



تحقیقات آب و خاک ایران | دوره ۵۳ | شماره ۲ | اردیبهشت ۱۴۰۱ (ص ۳۹۰-۳۸۱)

DOI: <https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2022.327671.669037>

(مقاله علمی - پژوهشی)

Investigating the Effects of Partial Deviation of Acoustic Doppler Velocimeter on Measured Flow Characteristics

MOHAMMAD REZA MADDAHI¹, MAJID RAHIMPOUR^{1*}

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
(Received: July. 28, 2021- Revised: Feb. 15, 2022- Accepted: March. 5, 2022)

ABSTRACT

Acoustic Doppler Velocimeter is one of the most widely used devices in hydraulic laboratories for measuring 3D flow characteristics. The holder of these devices may be slightly deflected over time or during initial installation, and the ADV receivers may not be exactly parallel to the flume. This study investigates the effects of ADV deviation on measured values of flow characteristics. For this purpose, a technician has installed the ADV device on the flume. Partial deviations in both horizontal and vertical planes are measured accurately. Velocity profile was measured in the center of the channel. The results showed that 2 mm deviation in horizontal and vertical planes causes 240% and 67% error in measuring the transversal and vertical velocities, respectively. The effect of deviation on turbulence intensity is significant. Besides, this deviation causes 148% error in Reynolds shear stress measurements. A comparison between measured profiles and global distribution of different parameters shows big difference between them. Finally, the proposed equations to correct the instantaneous 3D velocities perform well and can be used as post-processing tool.

Keywords: ADV, Velocity Profile, Shear Velocity, Turbulence Intensity, Reynolds Shear Stress Distribution.

بررسی تأثیر انحراف جزئی دستگاه سرعت سنج صوتی بر مقادیر اندازه‌گیری شده جریان

محمد رضا مداحی^۱، مجید رحیم‌پور^{*}

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.
(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۵/۶ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۱/۲۶ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۱۲/۱۴)

چکیده

سرعت‌سنج صوتی، ADV، یکی از کاربردی‌ترین دستگاه‌های موجود در آزمایشگاه‌های هیدرولیک برای اندازه‌گیری مشخصات سه‌بعدی جریان است. قاب نگهدارنده دستگاه در طول زمان و یا هنگام نصب اولیه ممکن است دچار انحراف جزئی شود و گیرنده‌های ADV دقیقاً موازی و عمود بر جهت کانال و جریان قرار نگیرد. این تحقیق، تأثیر انحراف ADV بر میزان خطای ناشی از آن در اندازه‌گیری‌های سرعت را مورد بررسی قرار داد. دستگاه ADV بر روی کانال آزمایشگاهی توسط تکنسین نصب شد و میزان انحراف در صفحات افقی و عمودی توسط ابزار دقیق اندازه‌گیری شد. پروفیل سرعت در مرکز کانال اندازه‌گیری شد و تأثیر انحرافات جزئی در نصب دستگاه بر مقادیر اندازه‌گیری شده سرعت جریان و مشخصات آشفته جریان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد انحراف دو میلی‌متری در صفحه‌های افقی و عمودی، موجب بروز خطای ۲۴٪ و ۶۷٪ در اندازه‌گیری سرعت متوسط عرضی و عمقی می‌شود. همچنین، این انحراف موجب بروز خطای ۱۴٪ در مقادیر تنش برشی رینولدز می‌شود. مقایسه پروفیل‌های برداشت‌شده با توزیع جهانی نشان از اختلاف داده‌های برداشت‌شده نسبت به توزیع جهانی دارد. در نهایت روابط ارائه‌شده برای اصلاح سرعت‌های برداشت‌شده از دقت و کارایی مناسب برخوردار بوده و می‌توان به‌عنوان ابزار پردازش مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: سرعت‌سنج صوتی ADV، پروفیل سرعت، سرعت برشی، شدت آشفتگی، تنش برشی رینولدز.

مقدمه

در سال ۱۹۹۴ ارائه شد (Kraus et al., 1994). پس از آن، در بسیاری از آزمایشگاه‌های هیدرولیک و مهندسی رودخانه در مطالعات زیادی از آن استفاده شد. از دستگاه ADV در مطالعات مربوط به مشخصات آشفته جریان (Dey et al., 2011)، مشخصات آشفته جریان بر روی بسترهای زبر قلوه‌سنگی (Nikora and Goring, 2000) و مشخصات آشفته جریان بر روی پوشش گیاهی (Nepf, 1999) استفاده شده است. در ایران نیز دستگاه ADV در بسیاری از مطالعات مورد استفاده قرار گرفته است و نتایج حاصل از آن در مجلات معتبر بین‌المللی چاپ گردیده است. به‌عنوان مثال مطالعات مربوط به تأثیر پوشش گیاهی بر آستانه حرکت ذرات رسوبی (Shahmohammadi et al., 2018)، تأثیر پوشش گیاهی بر مشخصات جریان (Afzalimehr et al., 2017)، مشخصات جریان بر روی شکل‌های بستر و دیواره‌های با پوشش گیاهی (Fazel et al., 2015)، مشخصات جریان بر روی سرریزها (Bagheri and Heidarpour, 2012)، الگوی جریان و تنش برشی در جریان‌های ثانویه (Mohajeri et al., 2018) و ضرایب مومنتم و انرژی کینماتیک در مقاطع مرکب (Keshavarzi and Hamidifar, 2018) که تنها نمونه‌ای از مطالعات بسیار انجام‌گرفته

انجام مطالعات هیدرولیکی و اندازه‌گیری مشخصات جریان در شرایط طبیعی بسیار هزینه‌بر و مستلزم صرف زمان بسیار زیادی است. به همین دلیل مدل‌سازی فیزیکی و عددی به‌عنوان راه‌حلی جایگزین مطرح می‌شوند. در این بین، مدل‌های فیزیکی با مقیاس‌های متفاوت می‌توانند به‌خوبی بیانگر فیزیک مسئله بوده و در بسیاری از هزینه‌ها صرفه‌جویی کنند. پس از ساخت یک مدل فیزیکی، به‌منظور درک فیزیک مسئله مورد بررسی، مشخصات جریان اندازه‌گیری می‌شود. یکی از ابزارهای بسیار مفید در تعیین مشخصات جریان، دستگاه سرعت‌سنج صوتی آکوستیک، ADV^۱، است. دستگاه ADV نوسانات سرعت جریان در دو یا سه جهت را با فرکانس‌های مختلف اندازه‌گیری می‌کند. این اندازه‌گیری‌ها در مطالعات آشفتگی جریان، اندازه‌گیری‌های لایه‌مرزی و اندازه‌گیری‌های مشخصات جریان در نزدیکی بستر کاربرد فراوانی دارد. مزیت اصلی دستگاه ADV نسبت به سایر ادوات اندازه‌گیری مشخصات جریان، برداشت مشخصات سه‌بعدی جریان به‌صورت لحظه‌ای، قیمت پایین‌تر آن و سهولت بیشتر در استفاده از آن است. دستگاه ADV نخستین بار

* نویسنده مسئول: rahimpour@uk.ac.ir

^۱ Acoustic Doppler Velocimeter

ADV بر مقادیر اندازه‌گیری شده سرعت جریان و مشخصات آشفته جریان وجود نداشته است.

بنابراین هدف اصلی این تحقیق پاسخ به این پرسش است که چه میزان انحراف در نصب دستگاه ADV قابل قبول بوده و در صورت انحراف بسیار جزئی، چه میزان خطا در اندازه‌گیری‌ها حاصل می‌شود. همچنین پروفیل سرعت و مشخصات آشفته جریان در مرکز کانال بررسی شده و با نتایج سایر محققین مقایسه گردید.

مواد و روش‌ها

تحقیق حاضر در یک کانال مستقیم، شیب بستر کاملاً افقی و مستطیلی متقارن در شرایط جریان دائمی و زیر بحرانی انجام شد. کانال دارای ابعادی به طول ۸ متر، عرض ۸۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر بود. عمق جریان در زمان انجام آزمایش ۳۵ سانتی‌متر انتخاب گردید؛ بنابراین نسبت عرض به عمق جریان^۳ در زمان آزمایش برابر ۲/۳ بود. فاصله انجام آزمایش از ابتدای کانال به نحوی انتخاب شد که جریان به طور کامل توسعه یافته باشد. نوسانات موجود در سطح آب بعد از ورودی پمپ، به وسیله صفحات نوسان گیر در سطح آب کنترل شد. مطالعات مختلف نشان می‌دهد که برای نسبت‌های عرض به عمق جریان کمتر از ۵، جریان ثانویه وجود داشته و جریان سه‌بعدی است (Nezu and Nakagawa, 1993; Yalin, 1992). سه‌بعدی بودن جریان و وجود جریان‌های ثانویه باعث می‌شود که نتوان نتایج حاصل از این تحقیق را با توزیع جهانی پارامترهای مختلف در جریان‌های ثانویه مقایسه و اثر انحراف دستگاه ADV را بر مشخصات جریان بررسی کرد. دستگاه ADV مورد استفاده در این تحقیق Nortek با فرکانس ۲۵ هرتز بود. مدت زمان اندازه‌گیری جریان در هر عمق نیز سه دقیقه بود؛ بنابراین در هر عمق تعداد ۴۵۰۰ داده اندازه‌گیری می‌شود. پس از اندازه‌گیری پروفیل در اعماق مختلف، داده‌ها با SNR و ضریب COR کمتر از ۱۵ دسی‌بل و ۰.۷۰٪ حذف شد. تمامی اندازه‌گیری‌ها دقیقاً در مرکز کانال انجام شد. سرعت لحظه‌ای جریان در سه راستای موازی جریان^۴، عمود بر جهت جریان در صفحه افقی^۵ و عمود بر راستای جریان در صفحه عمودی^۶ اندازه‌گیری شد. پس از برداشت سرعت لحظه‌ای، مقادیر سرعت متوسط و نوسانات سرعت در هر جهت با استفاده از روابط ۱ تا ۶ محاسبه گردید.

$$U = \frac{\sum_{i=1}^N u_i}{N} \quad (\text{رابطه ۱})$$

در کانال‌های آزمایشگاهی ایران است. علاوه بر این، در سال‌های اخیر دستگاه ADV در رودخانه‌های ایران نیز مورد استفاده قرار گرفته است و مشخصات آشفته جریان بر روی شکل‌های بستر رودخانه‌ها، مشخصات جریان اطراف تخته‌سنگ غیر مستغرق و تأثیر پوشش گیاهی بر روی شکل‌های بستر رودخانه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است (Maddahi et al., 2016; Fazel et al., 2018; Afzalimehr et al., 2019 (a); Afzalimehr et al., 2019 (b)). منابع ارائه شده اولین مطالعاتی است که از دستگاه ADV مقیاس آزمایشگاهی در رودخانه‌های ایران استفاده شده است.

داده‌های برداشت شده با استفاده از دستگاه ADV، بر اساس محدودیت‌های متفاوت فیلتر می‌شوند. به عنوان مثال می‌توان به نسبت صدا به نویز^۱ (SNR) یا ضریب همبستگی^۲ (COR) اشاره کرد که داده‌های با مقادیر کوچک‌تر از ۵ دسی‌بل و ۰.۷۰٪ از سری زمانی برداشت شده حذف می‌گردند. در تمامی مطالعات انجام شده، داده‌هایی که دارای مقادیری کمتر از مقادیر ذکر شده باشد، و یا داده‌هایی با شدت نویز بالا، توسط فیلترهای مختلف ارائه شده حذف می‌گردند (Goring and Nikora, 2002). در اغلب مطالعات انجام شده، روند حذف داده‌های نامطلوب و فیلترهای استفاده شده توضیح داده شده است. نکته مهم دیگر در استفاده از دستگاه ADV، نحوه قرارگیری دستگاه در کانال آزمایشگاهی است. بسته به نوع دستگاه، قرارگیری آن نیز می‌بایست بر اساس دستورالعمل شرکت ارائه کننده باشد. یکی از نکاتی که شرکت‌های ارائه کننده دستگاه ADV در اختیار کاربران قرار می‌دهند، قرارگیری دستگاه ADV به صورت عمودی بوده به نحوی که گیرنده‌ها کاملاً به صورت افقی و در یک تراز ارتفاعی قرار گیرند. همچنین، گیرنده دارای علامت در جهت جریان قرار گرفته و دو گیرنده مجاور نیز موازی کانال یا جریان اصلی قرار گیرد. نصب دستگاه ADV معمولاً توسط تکنسین‌های هر آزمایشگاه صورت می‌گیرد و نحوه قرارگیری دستگاه نه در زمان اولین استفاده و نه بعد از طی مدت طولانی از اولین نصب دستگاه، مورد بررسی و اندازه‌گیری دقیق مجدد قرار نمی‌گیرد. از آنجاکه پایه نگهدارنده دستگاه ADV بر روی کانال‌های آزمایشگاهی مرتباً در حال حرکت در طول، عرض و عمق کانال می‌باشند، احتمال بروز جابه‌جایی‌های بسیار کوچک در نحوه قرارگیری دستگاه درون جریان بعد از طی زمان خواهد بود. علاوه بر آن، معمولاً در اولین نصب دستگاه توسط تکنسین، دقت مورد نیاز نصب ارائه نشده است. این که تا چند میلی‌متر انحراف دستگاه قابل قبول است؟ بررسی منابع نشان می‌دهد تاکنون مطالعه‌ای در مورد تأثیر میزان انحراف جزئی دستگاه

^۵ Longitudinal velocity

^۶ Transverse velocity

^۷ Vertical velocity

^۲ Sound Noise Ratio

^۳ Correlation

^۴ Aspect Ratio

$$U_* = \frac{(\delta_* - \theta)U_{max}}{c\delta_*} \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

که در این رابطه δ_* ضخامت جابجایی لایه مرزی، θ ضخامت اندازه حرکت لایه مرزی و c ضریب تجربی است برابر $4/4$ در نظر گرفته می‌شود (Afzalimehr and Anctil, 2000). ضخامت جابجایی لایه مرزی و ضخامت اندازه حرکت لایه مرزی از روابط ۱۲ و ۱۳ تعیین می‌شود.

$$\delta_* = \int_0^h \left(1 - \frac{U}{U_{max}}\right) dy \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

$$\theta = \int_0^h \frac{U}{U_{max}} \left(1 - \frac{U}{U_{max}}\right) dy \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

که در آن، h عمق جریان است. یکی دیگر از پارامترهای بسیار مهم در مطالعات هیدرولیکی، پروفیل توزیع تنش برشی رینولدز است. توزیع تنش برشی رینولدز علاوه بر تعیین سرعت برشی جریان، دارای کاربردهای بسیار فراوان در مطالعات رسوبی و تحلیل جریان‌های آشفته از طریق انجام آنالیزهای متفاوت، مانند آنالیز کوادرنانت^۴، است. تنش برشی رینولدز در هر عمق از طریق رابطه ۱۴ محاسبه می‌شود. در این تحقیق مقادیر تنش برشی رینولدز فقط در راستای طولی و عمقی محاسبه و بررسی شده است.

$$-\overline{u'w'} = \frac{\sum_{i=1}^N (u'_i w'_i)}{N} \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

که در این رابطه $-\overline{u'w'}$ تنش برشی رینولدز در هر عمق است.

برای برداشت اطلاعات، دستگاه ADV مورد استفاده توسط تکنسین و با دقت بالا، بر روی کانال نصب گردید. در نگاه اول هیچ‌گونه انحرافی در نحوه نصب دستگاه ADV وجود نداشت. با اندازه‌گیری توسط خط کش، کولیس و دوربین نقشه‌برداری، مشخص شد که دستگاه نصب‌شده به طور 100% افقی و در مسیر جریان نیست. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، در صفحه افقی $x-y$ ، دستگاه نصب‌شده در راستای عمود بر جریان دارای دو میلی‌متر انحراف بود. همچنین در راستای عمودی و در صفحه $x-z$ نیز، دریافت‌کننده‌ها در راستای جریان دارای اختلاف ارتفاع دو میلی‌متر و دریافت‌کننده‌های عمود بر راستای جریان دارای اختلاف ارتفاع بسیار ناچیز $0/5$ میلی‌متر بود. باتوجه به فاصله بین دریافت‌کننده‌ها ($60/5$ میلی‌متر) زاویه انحراف دستگاه ADV قابل محاسبه بود.

$$V = \frac{\sum_{i=1}^N v_i}{N} \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$W = \frac{\sum_{i=1}^N w_i}{N} \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$u' = u_i - U \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$v' = v_i - V \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$w' = w_i - W \quad (\text{رابطه ۶})$$

که در این روابط U متوسط سرعت طولی، V متوسط سرعت عرضی، W متوسط سرعت عمودی، u_i سرعت طولی لحظه‌ای، v_i سرعت عرضی لحظه‌ای، w_i سرعت عمودی لحظه‌ای، u' نوسانات سرعت در راستای طولی، v' نوسانات سرعت در راستای عرضی، w' نوسانات سرعت در راستای عمقی و N تعداد داده برداشت‌شده در هر عمق پس از اعمال فیلتراسیون است.

به‌منظور بررسی مشخصات آشفته جریان، پروفیل عمقی شدت آشفتگی در هر سه راستا نیز رسم و بررسی شد. شدت آشفتگی^۱ در هر عمق جریان از طریق روابط ۷ تا ۹ و با محاسبه ریشه میانگین مربعات^۲ نوسانات سرعت تعیین شد.

$$RMSu' = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N u_i'^2}{N}} \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$RMSv' = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N v_i'^2}{N}} \quad (\text{رابطه ۸})$$

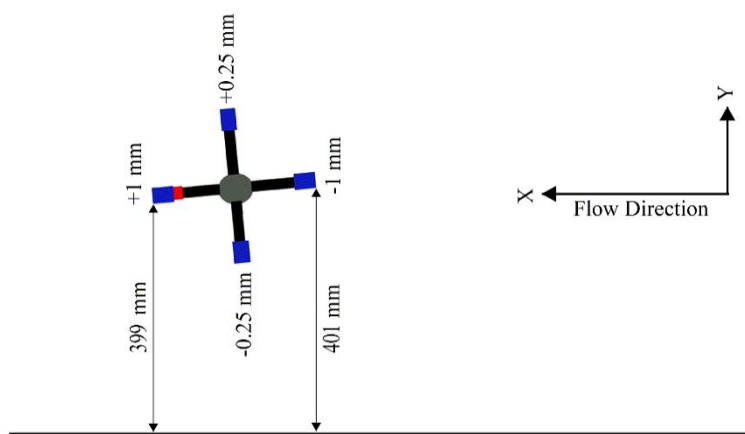
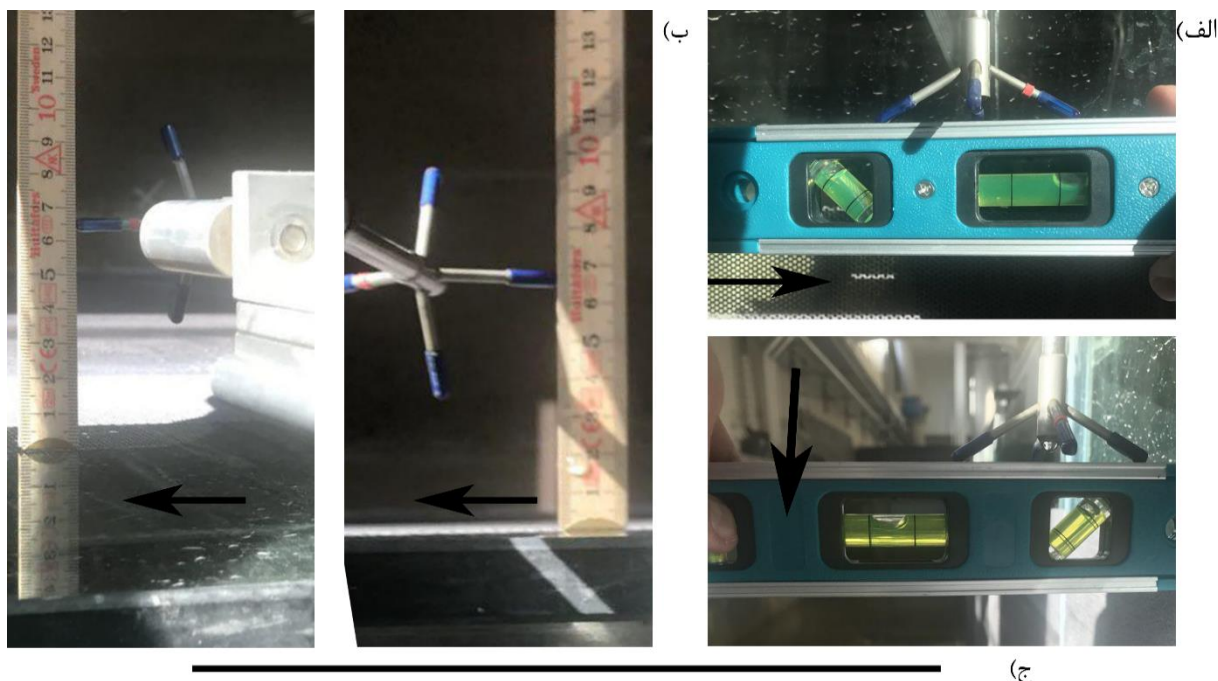
$$RMSw' = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N w_i'^2}{N}} \quad (\text{رابطه ۹})$$

یکی از مهم‌ترین پارامترهای محاسبه‌شده در مطالعات هیدرولیکی و مهندسی رودخانه تعیین سرعت برشی جریان است که از روش‌های متفاوت محاسبه می‌شود. پرکاربردترین این روش‌ها استفاده از پروفیل عمقی سرعت طولی جریان و قانون لگاریتمی است و از رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود.

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{y}{k_s}\right) + B \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

که در این رابطه U_* سرعت برشی، k ثابت ون کارمن برابر $0/4$ ، y عمق جریان که در آن سرعت U اندازه‌گیری شده است، k_s ارتفاع زبری و B ثابت انتگرال است.

یکی دیگر از روش‌های محاسبه سرعت برشی، روش مشخصات لایه مرزی^۳ است که برای رودخانه‌های درشت‌دانه، مطابق رابطه ۱۱ ارائه شده است (Afzalimehr and Anctil, 2000).



شکل ۱- الف) و ب) میزان انحراف دستگاه ADV نصب‌شده در کانال آزمایشگاهی در راستای عمودی و افقی، و ج) شکل شماتیک میزان انحراف و مقادیر انحراف در هر محور. فلش مشکی رنگ جهت جریان در هر عکس را نشان می‌دهد.

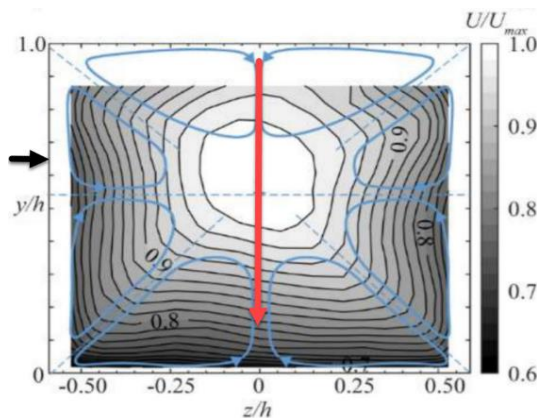
نتایج و بحث

پروفیل سرعت

از آن در جهت فلش قرمز رنگ رو به پایین حرکت می‌کنند؛ بنابراین سرعت‌های اندازه‌گیری شده در مرکز کانال‌هایی با جریان ثانویه، دارای سرعت عمودی منفی است که نشان‌دهنده حرکت جریان از سطح آب به سمت بستر کانال است. همچنین، نوسانات سرعت در راستای عرضی در مرکز کانال نیز صفر است. نکته مهم دیگر در جریان‌های ثانویه، انتقال جریان به سمت مرکز کانال و سپس بستر کانال است، بنابراین برخلاف توزیع لگاریتمی پروفیل سرعت در راستای طولی جریان (x)، حداکثر سرعت زیرسطح آب و در عمق حدود $0/6$ تا $0/8$ از بستر در مرکز کانال رخ می‌دهد که به آن پدیده دیپ^۱ می‌گویند.

نسبت عرض به عمق جریان تعیین‌کننده دو یا سه‌بعدی بودن جریان است. شکل ۲ نمایی از جریان سه‌بعدی در مقطع عرضی یک کانال با نسبت عرض به عمق $1/2$ را نشان می‌دهد. شکل ۲ نشان می‌دهد در جریان‌های سه‌بعدی، علاوه بر سرعت در جهت طولی کانال، گردابه‌هایی عمود بر جهت طولی جریان در راستای عرضی (y) و عمودی (z) نیز تشکیل می‌شود. جهت این گردابه‌ها نشان می‌دهد که جریان از سمت دیواره‌های عمودی کانال به سمت سطح آب‌رفته و سپس به مرکز کانال منتقل می‌شوند، پس

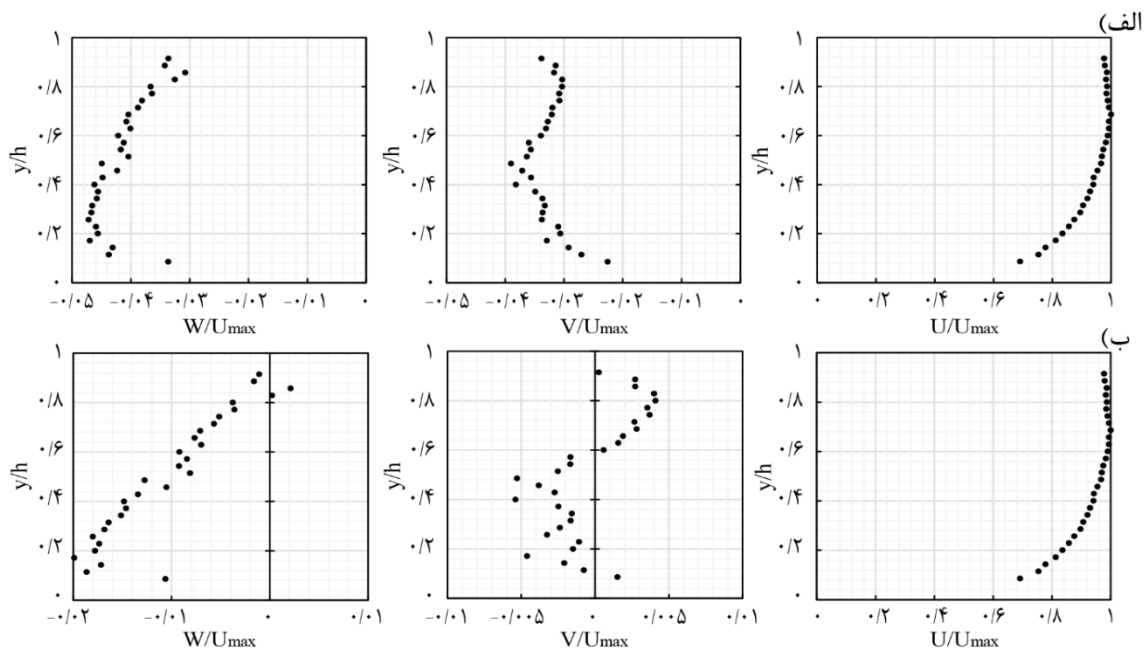
استفاده از روابط ۱۵ تا ۱۸ در دو محور افقی و عمودی اصلاح شده و مقادیر سرعت متوسط در هر راستا مجدداً محاسبه می‌گردد. به دلیل انحراف در دو محور، نخست سرعت‌های افقی از طریق روابط ۱۵ و ۱۶ اصلاح می‌شوند، پس از آن سرعت در جهت طولی با استفاده از رابطه ۱۷ و در صفحه عمودی اصلاح مجدد می‌گردد. نحوه تعیین روابط ۱۵ تا ۱۸ بر اساس شکل شماتیک ۴ انجام شده است. شکل ۴ (الف) دید از بالا بوده، جهت جریان نیز از راست به چپ است. شکل ۴ (ب) دید از کنار بوده که جهت جریان نیز از چپ به راست است.



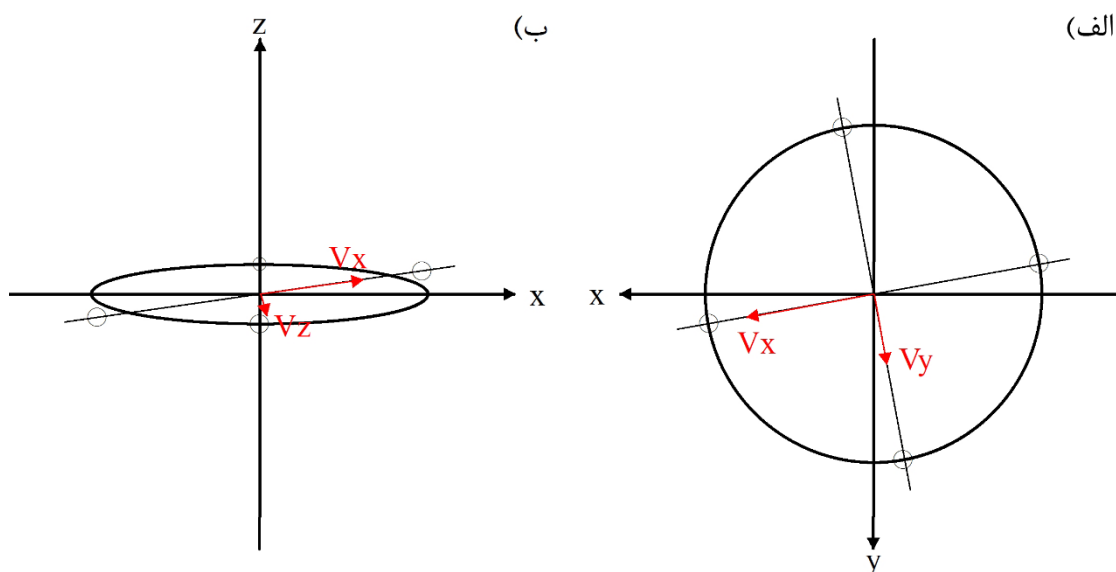
شکل ۲- نمایی از جریان‌های ثانویه و خطوط هم سرعت طولی در کانالی با نسبت عرض به عمق کمتر از ۵ (برگرفته از Demiral et al., 2020). در این شکل فلش قرمز رنگ نشان‌دهنده جریان عمقی رو به پایین در مرکز کانال است و فلش مشکی عمقی که حداکثر سرعت طولی در آن رخ می‌دهد را نشان می‌دهد. z نیز در این شکل فاصله در عرض کانال است.

بنابراین انتظار می‌رود پروفیل‌های سرعت اندازه‌گیری شده در این تحقیق نیز دارای توزیع متناسب با تئوری جریان‌های سه‌بعدی باشند، زیرا پروفیل سرعت اندازه‌گیری شده دقیقاً در مرکز کانال قرار دارد. شکل ۳ (الف) پروفیل‌های سرعت اندازه‌گیری شده در سه راستای x، y و z را نشان می‌دهد.

شکل ۳ (الف) نشان می‌دهد که سرعت در جهت طولی کانال مطابق الگوی جریان‌های ثانویه است. توزیع سرعت به صورت لگاریتمی بوده و حداکثر سرعت زیرسطح آب و در ۰/۷ عمق آب قرار گرفته است. بررسی پروفیل سرعت در جهت عرضی نشان‌دهنده متوسط سرعت حدود ۳۰ میلی‌متر بر ثانیه و به سمت چپ کانال است. این توزیع سرعت خلاف جریان‌های ثانویه در مرکز کانال است. سرعت عمقی در راستای عمودی نیز دارای مقادیر سرعت رو به پایین بوده که در مرکز کانال دارای بیشتری است. این الگوی توزیع سرعت عمقی نیز مطابق الگوی جریان ثانویه نیست، زیرا همانند شکل ۲، سرعت عمقی در نزدیک سطح آب کمتر بوده و با افزایش فاصله از سطح آب مقدار سرعت عمقی در جهت رو به پایین نیز افزایش پیدا می‌کند. شکل ۳ (الف) نشان می‌دهد زمانی که دستگاه ADV با انحراف بسیار جزئی داده‌برداری می‌کند، مقادیر متوسط سرعت در هر عمق و توزیع عمقی آن‌ها در راستای عرضی و عمقی مطابق الگوی جریان‌های ثانویه نیست. به‌منظور بررسی این فرضیه که آیا انحراف دستگاه ADV زمان نصب موجب بروز این اختلاف شده یا سایر عوامل در آن نقش داشته‌اند، مقادیر لحظه‌ای سرعت با



شکل ۳- پروفیل‌های بی‌بعد سرعت در سه راستای طولی، عرضی و عمقی در (الف) دستگاه ADV با انحراف جزئی نصب است و (ب) مقادیر سرعت بر اساس زاویه انحراف اصلاح شده‌اند.



شکل ۴- نحوه اصلاح سرعت‌ها بر اساس انحرافات در الف) محور افقی x-y و ب) محور عمودی x-z

و بیانگر عدم وجود جریان عرضی در مرکز کانال است. پروفیل عمقی سرعت نیز نشان می‌دهد که در سطح آب، جریان عمقی نزدیک صفر بوده و با نزدیک شدن به بستر، مقدار این جریان افزایش می‌یابد که تشابه کاملی با الگوی جریان ثانویه ارائه شده در شکل ۲ دارد. به‌طور کلی، انحراف جزئی دستگاه ADV (حدود دو درجه در محور افقی و عمودی)، موجب بروز ۰/۱۵٪ خطا در سرعت متوسط در راستای طولی می‌شود؛ بنابراین سرعت‌های اندازه‌گیری شده بدون اصلاح در راستای طولی، اندکی کمتر از مقادیر واقعی خواهند بود، ولی این اختلاف ناچیز موجب تغییر پروفیل سرعت طولی جریان نمی‌شود و در بسیاری مواقع قابل چشم‌پوشی است. برخلاف مقادیر سرعت در جهت طولی، مقادیر سرعت در راستای عرضی و عمقی دارای درصد خطای به طور متوسط ۲۴۰٪ و ۶۷٪ است. علاوه بر درصد خطای بالا، شکل توزیع سرعت در این دو راستا نیز تغییرات کلی پیدا کرده، بنابراین، خطا و انحراف در راستای عرضی و عمقی قابل چشم‌پوشی نبوده و موجب بروز خطای بسیار در تحلیل بسیاری از پروژه‌ها در کانال‌های آزمایشگاهی خواهد شد. نکته قابل توجه این است که خطاهای ایجاد شده تنها برای انحرافات جزئی حدود دو درجه ثبت گردیده است که تنها با استفاده از کولیس قابل اندازه‌گیری بود. نتایج نشان می‌دهد در مطالعاتی که هدف اصلی، اندازه‌گیری متوسط سرعت طولی جریان است، انحرافات جزئی دستگاه ADV تأثیری بر مقادیر و نتایج و شکل پروفیل سرعت جریان ندارد. اما در مواردی که سرعت‌های عرضی و عمودی مهم می‌باشند، به طور مثال مطالعات آبشستگی و سرریزهای جانبی، تنظیم دستگاه

$$u_{ct} = u \times \cos\alpha - v \times \sin\alpha \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

$$v_c = v \times \cos\alpha + u \times \sin\alpha \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

$$u_c = u_{ct} \times \cos\beta - w \times \sin\beta \quad (\text{رابطه ۱۷})$$

$$w_c = u_{ct} \times \sin\beta + w \times \cos\beta \quad (\text{رابطه ۱۸})$$

در این روابط u_{ct} مقدار سرعت اصلاح‌شده طولی به صورت موقتی بر اساس انحراف افقی دستگاه ADV، v_c سرعت اصلاح‌شده عرضی، u_c سرعت طولی اصلاح‌شده نهایی بر اساس هر دو انحراف افقی و عمودی دستگاه و w_c سرعت عمقی اصلاح‌شده است. α و β نیز زوایای انحراف دستگاه ADV در راستای افقی و عمودی می‌باشند که باتوجه به انحرافات اندازه‌گیری شده و فاصله گیرنده‌های دستگاه ADV به ترتیب برابر ۲ و ۱/۹ درجه محاسبه شده است. روند اصلاح سرعت‌ها به این صورت است که ابتدا مقادیر سرعت در صفحه افقی x-y با استفاده از روابط ۱۵ و ۱۶ اصلاح می‌گردند. پس از آن، سرعت‌ها در صفحه عمودی x-z با استفاده از روابط ۱۷ و ۱۸ اصلاح می‌شوند.

مقادیر نهایی و اصلاح‌شده متوسط سرعت‌ها در هر عمق در سه راستای متفاوت در شکل ۳ (ب) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۳ (ب) مشاهده می‌شود، مقادیر سرعت در جهت طولی کانال دارای کمترین تغییر نسبت به داده‌های اولیه است. برخلاف آن، مقادیر سرعت در دو جهت دیگر تغییرات بسیار زیادی داشته. این تغییرات موجب تغییر شکل توزیع جریان در عمق شده و شکل اصلاح‌شده پروفیل سرعت عرضی و عمقی مطابق با تئوری جریان‌های ثانویه است، به‌نحوی که پروفیل سرعت‌های اصلاح‌شده در راستای عرضی حول صفر تغییر می‌کند

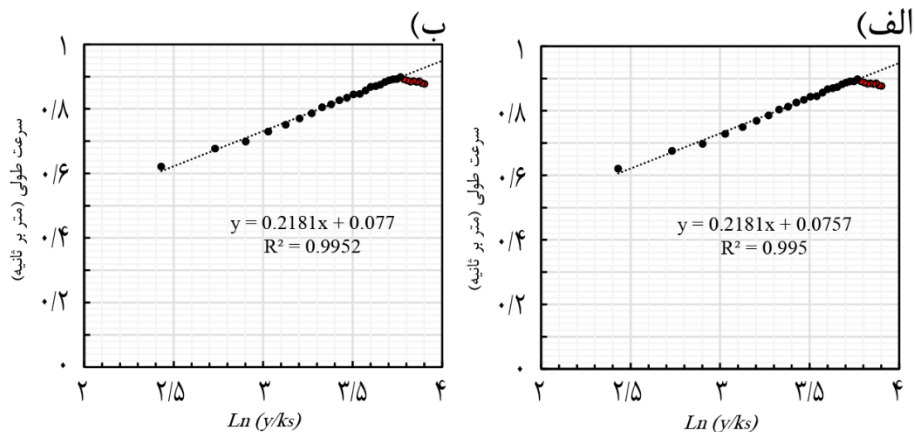
می‌شود. شکل ۵ (الف) مقادیر سرعت در حالت اولیه و بدون اصلاح را نشان می‌دهد. در این حالت، مقدار سرعت برشی برابر $0/08$ متر بر ثانیه محاسبه شده است. شکل ۵ (ب) نیز توزیع لگاریتمی سرعت‌های اصلاح شده را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، شیب خط برازش داده شده به ناحیه داخلی جریان تغییری نکرده و سرعت برشی در این حالت نیز برابر $0/08$ متر بر ثانیه محاسبه شده است؛ بنابراین انحراف جزئی دستگاه ADV، (تا دو درجه)، تأثیری بر توزیع لگاریتمی سرعت نداشته و سرعت برشی محاسبه شده از این طریق دارای خطای نزدیک به صفر است.

سرعت برشی محاسبه شده از روش تئوری مشخصات لایه مرزی برای هر دو مقدار سرعت اصلاح شده و اصلاح نشده برابر حدوداً $0/05$ متر بر ثانیه و دارای اختلاف حدود $0/12\%$ است. مقدار بسیار کم سرعت برشی در روش مشخصات لایه مرزی به دو دلیل کاربرد این روش در رودخانه‌های درشت‌دانه و مقدار ضریب c است که برای این رودخانه‌ها توسعه داده شده است. با فرض صحیح بودن سرعت برشی محاسبه شده از روش لگاریتمی، به دلیل بستر صاف و مشخص بودن مقدار k_s ، مقدار ضریب c برابر ۳ تعیین می‌شود. بررسی صحت این ضریب نیازمند انجام مطالعات بیشتر است.

ADV بسیار ضروری است و انحراف جزئی سبب ارائه پروفیل‌های کاملاً متفاوت نسبت به واقعیت خواهد شد. یکی دیگر از منابع احتمالی خطا، تداخل جریان با سنجنده‌های دستگاه سرعت‌سنج است. مطالعات محققین نشان می‌دهد که اثر تداخل جریان با سنجنده‌های دستگاه ADV زمانی که دستگاه به صورت Downlooking در کانال نصب شده است بسیار ناچیز و قابل چشم‌پوشی است (Chanson et al. 2008). از آن جا که سنجنده‌های دستگاه در این تحقیق نیز به صورت افقی قرار دارند، بنابراین تداخل جریان تأثیری بر مؤلفه‌های اندازه‌گیری شده ندارد.

سرعت برشی

یکی از پارامترهای بسیار مهم در مطالعات هیدرولیکی و مهندسی رودخانه، تعیین سرعت برشی جریان است. سرعت برشی یک عامل بسیار مهم در برآورد پارامترهای هیدرولیکی، طراحی سازه‌های هیدرولیکی و مطالعات مهندسی رودخانه است (Naderi et al., 2021). در این تحقیق، سرعت برشی جریان از دو روش لگاریتمی و تئوری مشخصات لایه مرزی تعیین می‌شود. برای تعیین سرعت به روش مشخصات لایه مرزی از شکل ۵ استفاده



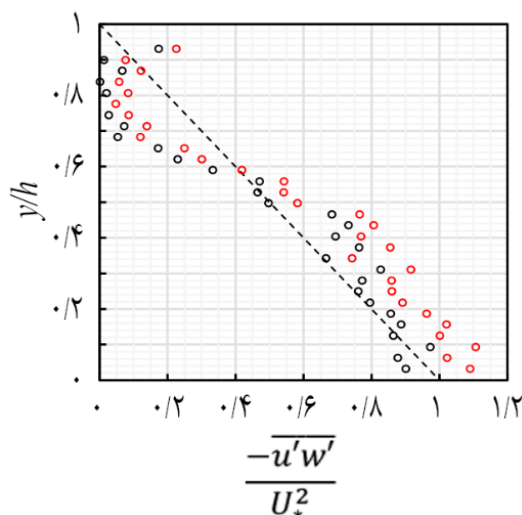
شکل ۵- توزیع لگاریتمی پروفیل طولی سرعت در حالت الف) بدون اصلاح سرعت و ب) مقادیر اصلاح شده سرعت.

عمودی، درصد خطای ایجاد شده بیشتر از سایر جهات است. دلیل این امر انحراف دستگاه ADV روبه‌بالا و گنجانده شدن سرعت‌های طولی در مقادیر سرعت عمودی است. جریان در راستای طولی دارای سرعت و نوسانات بالاتری است و انحراف دستگاه ADV باعث افزایش خطا در راستای عمودی می‌شود. این درصد خطا در آزمایش‌هایی که سرعت عمقی مقادیر بیشتری دارد، مانند مطالعات آبستگی پایه پل، به دلیل جریان‌های روبه پایین، افزایش بیشتری خواهد داشت.

شدت آشفتگی

انحراف دستگاه ADV تأثیر بسیار ناچیزی بر پروفیل توزیع شدت آشفتگی می‌گذارد و شکل پروفیل قبل و بعد از اصلاح داده‌های سرعت تغییری نمی‌کند. محققین پیشین نیز تأثیر کالیبراسیون دستگاه‌ها بر مقادیر شدت آشفتگی را ناچیز برآورد کرده‌اند (Nezu and Nakagawa, 1993). با این حال، درصد تغییرات شدت آشفتگی در هر عمق در جدول ۱ ارائه شده است. انحراف دستگاه ADV باعث برآورد کمتر شدت آشفتگی در جهات طولی و عرضی، و برآورد بیشتر آن در جهت عمقی شده است. همچنین در جهت

نزدیک بستر بیشتر از نواحی نزدیک سطح جریان است که دلیل آن وجود تنش برشی بیشتر است. نحوه انحراف دستگاه ADV سبب شده است که مقدار تنش برشی رینولدز بیشتر از مقادیر واقعی محاسبه گردد. از آنجاکه تنش برشی رینولدز کاربرد زیادی در مطالعات رسوبی دارد، انحراف جزئی دستگاه ADV که سبب بروز خطای متوسط ۱۴۸٪ می‌شود تأثیر بسیار زیادی بر نتایج خواهد گذاشت؛ بنابراین تنظیم بودن دستگاه ADV و یا اصلاح داده‌های اندازه‌گیری شده بسیار ضروری خواهد بود. شکل ۷ توزیع تنش برشی رینولدز قبل (نقاط قرمز رنگ) و بعد (نقاط مشکی رنگ) از اصلاح داده‌های برداشت‌شده را نشان می‌دهد. به دلیل وجود جریان‌های ثانویه، توزیع تنش برشی رینولدز از توزیع جهانی آن منحرف می‌شود (Demiral et al., 2020). در نواحی نزدیک بستر، این انحراف حداقل است و با نزدیک شدن به عمقی که در آن حداکثر سرعت طولی رخ داده است، مقادیر سرعت برشی رینولدز کمتر از مقدار جهانی می‌باشند. در این عمق نیز سرعت برشی منفی شده که دلیل آن منفی بودن گرادیان سرعت به دلیل وجود پدیده دیپ است. در صورت عدم اصلاح سرعت‌های برداشت‌شده، مقدار سرعت برشی رینولدز انحراف بیشتری از توزیع جهانی پیدا کرده و منفی بودن تنش برشی رینولدز در ناحیه دیپ رخ نمی‌دهد. همین امر موجب بروز خطای زیاد در تحلیل بسیاری از پدیده‌های مهندسی هیدرولیک و رسوب می‌شود.



شکل ۷- توزیع تنش برشی رینولدز قبل (قرمز رنگ) و بعد (مشکی رنگ) از اصلاح داده‌ها و میزان انحراف آن‌ها از توزیع جهانی

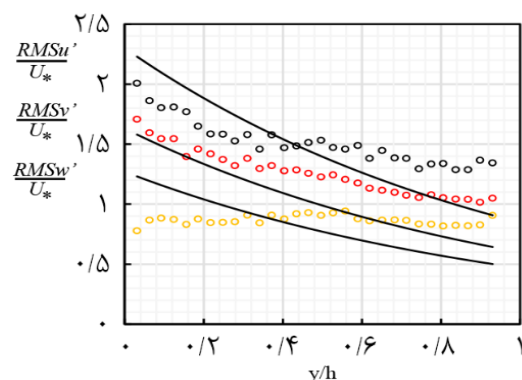
نتیجه‌گیری

دستگاه ADV مورد استفاده در کانال‌های آزمایشگاهی، هنگام نصب و بعد از گذشت زمان، دارای انحرافات به اندازه چند میلی‌متر خواهند شد. تأثیر این انحرافات بر مشخصات جریان در سه راستا

جدول ۱- متوسط، حداقل و حداکثر درصد خطای ناشی از انحراف دستگاه ADV بر مقادیر شدت آشفتگی برای نقاط برداشت‌شده در عمق جریان

$RMSw'$	$RMSv'$	$RMSu'$	
۱/۴٪	-۰/۳٪	-۰/۲٪	متوسط درصد خطا
۰/۰۵٪	-۰/۸٪	-۰/۵٪	حداقل درصد خطا
۳/۲٪	۰/۳۵٪	۰/۰۴٪	حداکثر درصد خطا

توزیع شدت آشفتگی و مقایسه آن با توزیع جهانی شدت آشفتگی برای هر سه مؤلفه در شکل ۶ نشان داده شده است. توزیع شدت آشفتگی در راستای طولی و عرضی و در ناحیه داخلی جریان مشابه توزیع جهانی آن است (Nezu and Nakagawa, 1993). این نمودارها در ناحیه خارجی جریان، دارای انحراف از توزیع جهانی می‌باشند. در مورد شدت آشفتگی در راستای عمودی نیز، توزیع آن به صورت خط افقی بوده و از روند توزیع جهانی پیروی نمی‌کند. دلیل این انحراف در ناحیه خارجی جریان، وجود جریان‌های ثانویه است. جریان‌های ثانویه میل به انحراف جریان به سمت بستر را داشته که موجب افزایش شدت آشفتگی هم‌زمان با فاصله‌گرفتن از سطح آب می‌شود (Demiral et al., 2020). یکی دیگر از دلایل انحراف، عدد فرود جریان است. نمودارهای توزیع جهانی برای جریان با عدد فرود بالای ۰/۴ توسعه داده شده است، در حالی که عدد فرود در این مطالعه کمتر از آن است. سایر محققین نیز در اعداد فرود متفاوت، نوساناتی در توزیع شدت آشفتگی برای مؤلفه عمودی گزارش کرده‌اند (Demiral et al., 2020). دلیل دیگر این اختلاف را می‌توان در زبری بستر دانست. بستر در این تحقیق دارای حداقل زبری ممکن است که این امر می‌تواند موجب کاهش نوسانات سرعت و شدت آشفتگی در هر سه مؤلفه شود.



شکل ۶- توزیع عمقی مؤلفه‌های شدت آشفتگی و مقایسه روند آن‌ها با توزیع جهانی

تنش برشی رینولدز

تنش برشی رینولدز محاسبه شده بر اساس نوسانات سرعت در جهات طولی و عمقی نشان می‌دهد که انحراف دستگاه ADV موجب بروز خطایی برابر ۱۴۸٪ می‌شود. این خطا در نواحی



رینولدز در راستای طولی و عمقی داشته و موجب بروز خطای حدود ۱۴۸٪ می‌شود. از آنجاکه از این پارامتر در تحلیل‌های اغلب پروژه‌های رسوبی و همچنین آنالیزهای متفاوت مانند آنالیز کوادرنانت استفاده می‌شود، اصلاح داده‌های برداشت‌شده و همچنین تنظیم و نصب مجدد و دقیق دستگاه ADV بسیار ضروری است. روابط ۱۵ تا ۱۸ ارائه‌شده کارایی مناسبی برای اصلاح مقادیر سرعت برداشت‌شده در سه راستا خواهند داشت و در صورت برداشت داده با دستگاه دارای انحراف، می‌توان این داده‌ها را با استفاده از این روابط اصلاح کرد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Afzalimehr, H. and Anctil, F. (1998) Estimation of gravel-bed river flow resistance. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(10), 1054-1058.
- Afzalimehr, H., Barahimi, M. and Sui, J. (2017) Non-uniform flow over cobble bed with submerged vegetation strip. *Water Management*, 172(2), 1-40.
- Afzalimehr, H., Maddahi, M. R., Naziri, D. and Sui, J. (2019a) Effects of non-submerged boulder on flow characteristics – A field investigation. *International Journal of Sediment Research*, 34(2), 136-143.
- Afzalimehr, H., Maddahi, M. R., Sui, J. and Rahimpour, M. (2019b) Impacts of vegetation over bedforms on flow characteristics in gravel-bed rivers. *Journal of Hydrodynamics*, 31, 986-998.
- Bagheri, S. and Heidarpour, M. (2012) Characteristics of flow over rectangular sharp-crested side weirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(6), 541-547.
- Chanson, H., Trevethan, M. and Aoki, S. (2008). Acoustic Doppler velocimetry (ADV) in small estuary: Field experience and signal post-processing. *Flow Measurement and Instrumentation*, 19, 307-313.
- Demiral, D., Boes, R. M. and Albayrak, I. (2020) Effects of secondary currents on turbulence characteristics of supercritical open channel flows at low aspect ratios. *Water*, 12(11), 3233.
- Dey, S., Sarkar, S. and Solari, L. (2011) Near-bed turbulence characteristics at the entrainment threshold of sediment beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(9), 945-958.
- Fazel Najafabadi, E., Afzalimehr, H. and Sui, J. (2015) Turbulence characteristics of favorable pressure gradient flows in gravel-bed channel with vegetated walls. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 63(2), 154-163.
- Fazel Najafabadi, E., Afzalimehr, H. and Rowinski, P. M. (2018) Flow structure through a fluvial pool-riffle sequence – Case study. *Journal of Hydro-environment Research*, 19, 1-15.
- Goring, D. G. and Nikora, V. I. (2002) Despiking Acoustic Doppler Velocimeter data. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(1), 117-126.
- Keshavarzi, A. and Hamidifar, H. (2018) Kinetic energy and momentum correction coefficients in compound open channels. *Natural Hazards*, 92, 1859-1869.
- Kraus, N. C., Lohrmann, A. and Cabrera, R. (1994) New acoustic meter for measuring 3D laboratory flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 120, 406-412.
- Maddahi, M. R., Afzalimehr, H. and Rowinski, P. M. (2016) Flow characteristics over a gravel bedform: Kaj River case study. *Journal of Acta Geophysica*, 64(5), 1779-1796.
- Mohajeri, S. H., Safarzadeh, A. and Salehi Neyshabouri, S. A. A. (2018) Importance of bed roughness in transversal variability of the flow patterns and bed shear stress due to secondary currents. *Scientia Iranica, Transactions A: Civil Engineering*, 25, 1956-1967.
- Naderi, M., Afzalimehr, H. and Sohrabi, S. (2021) Investigation of three-parameter flow resistance model in coarse-bed rivers (case study: Deryuk River). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(5), 1423-1435. (In Farsi)
- Nepf, H. M. (1999) Drag, turbulence, and diffusion in flow through emergent vegetation. *Water Resources Research*, 35(2), 479-489.
- Nezu, I. and Nakagawa, H. (1993) *Turbulence in open-channel flows*. Rotterdam: IAHR-AIRH monograph series.
- Nikora, V. and Goring, D. (2000) Flow Turbulence over fixed and weakly mobile gravel beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(9), 679-690.
- Shahmohammadi, R., Afzalimehr, H. and Sui, J. (2018) Impacts of turbulent flow over a channel bed with a vegetation patch on the incipient motion of sediment. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 45, 803-816.
- Yalin, M. S. (1992) *River mechanics*. Oxford: Pergamon press Ltd.