نتایج بخش تحلیلی شاخص سرعت

توزیع‌های توزیع قائم سرعت با استفاده از سه قانون توانی، لگاریتمی و لگاریتمی- سهموی ترسیم گردید و شاخص سرعت با استفاده از هر سه قانون و نیز با معادله رگرسیونی سرعت سطحی- سرعت متوسط آزمایشگاهی محاسبه شد. با توجه به شکل ۵ نمودارهای توزیع توانی و لگاریتمی سرعت نسبت به توزیع لگاریتمی- سهموی، مقادیر بهتر و نزدیک تری به توزیع‌های سرعت اندازه‌گیری شده دارند. توزیع توانی در بیشتر حالات، مقادیر نزدیک تری به توزیع‌های اندازه‌گیری شده دارد. همچنین سرعت سطحی در این دو توزیع بسیار نزدیک به سرعت سطحی آزمایشگاهی می‌باشد. بررسی مقادیر سرعت متوسط نشان داد که در نتایج آزمایشگاهی، مقدار سرعت متوسط بیشتر از مقادیر تخمینی این مدل‌ها می‌باشد؛ بنابراین شاخص سرعت محاسبه شده از این سه مدل با شاخص سرعت محاسباتی در آزمایشگاه اختلاف خواهد داشت.

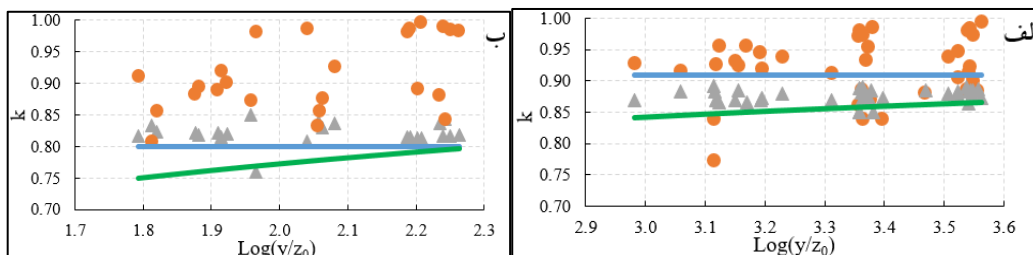
شکل ۶ روند تغییر شاخص سرعت در اعماق مختلف آزمایش شده را در سه مدل توزیع سرعت و شرایط آزمایشی در کل آزمایش‌ها نشان می‌دهد. با توجه به شکل، مقادیر شاخص سرعت در شرایط آزمایشگاهی بیشتر از مدل‌های توزیع سرعت می‌باشند. با توجه به شکل ۶ الف و ب در تمامی مدل‌ها، شاخص سرعت در بستر با زبری

● Experimental Data    — Power Law    — Logarithmic    — Logarithmic Parabolic



شکل ۵- توزیع قائم سرعت مشاهداتی و توزیع‌های مختلف سرعت در دبی‌ها و شیب‌های مختلف در اعماق مختلف

● k Experimental Data    ▲ k Logarithmic    — k Power Law    — k Logarithmic Parabolic



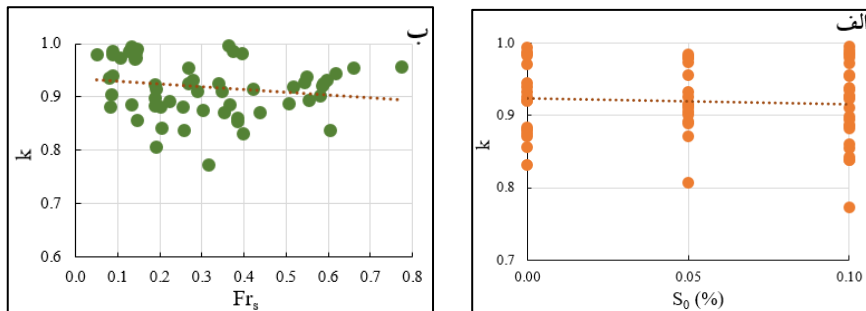
شکل ۶- مقادیر شاخص سرعت الف- حالت بستر صاف در دو کانال ب- حالت بستر با زبری توری

متوسط و سرعت سطحی اثر می‌گذارد بنابراین بر شاخص سرعت که نسبت این دو سرعت می‌باشد تأثیری ندارد. با توجه به شکل ۷ ب با ترسیم اعداد فرود سطحی جریان در برابر شاخص سرعت مشخص شد که به‌طور کلی با افزایش اعداد فرود سطحی، شاخص سرعت شیب کاهش می‌دهد.

## ۲- نتایج بخش تحلیل ابعادی شاخص سرعت

بررسی اثر شیب کف کانال و عدد فرود سطحی جریان بر تغییرات شاخص سرعت

شکل ۷ الف تغییرات شاخص سرعت را در شیب‌های مختلف در تمامی آزمایش‌های دو کانال در سه دبی و سه عمق جریان نشان می‌دهد. با توجه به این که شیب طولی بستر بر روی هر دو سرعت

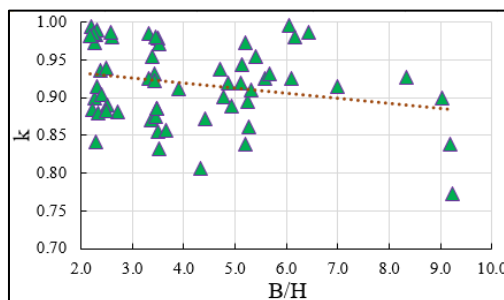


شکل ۷- الف- تغییرات شاخص سرعت در شیب‌های مختلف بستر کانال ب- تغییرات شاخص سرعت نسبت به عدد فرود سطحی جریان

سرعت متوسط و سرعت سطحی به دلیل تنش برشی زیاد و خطی شدن توزیع سرعت در جریان‌های کم عمق افزایش می‌یابد که این نتیجه مشابه USBR است (USBR., 1997). به‌طور کلی تأثیر پارامتر  $B/H$  در هر دو حالت ناشی از تغییر عرض کانال در اعماق ثابت و همچنین تغییر عمق جریان در عرض ثابت بر شاخص سرعت در هر دو حالت مشابه می‌باشد. در  $B/H$  های بیشتر از ۵ (کانال‌های عریض)، کاهش شاخص سرعت واضح‌تر مشاهده می‌شود.

#### بررسی تأثیر پارامتر عمق نسبی بر شاخص سرعت

شکل ۸ روند تغییرات شاخص سرعت را در دو کانال با عرض ۴۰ و ۶۰ سانتی‌متر نسبت به پارامتر  $B/H$  نشان می‌دهد. آزمایش‌ها در سه عمق و سه دبی مختلف در هر دو کانال انجام شد. با توجه به شکل ۱۰، با افزایش  $B/H$  شاخص سرعت کاهش می‌یابد که این نتیجه مشابه نتیجه هایوت و همکاران می‌باشد (Hauet et al., 2018). این موضوع نشان‌دهنده آن است که با کاهش عمق جریان، اختلاف بین



شکل ۸- تغییرات شاخص سرعت در تمامی آزمایش‌ها نسبت به پارامتر عمق نسبی

حاکی از آن است که در کانال با عرض ۴۰ سانتی‌متر در اعماق ثابت ( $R$  ثابت)، شاخص سرعت در حالت صاف نسبت به حالت بستر با پوشش توری مقادیر بیشتری دارد. با ایجاد زبری بستر، نیمرخ عمقی جریان گردان بیشتری داشته و تفاوت سرعت متوسط با سرعت سطحی افزایش می‌یابد که این موضوع سبب کاهش مقدار شاخص سرعت می‌گردد. هایوت و همکاران نیز مقدار شاخص سرعت را برای رودخانه‌های کوهستانی حدود ۰/۸ و برای کانال‌های بتنی مصنوعی ۰/۹ پیشنهاد دادند که نشان می‌دهد بستر صاف‌تر مقدار شاخص سرعت بزرگ‌تری را نسبت به بستر زبرتر دارد (Hauet et al., 2018). در کانال‌های عریض به دلیل عمق کم جریان نسبت به عرض کانال، تأثیر زبری بستر واضح‌تر خواهد شد؛ بنابراین همان‌طور که در شکل ۹-ب- نیز واضح می‌باشد در  $B/H$  های بالا ( $B/H < 5$ )، مقادیر شاخص سرعت در حالت صاف اختلاف شدیدتری نسبت به

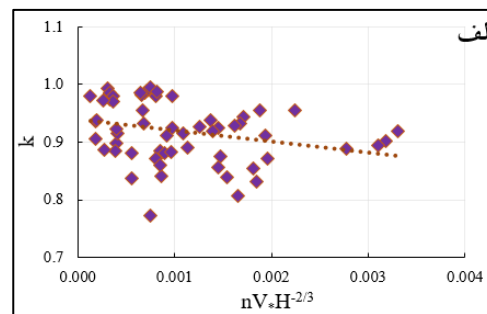
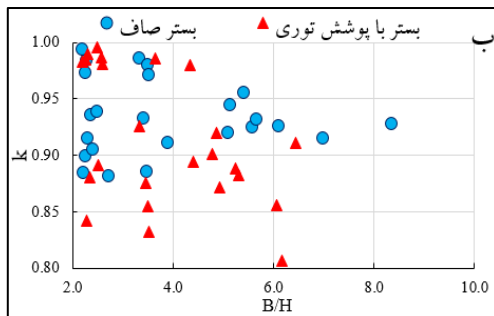
#### بررسی اثر زبری نسبی بستر کانال بر تغییرات شاخص سرعت

با برقراری جریان یکنواخت در کانال با عرض ۴۰ سانتی‌متر در هر دو حالت بستر صاف و بستر با پوشش توری، میانگین ضرایب زبری مانینگ به ترتیب حدود ۰/۰۱۱ و ۰/۰۱۶ به دست آمد. به‌منظور بررسی اثر زبری، پارامتر زبری نسبی و پارامتر بی‌بعد ضریب زبری مانینگ حاصل از آنالیز ابعادی بررسی شد. پارامتر بی‌بعد ضریب زبری مانینگ، به دلیل اثر ترکیبی سرعت برشی، عمق و ضریب زبری مانینگ اثر زبری را بسیار بهتر از زبری نسبی نشان می‌دهد و به دلیل همبستگی بالایی که با شاخص سرعت داشت، جهت بررسی اثر زبری انتخاب گردید. همان‌طور که در شکل ۹-الف- مشاهده می‌شود، با افزایش پارامتر ضریب زبری مانینگ بی‌بعد، شاخص سرعت کاهش می‌یابد. شکل ۹-ب- روند تغییرات شاخص سرعت نسبت به پارامترهای  $B/H$  را در دو حالت بستر صاف و زبر نشان می‌دهد. نتایج



می‌یابد.

حالت بستر با پوشش توری دارد. رحیم‌پور و رحیمی (۱۳۹۳) نیز به این نتیجه رسیدند که با زبرتر کردن دیواره کانال، مقدار شاخص کاهش



شکل ۹- الف- تغییرات شاخص سرعت نسبت به پارامتر زبری بی‌بعد ب- تغییرات پارامتر  $B/H$  در دو حالت بستر صاف و پوشش توری

بر اساس داده‌های به‌دست آمده از تحلیل ابعادی و پارامترهای بیان‌شده، ضرایب همبستگی بین پارامترها با نرم‌افزار SPSS بررسی گردید و مشاهده شد که دو پارامتر ضریب زبری بی‌بعد و عمق نسبی بیشترین همبستگی را با شاخص سرعت نشان می‌دهند؛ بنابراین رابطه‌ای به‌منظور برآورد این شاخص بر اساس این دو پارامتر در کانال‌های آزمایشگاهی در بستر صاف ارائه گردید. برقراری ارتباط بین تمام پارامترها به‌دلیل پراکندگی شاخص سرعت امکان‌پذیر نبود. میانگین قدر مطلق خطای نسبی محاسبه شاخص سرعت از رابطه ۱۷ نسبت به مقادیر شاخص سرعت به‌دست آمده از داده‌های کانال‌های آزمایشگاهی ۵/۴ درصد برآورد گردید؛ یعنی شاخص سرعت از رابطه ۱۶ با توجه به پارامتر زبری بی‌بعد و عمق نسبی محاسبه گردید و مقدار میانگین خطای آن نسبت به داده‌های واقعی آزمایشگاه از رابطه ۱۷ محاسبه شد. رابطه (۱۶) با  $R^2 = 0.721$  قابل قبول می‌باشد:

$$k = -439.293 \left( \frac{nV^*}{H^2} \right) - 0.019 \left( \frac{B}{H} \right)^2 \quad (16)$$

$$+ 61.083 \left( \frac{nV^*}{H^2} \right) \left( \frac{B}{H} \right) + 0.188 \left( \frac{B}{H} \right) + 0.502$$

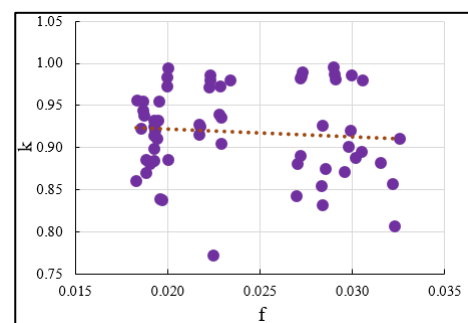
$$RMAE = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{|k_{exp} - k_{cal}|}{k_{exp}}}{N} \quad (17)$$

در رابطه ۱۷ تعداد کل داده‌ها،  $k_{cal}$  و  $k_{exp}$  به ترتیب مقدار شاخص سرعت مشاهداتی در آزمایشگاه و مقدار شاخص سرعت محاسبه‌شده از رابطه ۱۶ می‌باشد. دامنه تغییرات پارامترهای بی‌بعد آزمایش‌های انجام شده این پژوهش از جمله شیب بستر کانال ۰-۰/۱ درصد، عدد فرود سطحی جریان ۰/۰۵-۰/۷۸، عمق نسبی جریان ۰/۰۰۱-۰/۰۳۳ و ضریب زبری مانینگ بی‌بعد ۲/۱۸-۹/۲۲ باشد.

اعداد رینولدز برشی آزمایش‌ها در جدول ۱ نشان می‌دهد که شرایط جریان به‌صورت آشفته با بستر صاف و انتقالی است و با توجه به محدودیت فرمول مانینگ که فقط در شرایط جریان آشفته کاملاً زبر<sup>۱</sup> قابل استفاده است (Chanson., 2004). بهتر است از ضریب اصطکاک داری-ویسباخ استفاده شود:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{K_s}{14.84R} + \frac{2.51}{\text{Re}\sqrt{f}} \right) \quad (15)$$

در رابطه فوق  $f$  ضریب داری-ویسباخ،  $K_s$  ارتفاع زبری،  $R$  شعاع هیدرولیکی و  $Re$  عدد رینولدز جریان می‌باشد. ضریب داری-ویسباخ محدودیت ضریب زبری مانینگ را ندارد و در تمامی شرایط جریان-های آشفته قابل استفاده است. شکل ۱۰ رابطه بین ضریب داری-ویسباخ با شاخص سرعت را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که ارتباط این ضریب با شاخص سرعت به‌صورت عکس می‌باشد و با افزایش این ضریب، شاخص سرعت با شیب ملایمی کاهش می‌یابد. ضریب همبستگی این پارامتر با شاخص سرعت مشابه ضریب همبستگی زبری نسبی بوده و همسو با نتایج پارامتر ضریب زبری مانینگ بی‌بعد می‌باشد.



شکل ۱۰- تغییرات شاخص سرعت در تمامی آزمایش‌ها نسبت به پارامتر بی‌بعد ضریب اصطکاک داری-ویسباخ

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^N Q_{exp} - \sum_{i=1}^N Q_{cal}}{\sum_{i=1}^N Q_{exp}} \quad (20)$$

$$ME = \text{Max} |Q_{exp} - Q_{cal}|_i \quad (21)$$

که در روابط فوق پارامترهای  $Q_{exp}$  و  $Q_{cal}$  به ترتیب دبی واقعی و دبی محاسباتی و  $N$  تعداد آزمایش‌ها می‌باشند. مقادیر پارامترهای خطای دبی محاسبه شده برای هر یک از شاخص‌های سرعت در جدول ۳ به‌طور خلاصه بیان شده است. مقادیر RMAE از رابطه ۱۷ محاسبه گردید (مقادیر دبی‌های واقعی و محاسباتی جایگزین مقادیر شاخص سرعت در رابطه ۱۷ شدند).

### بررسی مقدار متوسط شاخص سرعت پژوهش حاضر با شاخص سرعت سایر محققین

در انتهای این پژوهش با توجه به مرور منابعی که صورت پذیرفت مقادیر دبی با مقادیر شاخص سرعت ارائه شده سایر محققین تخمین زده شد و با مقدار متوسط شاخص سرعت این پژوهش مقایسه شد. پارامترهای خطا از روابط زیر محاسبه گردید:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_{exp} - Q_{cal})^2} \quad (18)$$

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{exp} - Q_{cal})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{exp} - \bar{Q}_{exp})^2} \quad (19)$$

جدول ۳- مقادیر خطای تخمین دبی با استفاده از مقادیر شاخص سرعت سایر محققین

$E_{NS}$	RMAE	CRM	ME(m <sup>3</sup> /s)	RMSE(m <sup>3</sup> /s)	k	مطالعات محققین
۰/۹۷۷	۰/۰۵۱	۰/۰۱۳	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۹	(Hauet et al., 2018, Fulton et al., 2020)
۰/۹۴۸	۰/۰۸۱	۰/۰۶۸	۰/۰۰۳	۰/۰۰۱	۰/۸۵	(Moramarco et al., 2017, Yang et al., 2019, Fulton et al., 2020)
۰/۸۷	۰/۱۲۹	۰/۱۲۳	۰/۰۰۴	۰/۰۰۲	۰/۸	(Weitbrecht et al., 2002, Jodeau et al., 2008, Hauet et al., 2018)
۰/۸	۰/۱۶۱	۰/۱۵۶	۰/۰۰۵	۰/۰۰۲	۰/۷۷	(Osorio-Cano et al., 2013)
۰/۵۶۹	۰/۲۳۷	۰/۲۳۲	۰/۰۰۶	۰/۰۰۳	۰/۷	(Welber et al., 2016, Chen et al., 2022)
۰/۴۴۱	۰/۲۷	۰/۲۶۵	۰/۰۰۷	۰/۰۰۳	۰/۶۷	(Polatel., 2006, Chen et al., 2022)
۰/۱۸۸	۰/۳۲۴	۰/۳۲	۰/۰۰۸	۰/۰۰۴	۰/۶۲	(Osorio-Cano et al., 2013)
-۰/۲۴۷	۰/۴۰۱	۰/۳۹۷	۰/۰۱	۰/۰۰۵	۰/۵۵	(Genç et al., 2015, Bahmanpouri et al., 2022)
-۱/۵	۰/۵۶۴	۰/۵۶۱	۰/۰۱۴	۰/۰۰۷	۰/۴	(Gunawan et al., 2012, Bahmanpouri et al., 2022)

متغیر می‌باشد. پارامترهای عمق نسبی، عدد فرود سطحی و زبری بی‌بعد رابطه عکس با شاخص سرعت دارند. مقدار ۰/۸۵ طبق یافته‌های محققین برای رودخانه‌های با نسبت ابعادی بزرگ و عمیق پذیرفته شده است همچنین این مقدار پیش‌فرض به‌شدت، به یکنواختی جریان و شدت زبری وابسته می‌باشد. شاخص سرعت به‌دست‌آمده از آزمایش‌های این پژوهش حول مقدار ۰/۹۲ در نوسان می‌باشد. حدود بالا و پایین شاخص سرعت یافته‌های صحرایی محققین پیشین کمتر از مقادیر این پژوهش می‌باشد علت آن می‌تواند شکل مقطع نامنظم رودخانه‌ها، نسبت‌های ابعادی متفاوت، توزیع غیریکنواخت دانه‌بندی بستر و استغراق نسبی عناصر زبری، وجود پوشش‌های گیاهی در بستر و بدنه رودخانه، فرم بستر، وجود جریان‌های ثانویه در محل خم و هر عاملی که سبب تغییرات توزیع قائم سرعت شود که در شرایط آزمایشگاه دیده نمی‌شود، باشد. مقدار شاخص سرعت در شرایطی که اثر باد شدید می‌باشد یا در شرایط وجود جریان‌های ثانویه، بزرگ‌تر از ۱ گزارش شده است بنابراین به‌منظور تعمیم شاخص سرعت به شرایط صحرایی به مطالعات بیشتر و اندازه‌گیری‌های صحرایی نیاز می‌باشد. روش سرعت سطحی می‌تواند

با توجه به جدول فوق و مقادیر پارامترهای خطای محاسبه شده، مقدار شاخص سرعت ۰/۹ با کمترین مقادیر RMSE، ME، CRM و RMAE و بیشترین نسبت به سایر شاخص‌ها، بهترین برآورد را در تخمین دبی واقعی دارد. این مقدار شاخص سرعت به مقدار متوسط شاخص سرعت این پژوهش ۰/۹۲ نزدیک‌تر می‌باشد. همان‌طور که در جدول فوق مشاهده می‌شود با شاخص ۰/۹ کمترین خطا و با شاخص ۰/۴ بیشترین خطا در برآورد دبی رخ می‌دهد.

### نتیجه‌گیری

سرعت سطحی پارامتری است که اثرات پدیده پسماند و اثرات تغییر هندسه مقطع عرضی رودخانه در طی زمان و ناشی از شرایط هیدرولیکی و رسوبی را در برمی‌گیرد. مقدار شاخص سرعت به عوامل زیادی از جمله عدد فرود، زبری بستر، عمق جریان و عرض مجاری و... بستگی دارد. اثر شیب طولی بر روی شاخص سرعت چندان واضح نبود. به‌طور کلی بررسی‌ها در این تحقیق نشان داد مقدار شاخص سرعت در کانال‌های آزمایشگاهی در شرایط جریان‌های یکنواخت و غیریکنواخت در بستر صاف و پوشش توری در محدوده ۰/۷۷-۱

Information-theoretic portfolio decision model for optimal flood management. *Environmental Modelling and Software*. 119:258-274.

Fujita, I. 2018. Principles of surface velocity gaugings. The 4th IAHR-WMO-IAHS Training Course on Stream Gauging, 2.

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. and Wasielewski, D. 2020. Near-Field Remote Sensing of Surface Velocity and River Discharge Using Radars and the Probability Concept at 10 U.S. Geological Survey Streamgages. *Remote Sensing*. 12(8), 1296.

Geay, T., Zanker, S., Hauet, A., Missot, C. and Recking, A. 2018. An estimate of bedload discharge in rivers with passive acoustic measurements: Towards a generalized calibration curve? In Proceedings of the 9th International Conference on Fluvial Hydraulics (River Flow), Lyon, France, 5–8 September.

Genç, O., Ardiçlıoğlu, M. and Ağralıoğlu, N. 2015. Calculation of mean velocity and discharge using water surface velocity in small streams. *Journal of Flow Measurement and Instrumentation*. 41:115–120.

Gunawan, B., Sun, X., Sterling, M., Shiono, K., Tsubaki, R., Rameshwaran, P., Knight, D. K., Chandler, J. H., Tang, X., and Fujita, I. 2012. The application of LS-PIV to a small irregular river for inbank and overbank flows. *Journal of Flow Measurement and Instrumentation*. 24:1-12.

Hauet, A., Morlot, Th. and Daubagnan, L. 2018. Velocity profile and depth-averaged to surface velocity in natural streams: A review over a large sample of rivers. In E3s web of conferences (Vol. 40, p. 06015). EDP Sciences.

Heritage, G., Entwistle, N., Milan, D., and Tooth, S. 2019. Quantifying and contextualising cyclone-driven, extreme flood magnitudes in bedrock-influenced dryland rivers. *Advances in Water Resources*. 123:145-159.

Huang, K. L., Chen, H., Xiang, T. Y., Lin, Y. F., Liu, B. Y., Wang, J., Liu, D. D. and Xu, C. Y. 2022. A photogrammetry-based variational optimization method for river surface velocity measurement. *Journal of Hydrology*. 605, 127240.

Jodeau, M., Hauet, A., Paquier, A., Le Coz, J. and 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.

Khan, M. R., Gourley, J. J., Duarte, J. A., Vergara, H.,

در آینده جایگزین مناسبی برای روش متحنی دبی-اشل باشد. با توجه به اینکه رودخانه‌ها در شرایط سیلابی به صورت مقاطع مرکب ظاهر می‌شوند و سیلاب‌دشت‌ها نیز بر روی سرعت جریان تأثیرگذار هستند با مطالعه این روش بر روی کانال‌های مرکب و مقاطع رودخانه‌ای می‌توان روش سرعت سطحی را گسترش داد و به نتایج بهتری جهت تخمین دبی رسید.

## فهرست منابع

رحیمی، ا. و رحیم‌پور، م. ۱۳۹۳. اصلاح ضریب سرعت سطحی در روش جسم شناور با مدل‌سازی جریان در نرم‌افزار فلوئنت. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۸(۴):۸۰۹-۸۰۰.

Akter, T., Quevauviller, P., Eisenreich, S. J. and Vaes, G. 2018. Impacts of climate and land use changes on flood risk management for the Schijn River, Belgium. *Environmental science and policy*. 89:163-175.

Al Sawaf, M. B., Kawanisi, K. and Xiao, C. 2020. Measuring Low Flowrates of a Shallow Mountainous River within Restricted Site Conditions and the Characteristics of Acoustic Arrival Times within Low Flows. *Water Resources Management*. 34(10):3059-3078.

Bahmanpouri, F., Barbetta, S., Gualtieri, C., Ianniruberto, M., Filizola, N., Termini, D., and Moramarco, T. 2022. Prediction of river discharges at confluences based on Entropy theory and surface-velocity measurements. *Journal of Hydrology*, 606, 127404.

Biggs, H., Smart, G., Holwerda, N., Doyle, M., McDonald, M. and Ede, M. 2021. River discharge from surface velocity measurements - A field guide for selecting alpha. *Envirolink Advice Report*. Christchurch, New Zealand.

Chanson, H. 2004. The hydraulics of open channel flow: An introduction. Elsevier, Second Edition, Oxford; Burlington, MA: Elsevier Butterworth-Heinemann. Xlvii. 585, [16] of plates. p: 634.

Chen, Y. C., Hsu, Y. C. and Zai, E. O. 2022. Streamflow Measurement Using Mean Surface Velocity. *Water*. 14(15):2370.

Cipolla, S. S., Nones, M. and Maglionico, M. 2018. Estimation of flow discharge using water surface velocity in reclamation canals: a case study, In Proc. of the 5th IAHR Europe Congress - New Challenges in Hydraulic Research and Engineering, Editor(s) Aronne Armanini and Elena Nucci. (pp. 623-624).

Convertino, M., Annis, A., and Nardi, F. 2019.

- Rantz, S. E. 1982. Measurement and computation of streamflow-Volume 2. Computation of discharge: U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2175. 284 p.
- Tauro, F., Selker, J., van de Giesen, N., Abrate, T., Uijlenhoet, R., Porfiri, M., et al. 2018. Measurements and Observations in the XXI century (MOXXI): Innovation and multi-disciplinarity to sense the hydrological cycle. *Hydrological Sciences Journal*. 63(2):169–196.
- USBR (United States Bureau of Reclamation). 1997. Water measurement manual. Water Resources Publications. LLC, Highlands Ranch. CO.
- Weitbrecht, V., Kühn, G. and 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. and Salvaro, M. 2016. Field assessment of noncontact stream gauging using portable surface velocity radars (SVR). *Journal of Water Resources Research*. 52(2):1108–1126.
- Woolway, R. I., Kraemer, B. M., Lenters, J. D., Merchant, C. J., O'Reilly, C. M. and Sharma, S. 2020. Global lake responses to climate change. *Nature Reviews Earth & Environment*. 1(8): 388-403.
- Xia, C., Liu, G., Zhou, J., Meng, Y., Chen, K., Gu, P., Yang, M., Huang, X. and 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.
- Yang, Y., Wen, B., Wang, C. and Hou, Y. 2019. Real-time and automatic river discharge measurement with UHF radar. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 17(11):1851-1855.
- Zhang, J., Guo, L., Huang, T., Zhang, D., Deng, Z., Liu, L. and 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.
- Zhao, H. Y., Chen, H., Liu, B. Y., Liu, W. G., Xu, C. Y., Guo, S. L. and Wang, J. 2021. An improvement of the Space-Time Image Velocimetry combined with a new denoising method for estimating river discharge. *Flow Measurement and Instrumentation*. 77: 101864.
- Wasielowski, D., Ayril, P. A., and Fulton, J. W. 2021. Uncertainty in remote sensing of streams using noncontact radars. *Journal of Hydrology*. 603, 126809.
- Lee, D., Ward, P. and Block, P. 2018. Attribution of Large-Scale Climate Patterns to Seasonal Peak-Flow and Prospects for Prediction Globally. *Water Resources Research*. 54(2):916–938.
- Levesque, V. A., and Oberg, K. A. 2012. Computing discharge using the index velocity method (pp. 3-A23). US Department of the Interior, US Geological Survey.
- Li, Z., Li, Q., Wang, J., Feng, Y. and Shao, Q. 2020. Impacts of projected climate change on runoff in upper reach of Heihe River basin using climate elasticity method and GCMs. *Science of the total Environment*. 716, 137072.
- Liu, B., Wang, Y., Xia, J., Quan, J. and Wang, J. 2021. Optimal water resources operation for rivers-connected lake under uncertainty. *Journal of Hydrology*. 595, 125863.
- Moramarco, T., Barbetta, S. and Tarpanelli, A. 2017. From Surface Flow Velocity Measurements to Discharge Assessment by the Entropy Theory. *Journal of water*. 9(2):1-12
- Muste, M., Fujita, I., and Hauet, A. 2008. Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments. *Journal of Water Resources Research*. 44(4):1–14.
- Nelson, J. M., Kinzel, P. J., Legleiter, C. J., McDonald, R. R., Overstreet, B. and Conaway, J. S. 2017. Using remotely sensed data to estimate river characteristics including water-surface velocity and discharge. 37<sup>th</sup> IAHR World Congress, Kuala Lumpur, Malaysia. (pp. 1-10).
- Osorio-Cano, J. D., Osorio, A. F. and 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.
- 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.
- Randall, M. 2021 National Industry Guidelines for hydrometric monitoring – Part 11: Application of surface velocity methods for velocity and open channel discharge measurements. Bureau of Meteorology. Melbourne, Australia.

## Experimental Investigation of Effective Factors on the Velocity Index for Calculating Discharge in Open Channels

Z. Ghorbani<sup>1</sup>, A. Zahiri<sup>2\*</sup>, H. Khalili Shayan<sup>3</sup>, A.A. Dehghani<sup>4</sup>, Kh. Ghorbani<sup>2</sup>

Received: Apr.22, 2023

Accepted: Aug.22, 2023

### Abstract

Due to the measurement problems related to direct methods for estimating discharge, indirect methods based on the concept of surface velocity have been recently developed. In the present research according to the limited number of studies and the lack of appropriate relations between river geometric and hydraulic parameters with velocity index, the effect of dimensionless parameters including dimensionless Manning roughness coefficient, relative depth, surface Froude number and bed slope on the velocity index has been experimentally investigated. The results showed that by increasing the parameters of relative depth, dimensionless Manning roughness coefficient and surface Froude number the velocity index decreases. Meanwhile the influence of the bed slope is not clear. The mean value of the velocity index in rectangular channels was 0.92 and its average error was estimated to be about 4.9%. Also, the analysis of the analytical models of the vertical velocity distribution showed that in the case of a smooth bed, the power law model with 4.5% average error and in the case of the bed with metal mesh, the logarithmic law with 10% average error have the best estimate of the velocity index.

**Keywords:** Bed Slope, Estimation of Discharge, Surface Velocity, Velocity Index

---

1- Ph.D. Student of Water Structures, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.  
2- Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran  
3- Ph.D. Graduated of Water Structures, Tehran University, Tehran, Iran  
4- Professor, Department of Water Science and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran  
(\*- Corresponding author Email: Zahiri.areza@gmail.com)