



Effect of Side Looking Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) Presence on Turbulent Flow Field in Compound Channel

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Sadeghi Dodaran R.¹ MSc,
Salehi Neyshabouri S.A.A.^{*1} PhD,
Nabipour M.¹ PhD,
Mohajeri S.H.² PhD,
Zarrati A.R.³ PhD

How to cite this article

Sadeghi Dodaran R, Salehi Neyshabouri S.A.A, Nabipour M, Mohajeri S.H, Zarrati A.R. Effect of Side Looking Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) Presence on Turbulent Flow Field in Compound Channel. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(12):2945-2953.

ABSTRACT

Acoustic doppler velocimetry (ADV) is a common measurement technique for flow field in open-channel flows. Since ADV is an intrusive measurement method, the presence of ADV probe may causes changes in flow structure and may intensify the turbulence in sampling volume which can affect the experimental results and analysis. To explore these effects, in this study, particle image velocimetry (PIV) was employed to measure the flow field with and without the presence of a side looking ADV probe in a compound channel. The results of this research showed that the intrusion of ADV in the flow field increases the streamwise velocity in the ADV measurement volume by 1.7%. The more enhanced effect is also notified in the secondary currents so that in the present test conditions, the presence of the side looking ADV causes a decrease in lateral velocity by 4.5 times and causes an increase in vertical velocity by 2.7 times. Investigation of the turbulent intensities showed that the presence of the side looking ADV causes an increment in streamwise turbulent intensity, while does not significantly affect the lateral and vertical components. Furthermore, examining vertical Reynolds shear stress measurement data with or without the presence of ADV showed that the measured values differ in the two states and the presence of ADV decreases 30% of Reynolds shear stress in place of the control volume.

Keywords Side Looking Acoustic Doppler Velocimeter; Particle Image Velocimetry; Flow Pattern; Turbulence Parameters; Interference of ADV

CITATION LINKS

[1] Effects of bed roughness and adverse bed slopes [2] An experimental study of tidal bores and positive surges: hydrodynamics and turbulence of the bore front [3] New Acoustic meter for measuring 3D laboratory flows [4] Discussion of despiking acoustic doppler velocimeter data [5] Estimation of power spectra of acoustic-doppler velocimetry data contaminated with intermittent spikes [6] Infrared-based measurements of velocity, turbulent kinetic energy, and dissipation at the water surface in a tidal river [7] Comparison of macroturbulence measured using decomposition of PIV, ADV and LSPIV data [8] Comparison of ADV and PIV measurements in open channel flows [9] Mean flow and turbulence in compound channels with vegetated floodplains [10] Experimental study on flow pattern and scour hole dimensions around a T-shaped spur dike in a channel bend under emerged and submerged conditions [11] Improvements in Acoustic Doppler Velocimetry [12] Experimental study of side looking ADV probe accuracy in a turbulent flow field [13] Study on turbulent flow in a compound channel with shallow overbank using Particle Image Velocimetry [14] Turbulence in open-channel flows [15] Exchange flow between open water and floating vegetation [16] Particle image velocimetry, a practical guide [17] PIVlab-towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in MATLAB [18] Flow-vegetation interactions: length-scale of the "monami" phenomenon [19] Turbulence measurements of dye concentration and effects of secondary flow on distribution in open channel flows [20] The structure of gravel bed flow with intermediate submergence: a laboratory study [21] Flow around bridge piers [22] The turbulent flow field around a circular cylinder [23] Turbulence statistics in compound channels with deep and shallow overbank flows

¹Civil Engineering Department, Civil and Environmental Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

²Civil Engineering Department, Engineering Faculty, Kharazmi University, Tehran, Iran

³Civil Engineering Department, Civil Engineering Faculty, Amirkabir University, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Civil Engineering Department, Civil and Environmental Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
Phone: +98 (21) 82883316
Fax: +98 (21) 82883316
salehi@modares.ac.ir

Article History

Received: July 11, 2018

Accepted: May 26, 2019

ePublished: December 21, 2019

بررسی اثر حضور فیزیکی دستگاه سرعت سنج صوتی جانب نگر (ADV) در میدان جریان آشفته در کانال مرکب

رضا صادقی دودران MSc

گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

سیدعلی اکبر صالحی نیشابوری PhD

گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

مصطفی نبی پور PhD

گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

سیدحسین مهاجری PhD

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

امیررضا زرانی PhD

گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

دستگاه سرعت سنج صوتی یکی از ابزارهای متداول اندازه گیری میدان جریان در کانال های باز است. علاوه بر خطاهای ذاتی دستگاه سرعت سنج صوتی، حضور حسگرهای دستگاه درون جریان می تواند موجب تغییر الگوی جریان و تشدید آشفتگی در حجم نمونه گیری شود که بر نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی موثر خواهد بود. برای بررسی این موضوع در این مطالعه به منظور تفکیک اثر تداخل فیزیکی سرعت سنج صوتی از خطای ذاتی آن، سرعت جریان به وسیله سرعت سنج تصویری ذرات در دو حالت حضور فیزیکی سرعت سنج صوتی و عدم حضور آن (در محدوده حجم نمونه گیری) در یک کانال مرکب برداشت شد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که اثر تداخلی سرعت سنج صوتی جانب نگر در سرعت طولی در محدوده حجم نمونه گیری باعث افزایش سرعت طولی به میزان ۱/۷٪ شده و این اثر در سرعت های ثانویه شدیدتر است به طوری که در شرایط آزمایش حاضر، حضور سرعت سنج صوتی جانب نگر باعث تغییر سرعت عرضی به میزان ۴/۵ برابر و تغییر سرعت قائم به میزان ۲/۷ برابر حالت عدم حضور سرعت سنج می شود. بررسی شدت های آشفتگی نشان داد که حضور سرعت سنج صوتی جانب نگر باعث افزایش شدت آشفتگی طولی می شود در حالی که بر شدت آشفتگی عرضی و قائم تاثیر چندانی ندارد. همچنین بررسی تنش رینولدز قائم در دو حالت حضور و عدم حضور سرعت سنج صوتی نشان داد که مقادیر اندازه گیری شده در دو حالت اختلاف دارند و حضور سرعت سنج صوتی ۳۰٪ تنش رینولدز قائم را در محل حجم کنترل کاهش می دهد.

کلیدواژه ها: سرعت سنج صوتی جانب نگر، سرعت سنج تصویری ذرات، الگوی جریان، پارامترهای آشفتگی، تداخل سرعت سنج صوتی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۴/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۳/۰۵

* نویسنده مسئول: salehi@modares.ac.ir

۱- مقدمه

تحلیل و بررسی حرکت سیال در اغلب طراحی های مهندسی که در ارتباط با آب می باشد نقش بسیار مهمی در درک رفتار سیستم و طراحی بهینه آن ایفا می کند. در این بین در مطالعات جریان آب در آبراهه ها و رودخانه ها، درک اساسی میدان جریان و پارامترهای آشفتگی برای شناخت انتقال رسوب، انتقال مواد مغذی در فاضلاب ها و رواناب های ناشی از سیلاب ضروری است [1]. لذا تعیین دقیق سرعت سیال و پارامترهای آشفتگی در حل میدان جریان و طراحی های مهندسی امری ضروری است. هرچند محاسبات تئوری و شبیه سازی های عددی یکی از روش های پرکاربرد در شناخت میدان جریان می باشد ولی نتایج این روش ها در موقعیت های پیچیده و شرایط سببندی و بدون انجام آزمایش های تجربی برای واسنجی و

صحت سنجی آن ها قابل اعتماد نیست و اطلاعات دقیق در مورد یک فرآیند فیزیکی اغلب در مطالعات آزمایشگاهی به دست می آید [1]. بنابراین اندازه گیری میدان جریان در مطالعات آزمایشگاهی از اهمیت بالایی برخوردار بوده و داده های با کیفیت بالا، نقش اساسی در فهم پدیده های هیدرولیکی و همچنین توسعه و صحت سنجی مدل های عددی دارند.

از جمله روش های پرکاربرد اندازه گیری میدان جریان در کانال های باز استفاده از دستگاه سرعت سنج صوتی داپلر (Acoustic Doppler Velocimetry; ADV) می باشد. این دستگاه به سه نوع پایین نگر، جانب نگر و بالانگر تقسیم بندی می شوند [2]. نسل جدید این سرعت سنج ها از طریق ارسال موج صوتی به سمت یک حجم نمونه گیری که در فاصله ۵ سانتی متری فرستنده واقع شده است و دریافت امواج برگشتی توسط ۳ یا ۴ شاخک گیرنده، سرعت ذرات داخل حجم نمونه گیری را اندازه گیری می کند. با توجه به اساس عملکرد دستگاه، سنسور فرستنده و همچنین شاخک های گیرنده بایستی همواره در داخل جریان باشند [3].

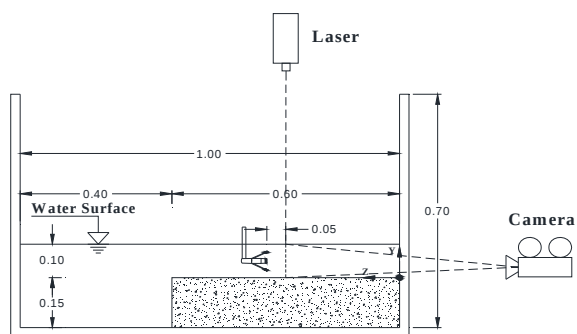
مطالعات گذشته حاکی از آن است که دو منشاء اصلی داده های نادرست در دستگاه سرعت سنج صوتی داپلر، ناشی از پدیده داپلر نویز و پدیده هم اثر سازی سیگنال (Aliasing of Signal) می باشند [4]. احتمال رخداد این خطاها در ۳ حالت تجاوز سرعت جریان از محدوده سرعت مجاز دستگاه، شدت های آشفتگی زیاد و در نزدیکی مرزهای صلب (دیواره ها) بیشتر است [5].

چیکادل و همکاران از سرعت سنجی تصویری ذرات مبتنی بر مادون قرمز حرارتی (Thermal Infrared-Based PIV) و سرعت سنجی صوتی داپلر برای مقایسه سرعت متوسط، انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ استهلاک انرژی برای یک نقطه در سطح جریان استفاده کردند. نتایج این محققین نشان داد که هر دو ابزار قادر به اندازه گیری سرعت متوسط با دقت مناسب هستند در حالی که اختلاف متوسط ۸ و ۷ درصد را به ترتیب برای انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ استهلاک انرژی اندازه گیری شده با استفاده از ۲ ابزار گزارش کردند [6]. فاکس و بچلر با استفاده از ۲ ابزار سرعت سنج صوتی و تصویری ذرات به مطالعه مقیاس های طولی آشفتگی در کانال باز با بستر سنگی پرداختند. ایشان نتیجه گرفتند که هر دو ابزار، مقیاس طولی آشفتگی را به درستی تعیین می کنند [7]. رونان و همکاران به مقایسه کمی تنش های رینولدز در کانال باز حاصل از روش های سرعت سنجی تصویری ذرات (Particle Image Velocimetry) و سرعت سنج صوتی پروفایلر (ADV Profiler Velocimeter) پایین نگر پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که مقادیر اندازه گیری شده به وسیله ۲ دستگاه دارای اختلاف بوده و اندازه گیری پارامترهای آشفتگی با دستگاه سرعت سنج صوتی داپلر نیازمند ارزیابی دقیق می باشد [8]. البته ایشان در خصوص دقت دستگاه سرعت سنج صوتی داپلر در اندازه گیری جریان های ثانویه اظهار نظر نکرده اند.

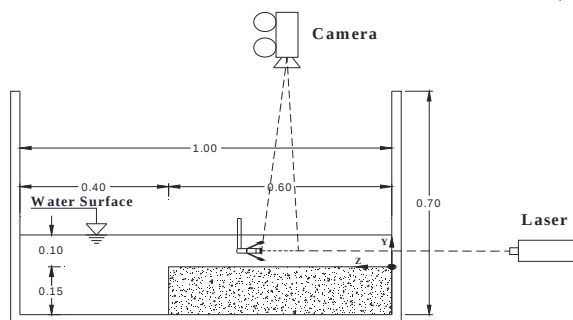
حمیدی فر و همکاران به بررسی ساختار جریان در کانال مرکب با استفاده از دستگاه سرعت سنج صوتی جانب نگر پرداختند. ایشان با استفاده از این ابزار به اندازه گیری جریان های ثانویه در کانال مرکب پرداخته اند اما درباره دقت این ابزار در اندازه گیری جریان های ثانویه اظهار نظر نکرده اند [9]. مهرآیین و همکاران به بررسی ساختار جریان و گردابه های تشکیل شده در اطراف آبشکن T شکل با استفاده از دستگاه سرعت سنج صوتی پایین نگر و جانب نگر پرداخته اند. ایشان نتیجه گرفتند که برآورد تنش برشی بستر با استفاده از دستگاه سرعت سنج صوتی با توجه به ابعاد و اندازه حفره آبشستگی ایجاد شده از دقت قابل قبولی برخوردار است [10].

۲- تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس در یک کانال مستقیم به طول ۱۱، عرض ۱ و ارتفاع ۰/۷ متر انجام شد. کانال آزمایشگاهی مذکور، یک کانال عریض با مقطع مرکب می‌باشد که در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به عرض زیاد کانال و همچنین عرض زیاد سیلاب دشت، پروفیل سرعت در وسط سیلاب دشت مشابه پروفیل سرعت لگاریتمی به دست می‌آید و به عبارت دیگر جریان در اواسط سیلاب دشت تقریباً دوبعدی است [13]. همچنین با توجه به نسبت عرض سیلاب دشت (۶۰ سانتی متر) به عمق جریان (۱۰ سانتی متر) ($b/h = 6 > 5$)، کانال از نوع عریض محسوب می‌شود [14]. جداره‌های جانبی و کف کانال از جنس شیشه بوده و برای تصویربرداری از جریان مناسب می‌باشند.



(a)



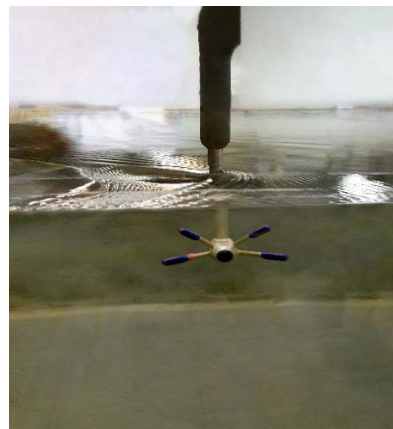
(b)

شکل ۲) مقطع عرضی کانال در مطالعه حاضر (کلیه ابعاد بر حسب متر است)

در این مطالعه، محور X موازی بستر بوده و در جهت راستای طولی جریان اصلی و به سمت پایین دست مثبت می‌باشد. محور Y عمود بر جهت جریان در راستای قائم بوده و جهت مثبت آن از بستر به سمت بالا می‌باشد. در نهایت محور Z در راستای عرضی بوده و مبدأ آن دیواره سمت راست کانال می‌باشد. برای کنترل عمق آب، از یک سرریز قابل تنظیم در انتهای کانال استفاده شد و عمق آب توسط یک عمق سنج دیجیتالی نقطه‌ای تعیین گردید. دبی در ورودی کانال، با استفاده از شیر تنظیم دبی خروجی از پمپ کنترل شده و به وسیله یک دبی سنج الکترومغناطیسی اندازه‌گیری شد. به منظور حذف تلاطم در ابتدای کانال از صفحه‌های موازی آرام‌کننده جریان استفاده شده است. شرایط توسعه یافتگی جریان در مقطع اندازه‌گیری توسط نبی‌پور و همکاران مورد بررسی و تایید قرار گرفت [13]. با توجه به افزایش اثر تداخلی سرعت سنج صوتی در جریان‌های کم عمق، عمق جریان برابر ۱۰ سانتی متر در نظر گرفته شد تا جریان کم عمق شکل نگیرد ($b/h = 6 < 10$). رژیم جریان در کانال، زیر بحرانی و کاملاً آشفته می‌باشد.

علاوه بر خطاهای ذاتی دستگاه سرعت سنج صوتی که به آن اشاره شد، حضور حسگرهای دستگاه در داخل جریان به صورت یک مانع عمل نموده و می‌تواند موجب تغییر الگوی جریان و تشدید آشفتگی در نزدیکی شاخک‌های دستگاه شود. این پدیده که در شکل ۱ با جزئیات نمایش داده شده است، می‌تواند بر نتایج برداشتی و در ادامه بر تحلیل‌های انجام شده موثر باشد.

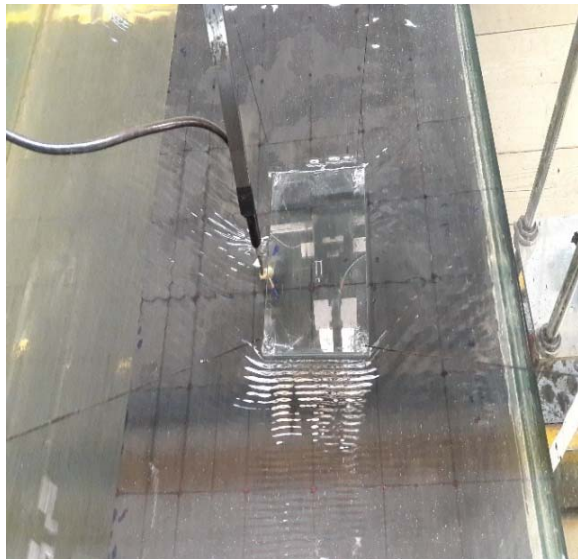
برای کاهش اثر تداخلی شاخک‌های دستگاه سرعت سنج صوتی، نسل جدید حسگرها طراحی شده و به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. نسل جدید حسگرها دارای ابعاد و اندازه کوچکتر نسبت به حسگرهای قدیمی می‌باشند [11]. روزلو و همکاران به بررسی اثر تداخلی شاخک‌های نسل جدید نسبت به نسل قدیم در میدان جریان پرداختند. نتایج پژوهش این محققان نشان داد که نسل جدید این دستگاه تلاطم کمتری در جریان ایجاد نموده و قادر به اندازه‌گیری مشخصات جریان در نسبت‌های پایین سیگنال به نویز می‌باشد [11]. نبی‌پور و همکاران به بررسی میزان دقت دستگاه سرعت سنج صوتی جانب نگر در میدان جریان آشفته پرداختند. نتایج این محققین نشان داد که حضور فیزیکی سرعت سنج صوتی جانب نگر در میدان جریان، اثر تداخلی داشته و نیازمند مطالعه بیشتر است [12].



شکل ۱) نمایی از ایجاد تداخل دستگاه سرعت سنج صوتی دایر جانب نگر در جریان هنگام اندازه‌گیری سرعت (جهت جریان از راست به چپ می‌باشد)

علی‌رغم استفاده گسترده از دستگاه سرعت سنجی صوتی دایر در مطالعات آزمایشگاهی و میدانی، تاکنون مطالعه‌ای در مورد بررسی اثر تداخلی حضور دستگاه سرعت سنج صوتی در میدان جریان انجام نشده است. بنابراین لزوم تحقیقات بیشتر بر اثر دستگاه سرعت سنج صوتی در الگوی جریان و ساختار آشفتگی در محدوده اندازه‌گیری دستگاه ضروری به نظر می‌رسد. برای بررسی میزان تداخل سرعت سنج صوتی در میدان جریان و به منظور تفکیک اثر تداخل فیزیکی سرعت سنج صوتی از خطای ذاتی آن، نیاز به اندازه‌گیری سرعت جریان توسط یک ابزار اندازه‌گیری غیرتداخلی دیگر می‌باشد.

با توجه به اطلاعات ارائه شده، در این تحقیق میدان جریان با استفاده از ابزار سرعت سنج تصویری ذرات (در محدوده حجم نمونه‌گیری) در دو حالت جریان با حضور فیزیکی سرعت سنج صوتی جانب نگر و بدون حضور آن در یک کانال مرکب، اندازه‌گیری و مقایسه شده است. بنابراین با فرض اینکه خطای ذاتی دستگاه سرعت سنج تصویری ذرات در دو حالت اندازه‌گیری جریان با حضور سرعت سنج صوتی و بدون حضور آن تقریباً یکسان است، می‌توان از مقایسه نتایج این آزمایشات اثر تداخل فیزیکی سرعت سنج صوتی را به دست آورد. در ادامه نحوه انجام آزمایش‌ها توضیح داده می‌شود.



شکل ۳) نمای بالایی از شیشه مماس بر سطح آب در برداشت صفحه افقی با حضور ADV جانب‌نگر

۳- نتایج و بحث

نمودار ۱ سرعت متوسط طولی را در صفحه قائم در دو حالت بدون حضور سرعت‌سنج صوتی (نمودار ۱- a) و با حضور فیزیکی آن (نمودار ۱- b) (برداشت‌شده توسط دستگاه سرعت‌سنج تصویری ذرات) نشان می‌دهند. محل حجم نمونه‌گیری دستگاه سرعت‌سنج صوتی با استفاده از نماد مربع در نمودار ۱- b نمایش داده شده است. مقایسه این دو نمودار نشان می‌دهد که حضور دستگاه سرعت‌سنج صوتی در داخل جریان باعث افزایش سرعت در صفحه برداشت به خصوص در لایه‌های فوقانی جریان می‌گردد. این افزایش سرعت به علت حضور شاخک‌ها و بازوی نگه‌دارنده سرعت‌سنج صوتی در داخل جریان و ایجاد تنگ‌شدگی در مقطع می‌باشد.

به منظور بررسی دقیق‌تر، در شکل ۴ سطح مقطع مقابل جریان دستگاه سرعت‌سنج صوتی جانب‌نگر نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴ مساحت مقابل جریان دستگاه سرعت‌سنج صوتی برابر $12/68$ سانتی‌متر مربع می‌باشد. با محاسبه سطح مقطع کانال در مقطع برداشت (1600 سانتی‌متر مربع)، میزان تنگ‌شدگی سطح مقطع جریان در اثر حضور دستگاه سرعت‌سنج صوتی حدود $0/8$ درصد سطح مقطع اولیه می‌باشد. این کاهش در سطح مقطع جریان باعث افزایش سرعت متوسط طولی به میزان حدود 1 درصد می‌شود. با مقایسه نتایج می‌توان به این نتیجه رسید که افزایش سرعت متوسط طولی به دلیل کاهش سطح مقطع جریان در اثر حضور سرعت‌سنج صوتی می‌باشد. مقایسه کمی سرعت طولی در محدوده حجم نمونه‌گیری نشان می‌دهد که اثر تداخلی سرعت‌سنج صوتی جانب‌نگر در سرعت طولی حدود $1/7$ درصد سرعت طولی می‌باشد. اختلاف بین درصد تغییر در سرعت متوسط و $1/7$ درصد مشاهداتی در سرعت حجم نمونه‌گیری می‌تواند ناشی از دو عامل باشد. نخست آن که در محاسبه میزان انسداد جریان توسط بدنه سرعت‌سنج صوتی از اثر شاخک‌ها صرف نظر شده است؛ این در حالی است که حضور شاخک‌ها در جلوی صفحه اندازه‌گیری در میزان انسداد جریان و کاهش سطح مقطع مفید جریان، موثر می‌باشد که این امر می‌تواند موجب افزایش سرعت بیش از 1 درصد گردد. همچنین انحراف جریان توسط شاخک‌ها در صفحه قرارگیری حجم نمونه‌برداری می‌تواند موجب ایجاد جریان سه‌بعدی گردد که ماهیت جریان سه‌بعدی افزایش سرعت طولی در حجم نمونه‌گیری را موجب می‌گردد.

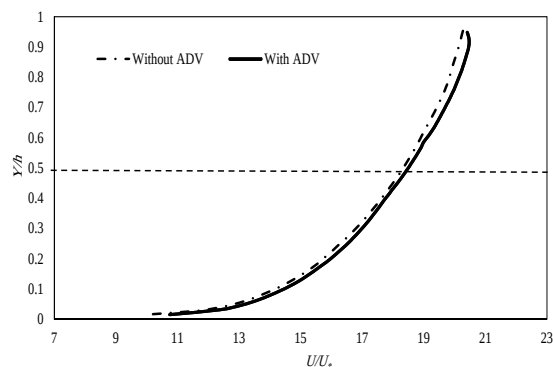
برای اندازه‌گیری غیرتداخلی میدان جریان از دستگاه سرعت‌سنج تصویری ذرات به صورت دوبعدی و دو مؤلفه‌ای در صفحات عمودی $X-Y$ و افقی $X-Z$ استفاده شد. صفحه عمودی موازی دیواره‌های کانال و به فاصله 30 سانتی‌متری از دیواره سمت راست کانال در شکل ۲- a در نظر گرفته شد و صفحه افقی موازی بستر کانال و به فاصله 5 سانتی‌متر از آن می‌باشد (شکل ۲- b). این صفحات در محدوده حجم نمونه‌گیری و در مرکز آن باهم تلاقی دارند. صفحه‌ها به صورت خط‌چین در شکل ۲ نشان داده شده‌اند.

در تمامی اندازه‌گیری‌ها، دوربین پرسرعت سونی، با یک حسگر حساس به نور به همراه لنز ماکرو با فاصله کانونی 100 میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت. تصویربرداری از صفحه نورانی با کیفیت 2048×1080 پیکسل و سرعت $239/76$ فریم در ثانیه و در حالت خام انجام شد. برای روشن کردن صفحه برداشت از یک لیزر از نوع حالت جامد با موج پیوسته استفاده شد. این لیزر دارای توان قابل تنظیم تا حداکثر $2/15$ وات بوده و نور سبزرنگ با طول موج 532 نانومتر را از طریق یک عدسی با زاویه رأس 45 درجه پرتاب می‌کند. ذرات الک‌شده پلی‌اولایت (Pliolite) با اندازه 300 تا 600 میکرومتر و چگالی $1/03$ گرم در سانتی‌متر مکعب به‌عنوان مواد ردیاب در آب استفاده شد. این نوع ذرات توسط پژوهشگران دیگر مانند ژانگ و نف نیز در روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات به‌کار رفته است [15] برای به‌دست‌آوردن توزیع همگن از مواد ردیاب در محل برداشت، مقدار مشخصی از مواد ردیاب در مخزن کانال ریخته شد که پس از آغاز به‌کار سیستم پمپاژ، این ذرات به صورت گردشی در کل مجموعه مخزن و کانال حرکت می‌کنند. تراکم ذرات در کانال به‌گونه‌ای تنظیم شد که حدود 50 تا 60 درصد صفحه از نقاط ردیاب تشکیل شود [16]. پردازش و تحلیل تصاویر با استفاده از نرم‌افزار PIV Lab انجام شد [17]. فاصله بردارهای سرعت به‌دست‌آمده در هر یک از صفحه‌های اندازه‌گیری حدود 1 میلی‌متر بوده است. زمان و فرکانس نمونه‌برداری به‌ترتیب حدود 80 ثانیه و 240 هرتز در نظر گرفته شد. بر اساس پژوهش‌های دیگر پژوهشگران زمان و فرکانس نمونه‌برداری مذکور برای عدم تغییر مقادیر متوسط سرعت و تنش‌های رینولدز و اندازه‌گیری سرعت جریان کافی می‌باشد [18, 19].

به منظور بررسی اثر تداخلی سرعت‌سنج صوتی، اندازه‌گیری میدان جریان در حالت حضور سرعت‌سنج صوتی جانب‌نگر در جریان توسط سرعت‌سنج تصویری ذرات انجام گرفت. محل قرارگیری دستگاه سرعت‌سنج صوتی دایره جانب‌نگر در فاصله 5 سانتی‌متری از کف کانال و به فاصله 5 سانتی‌متری از صفحه اندازه‌گیری قائم در نظر گرفته شده است (شکل ۲). محل استقرار سرعت‌سنج صوتی به‌گونه‌ای تنظیم شده است که حجم نمونه‌گیری این دستگاه تقریباً در وسط هر دو صفحه برداشت افقی و عمودی توسط دستگاه سرعت‌سنج تصویری ذرات قرار گیرد. به‌عبارت دیگر هر دو صفحه برداشت افقی و عمودی، حجم نمونه‌گیری دستگاه سرعت‌سنج صوتی را قطع کرده و دستگاه سرعت‌سنج تصویری ذرات، سرعت جریان در آن نقطه را برداشت می‌کند.

لازم به ذکر است که در برداشت میدان جریان با سرعت‌سنج تصویری ذرات در حضور سرعت‌سنج صوتی، به‌دلیل اغتشاش ناشی از برخورد جریان با دستگاه سرعت‌سنج صوتی جانب‌نگر در سطح آب و انعکاس نور لیزر، کیفیت تصاویر برداشت‌شده نامناسب بود. برای برطرف کردن این مشکل، یک صفحه شیشه‌ای مماس بر سطح آب قرار داده شد (شکل ۳). هرچند حضور این صفحه اثر جزئی در سطح جریان دارد ولی در لایه‌های زیرین جریان، تاثیرگذار نمی‌باشد. استفاده از این روش در دیگر مطالعات آزمایشگاهی نیز گزارش شده است [20].

با توجه به عدم تغییر مقادیر سرعت طولی در راستای طول کانال X ، می‌توان از این مقادیر در راستای X متوسط‌گیری نموده و پروفیل قائم سرعت طولی را در دو حالت حضور و عدم حضور سرعت‌سنج صوتی رسم نمود. پروفیل قائم سرعت طولی در نمودار ۲ نمایش داده شده است. در این نمودار محل حجم نمونه‌گیری ($y/h = 0.5$) با خط چین نشان داده شده است. مقایسه دو نمودار در نمودار ۲ نشان می‌دهد که اثر تداخلی سرعت‌سنج صوتی در اندازه‌گیری سرعت طولی با فاصله‌گرفتن از بستر بیشتر شده و در سطح جریان به حداکثر مقدار خود می‌رسد. دلیل این امر حضور بازوی نگه‌دارنده سرعت‌سنج صوتی در داخل جریان می‌باشد.

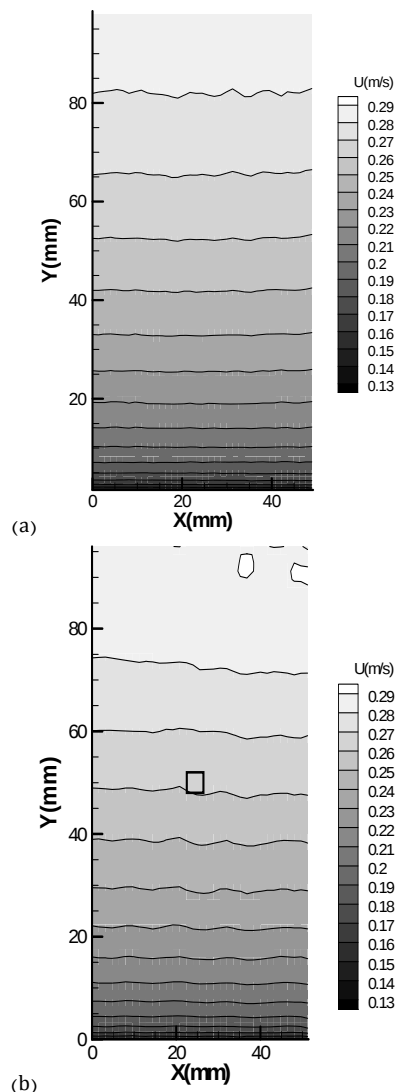


نمودار ۲) پروفیل قائم سرعت طولی

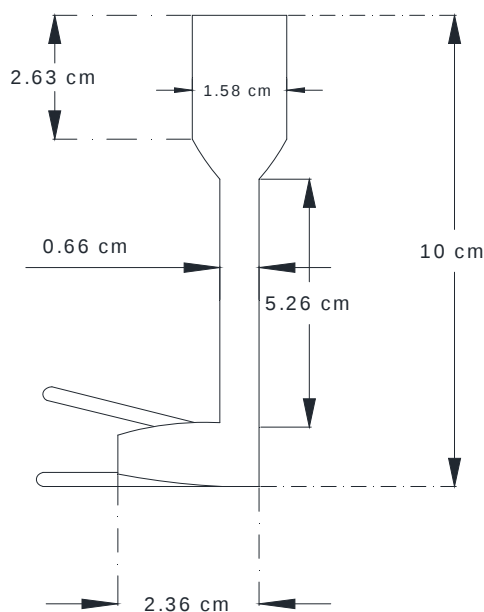
نمودارهای ۳-ا و ۳-ب نشان‌دهنده سرعت متوسط طولی در صفحه افقی با حضور فیزیکی سرعت‌سنج صوتی جانب‌نگر و بدون آن می‌باشند. حجم نمونه‌گیری دستگاه سرعت‌سنج صوتی (محل برداشت این دستگاه) و محل قرارگیری دستگاه به ترتیب با نمادهای مربع و سه‌شاخه در نمودار ۳-ب نشان داده شده است.

با توجه به نمودار ۳-ا می‌توان دریافت که توزیع سرعت طولی در عرض تقریباً یکنواخت می‌باشد. این در حالی است که حضور فیزیکی سرعت‌سنج صوتی در جریان همان‌طور که انتظار می‌رفت باعث غیریکنواختی توزیع سرعت طولی در راستای عرض کانال می‌شود (نمودار ۳-ب). توزیع سرعت طولی در عرض کانال در نمودار ۳-ب نشان می‌دهد که همان‌طور که انتظار می‌رفت در اطراف دستگاه سرعت‌سنج صوتی، ناحیه‌ای پرسرعت شکل گرفته و با دور شدن از سرعت‌سنج صوتی از شدت سرعت طولی کاسته می‌شود. مقایسه کمی سرعت‌های طولی در محل حجم نمونه‌گیری دستگاه سرعت‌سنج صوتی در نمودارهای ۳-ا و ۳-ب نشان می‌دهد که مشابه صفحه قائم، حضور سرعت‌سنج صوتی جانب‌نگر باعث افزایش سرعت طولی به میزان ۱/۷ درصد در این ناحیه می‌شود. تشدید سرعت در این ناحیه نشان از اثر تداخلی دستگاه سرعت‌سنج صوتی در میدان جریان و اندازه‌گیری سرعتی بیشتر از سرعت واقعی جریان در حضور سرعت‌سنج در مقطع می‌باشد.

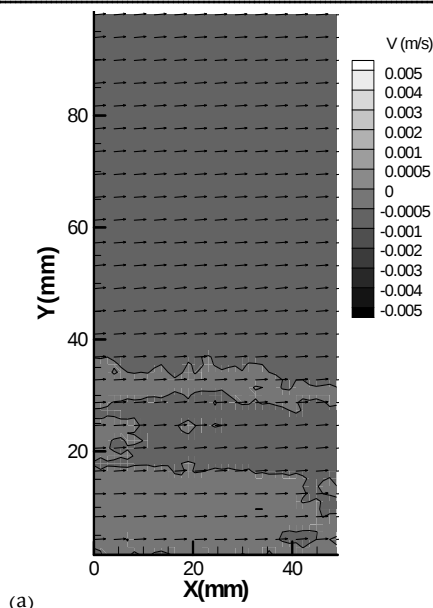
نمودارهای ۴-ا و ۴-ب نشان‌دهنده توزیع مقادیر مؤلفه قائم سرعت و بردارهای سرعت در صفحه برداشت قائم با حضور سرعت‌سنج صوتی جانب‌نگر و بدون آن می‌باشد. به منظور نمایش بهتر بردارهای سرعت، مقادیر سرعت در راستای قائم به اندازه ۲۵ برابر بزرگنمایی شده است. محل حجم نمونه‌گیری دستگاه سرعت‌سنج صوتی با استفاده از نماد مربع در نمودار ۴-ب نمایش داده شده است. بررسی دقیق‌تر نمودارهای ۴-ا و ۴-ب نشان می‌دهد که در محدوده حجم



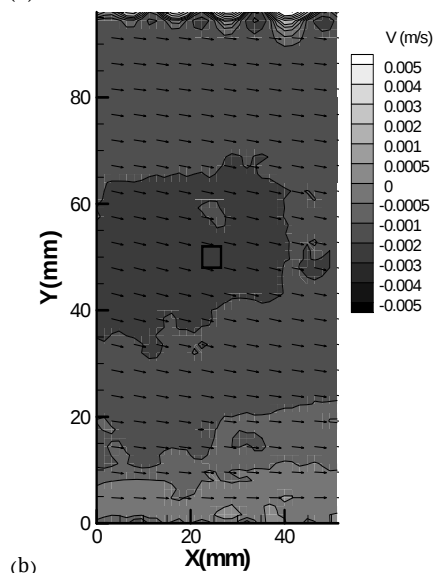
نمودار ۱) سرعت طولی جریان در (a) صفحه قائم بدون حضور فیزیکی ADV، (b) صفحه قائم با حضور فیزیکی ADV (جهت جریان از راست به چپ می‌باشد)



شکل ۴) سطح مقطع مقابل جریان سرعت‌سنج صوتی جانب‌نگر



(a)



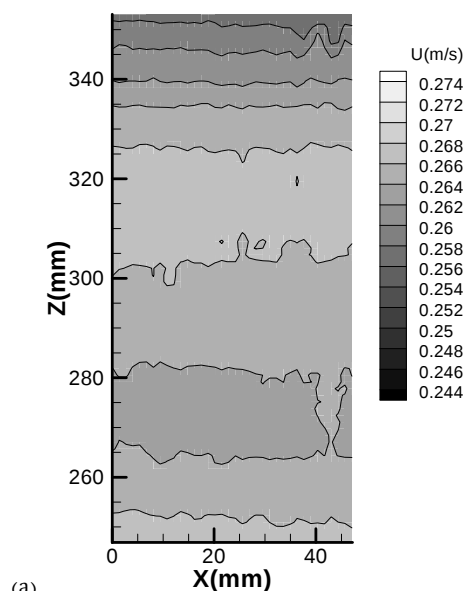
(b)

نمودار ۴) سرعت قائم جریان و بردارهای سرعت در (a) صفحه قائم بدون حضور ADV، (b) صفحه قائم با حضور ADV، (جهت جریان از چپ به راست می‌باشد).

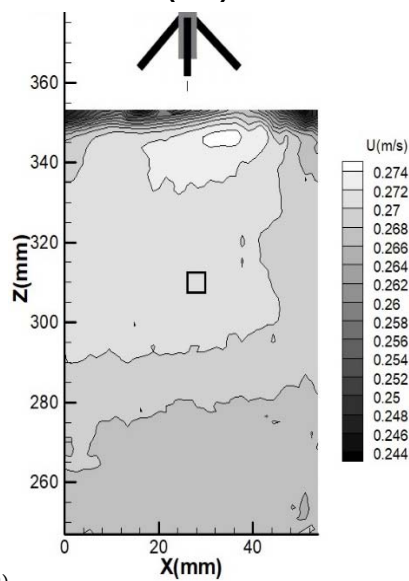
با توجه به نمودار ۵- a توزیع مؤلفه عرضی سرعت در عرض کانال یکنواخت می‌باشد. در حالی که حضور فیزیکی سرعت سنج صوتی در داخل جریان باعث ایجاد غیریکنواختی در سرعت عرضی در محدوده حجم کنترل دستگاه سرعت سنج صوتی می‌گردد (نمودار ۵- b)؛ به طوری که منحنی‌های هم‌سرعت نشان داده شده در نمودار ۵- b نشان از انحراف شدید جریان در بالادست و پایین‌دست محل قرارگیری سرعت سنج صوتی دارد. همان‌طور که در این نمودار مشاهده می‌شود سرعت عرضی در بالادست و پایین‌دست سرعت سنج صوتی تغییر علامت می‌دهد که این پدیده به واسطه تغییر جهت خطوط جریان هنگام عبور از اطراف یک مانع مانند پایه پل است [22]. مقایسه کمی نمودارهای مذکور نشان می‌دهد که مقادیر سرعت‌های عرضی در حالت حضور سرعت سنج صوتی جانب‌نگر در محل حجم کنترل آن ۴/۵ برابر کوچکتر از حالت عدم حضور آن است. این امر نشان از اثر تداخلی شدید سرعت سنج صوتی در سرعت عرضی دارد. علاوه بر این، جهت بردارهای سرعت در نمودار ۵- a نمایان‌گر وجود جریان عرضی از سمت سیلاب‌دشت به سمت کانال اصلی است. دلیل این سرعت عرضی وجود گردابه‌های موثر در کانال مرکب می‌باشد که

نمونه‌گیری، حضور سرعت سنج صوتی جانب‌نگر باعث افزایش سرعت قائم به میزان ۲/۷ برابر حالت بدون حضور سرعت سنج صوتی می‌شود که این امر نشان از اثر تداخلی شدید این سرعت سنج در سرعت قائم می‌باشد. با مقایسه نتایج نمودارهای ۳ و ۴ می‌توان به این نتیجه رسید که اثر تداخلی سرعت سنج صوتی در سرعت قائم به مراتب بیشتر از اثر تداخلی آن در سرعت طولی است. علاوه بر این، مقایسه بردارهای سرعت در نمودارهای ۴- a و ۴- b نمایان‌گر این واقعیت است که جهت بردارهای سرعت در محدوده حجم نمونه‌گیری به سمت بستر منحرف شده است. این امر نشان‌دهنده ایجاد تداخل در میدان جریان در محدوده حجم کنترل سرعت سنج صوتی در اثر حضور این ابزار می‌باشد. این حرکت روبه پایین جریان مشابه حرکت جریان از اطراف یک مانع می‌باشد [21].

نمودارهای ۵- a و ۵- b نشان‌دهنده توزیع سرعت عرضی جریان و بردارهای سرعت در صفحه افقی اندازه‌گیری در حالت حضور فیزیکی سرعت سنج صوتی و بدون آن می‌باشند. مشابه حالت قبلی برای نمایش بهتر بردارهای سرعت مقادیر سرعت عرضی ۲۵ برابر بزرگنمایی شده است.

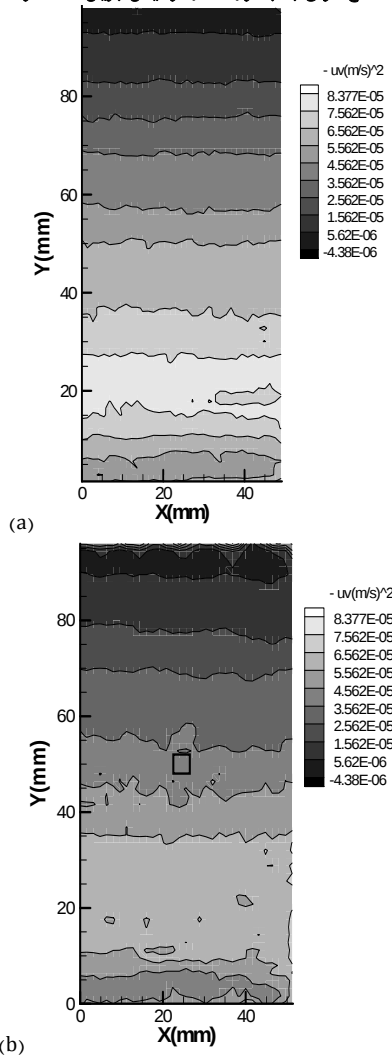


(a)



(b)

نمودار ۳) سرعت طولی جریان در (a) صفحه افقی بدون حضور فیزیکی ADV، (b) صفحه افقی با حضور فیزیکی ADV (جهت جریان از راست به چپ می‌باشد)



نمودار ۶ تنش برشی رینولدز $-\overline{u'v'}$ در (a) صفحه قائم بدون حضور ADV (b) صفحه قائم با حضور ADV (جهت جریان از چپ به راست می باشد)

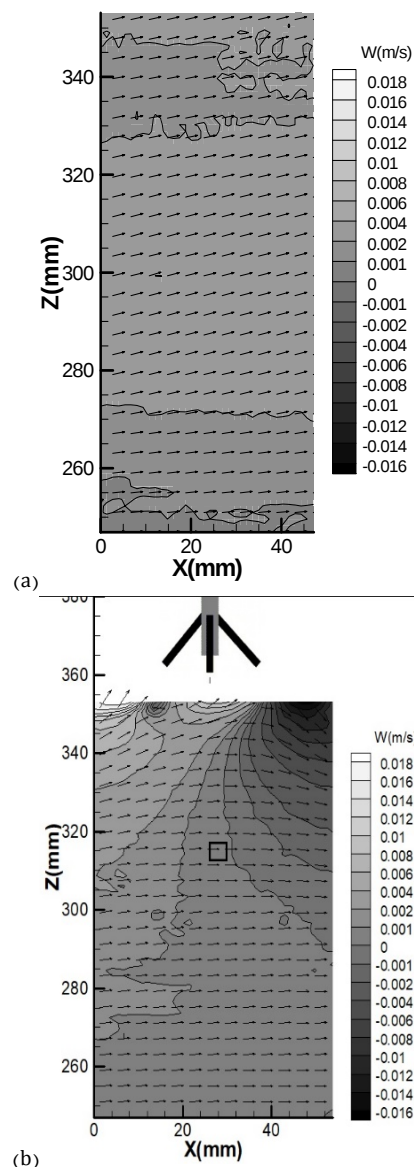
برای توضیح بیشتر لازم است به مفهوم ممان دوم نوسانات سرعت طولی و قائم $(-\overline{u'v'})$ که برابر با کوواریانس سرعت های لحظه ای در راستای طولی و قائم می باشد، پرداخته شود. کوواریانس دو متغیر تصادفی بیانگر اندازه تغییرات هماهنگ آن دو متغیر است. بدین معنی که با تغییرات ناهمگون دو متغیر مستقل، مقدار کوواریانس آن دو متغیر کاهش می یابد. از سوی دیگر حضور مانع در مقابل جریان باعث ایجاد ناهمگونی در مقادیر سرعت های لحظه ای طولی و قائم نسبت به حالت جریان بدون مانع می شود. بنابراین انتظار می رود که با حضور دستگاه سرعت سنج صوتی مقدار کوواریانس سرعت های لحظه ای طولی و قائم یا به عبارت دیگر مقدار $-\overline{u'v'}$ کاهش یابد. با توجه به عدم تغییر قابل توجه مقادیر $-\overline{u'v'}$ در راستای طولی کانال X ، می توان از این مقادیر در راستای X متوسط گیری نموده و مقادیر تنش برشی رینولدز را در دو حالت حضور و عدم حضور سرعت سنج صوتی مقایسه نمود.

در نمودار ۷ نمودار مقادیر تنش برشی رینولدز با استفاده از سرعت برشی کف (حاصل از برون یابی مقادیر تنش برشی رینولدز روش سرعت سنجی تصویری ذرات تا کف) بی بعد شده اند. در این نمودار محل حجم نمونه گیری $(y/h = 0.5)$ با خط چین نشان داده شده است. نمودار ۷ نمایانگر این واقعیت است که مقادیر تنش برشی رینولدز در نواحی سطح جریان در دو حالت حضور و عدم حضور

توسط محققین قبلی گزارش شده است [23]. این در حالی است که در نمودار ۵-b در اثر حضور سرعت سنج صوتی، میزان انحراف بردارهای سرعت از سیلاب دشت به کانال اصلی و در نتیجه مقدار سرعت عرضی جریان کاهش پیدا کرده است. دلیل این امر تشکیل جدایش جریان در اطراف پایه نگه دارنده سرعت سنج صوتی می باشد که به نظر می رسد این جدایی جریان تا محدوده حجم نمونه گیری سرعت سنج صوتی اثرگذار می باشد.

به جهت اهمیت تنش برشی رینولدز در ساختار جریان و انتقال رسوب، در نمودار ۶ مقادیر $-\overline{u'v'}$ در دو حالت با حضور و عدم حضور سرعت سنج صوتی ارائه شده است.

نمودارهای ۶-a و ۶-b نشان می دهند که با فاصله گرفتن از سطح جریان و نزدیک شدن به کف، حضور سرعت سنج صوتی باعث کاهش مقدار تنش برشی رینولدز شده است که این تغییرات در فاصله ۲۵ میلی متری از کف به حداکثر مقدار خود می رسد. بررسی دقیق تر مقادیر نشان می دهند که حضور سرعت سنج صوتی باعث کاهش ۳۰ درصدی مقادیر تنش برشی رینولدز نسبت به حالت عدم حضور سرعت سنج صوتی در محدوده حجم نمونه گیری شده است.



نمودار ۷ سرعت عرضی جریان در (a) صفحه افقی بدون حضور فیزیکی ADV و (b) صفحه افقی با حضور فیزیکی ADV (جهت جریان از چپ به راست می باشد)

با مقایسه نمودارهای $a-8$ و $b-8$ می‌توان دریافت که میزان تغییرات شدت آشفتگی قائم در اثر حضور سرعت‌سنج صوتی در جریان بسیار کمتر از شدت آشفتگی طولی است و مقادیر شدت آشفتگی قائم در حالت حضور سرعت‌سنج صوتی تقریباً برابر با حالت عدم حضور آن است. همان‌طور که پیش‌تر نیز بحث شد حضور سرعت‌سنج صوتی در داخل جریان باعث تغییر در مقادیر سرعت متوسط طولی می‌شود (۱درصد)، در حالی که حضور این ابزار تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر شدت آشفتگی طولی دارد. به عبارت دیگر اثر تداخلی حضور سرعت‌سنج صوتی بر شدت آشفتگی طولی بیشتر از سرعت متوسط طولی است. در مقابل حضور سرعت‌سنج صوتی در داخل جریان به طور قابل توجهی سرعت متوسط قائم را تحت تأثیر قرار می‌دهد، در حالی‌که بر شدت آشفتگی قائم تأثیر زیادی ندارد.

همچنین در بررسی اندازه‌گیری‌های صورت گرفته در صفحه افقی مشاهده شد، شدت آشفتگی طولی در حالت حضور سرعت‌سنج صوتی در محدوده حجم نمونه‌گیری افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر حضور سرعت‌سنج صوتی در جریان موجب افزایش تلاطم و آشفتگی در راستای طولی در محدوده حجم نمونه‌گیری می‌شود. نکته قابل توجه دیگر این است که حضور سرعت‌سنج صوتی در داخل جریان به طور قابل توجهی سرعت متوسط عرضی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (نمودار ۵- b)، در حالی‌که بر شدت آشفتگی عرضی تأثیر زیادی ندارد.

۴- نتیجه‌گیری

دستگاه سرعت‌سنجی صوتی از متداول‌ترین ابزارهای اندازه‌گیری میدان جریان می‌باشد. مطالعه حاضر به بررسی آزمایشگاهی اثر تداخلی سرعت‌سنج صوتی جانب‌نگر ناشی از حضور فیزیکی این ابزار داخل جریان در منطقه دشت سیلابی یک کانال مرکب می‌پردازد. در این مطالعه میدان جریان در دو حالت حضور فیزیکی سرعت‌سنج صوتی و بدون حضور این ابزار با استفاده از سرعت‌سنج تصویری ذرات که ابزاری غیرتداخلی می‌باشد برداشت گردید. نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

- حضور سرعت‌سنج صوتی جانب‌نگر در محدوده حجم نمونه‌گیری اثر تداخلی داشته که این اثر در اندازه‌گیری سرعت‌های ثانویه شدیدتر از سرعت طولی جریان می‌باشد.

- سرعت طولی جریان در محدوده حجم نمونه‌گیری به دلیل تنگ‌شدگی ایجادشده در اثر حضور سرعت‌سنج صوتی نسبت به عدم حضور این ابزار حدود ۱/۷ درصد بیشتر است.

- شدت آشفتگی طولی در محدوده حجم نمونه‌گیری در حالت حضور سرعت‌سنج صوتی بیشتر از حالت عدم حضور آن است، در حالی که میزان تغییرات شدت آشفتگی قائم و عرضی در محدوده حجم نمونه‌گیری در اثر حضور سرعت‌سنج صوتی در جریان ناچیز است.

- حضور سرعت‌سنج صوتی باعث کاهش ۳۰ درصدی مقادیر تنش برشی رینولدز $-u'v'$ در محدوده حجم نمونه‌گیری شده است.

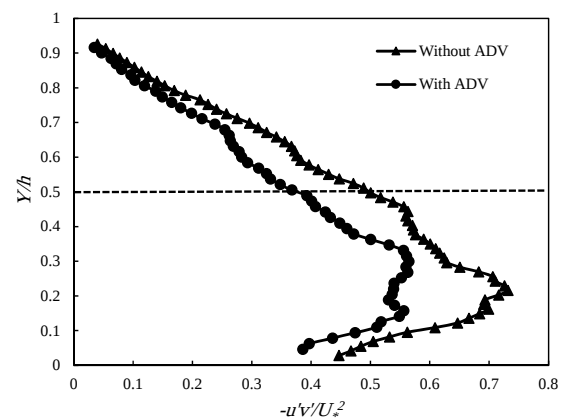
تشکر و قدردانی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشد.

تاییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری (به صورت کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده است. همچنین برای بررسی و چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است. ضمناً محتویات علمی مقاله حاصل فعالیت علمی نویسندگان بوده است و صحت و اعتبار نتایج بر عهده نویسندگان می‌باشد.

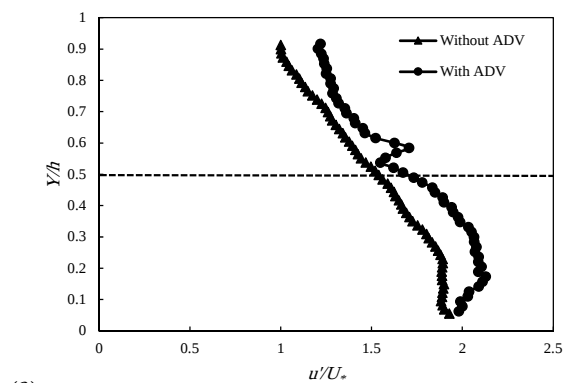
تعارض منافع: مقاله حاضر هیچ‌گونه تعارض منافی با سازمان‌ها و

دستگاه سرعت‌سنج صوتی به یکدیگر نزدیک بوده و با فاصله از سطح جریان، حضور سرعت‌سنج صوتی اثر تداخلی در برآورد تنش برشی ایجاد می‌کند. این اثر تداخلی سرعت‌سنج صوتی در ترازهای حدود ۲۵ درصد عمق جریان به حداکثر مقدار خود رسیده و باعث کاهش مقادیر تنش برشی رینولدز به میزان ۳۰ درصد در محدوده حجم نمونه‌گیری نسبت به حالت عدم حضور می‌شود.

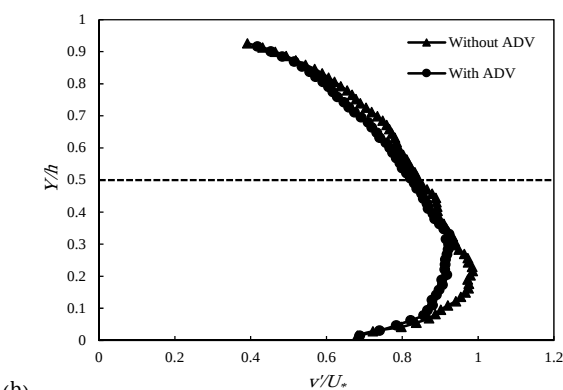
به طور مشابه نمودار مقادیر شدت آشفتگی طولی و قائم در راستای قائم در نمودار ۸ ترسیم شده است. مقایسه مقادیر شدت آشفتگی طولی (نمودار ۸- a) نشان می‌دهد که شدت آشفتگی طولی در حالت حضور سرعت‌سنج صوتی بیشتر از حالت عدم حضور سرعت‌سنج صوتی است. به عبارت دیگر حضور سرعت‌سنج صوتی در جریان موجب افزایش تلاطم و آشفتگی در راستای طولی می‌شود.



نمودار ۷) تنش برشی رینولدز $-u'v'$ در راستای قائم در دو حالت با حضور ADV و بدون حضور آن



(a)



(b)

نمودار ۸) (a) شدت آشفتگی طولی و (b) شدت آشفتگی قائم در راستای قائم در دو حالت با حضور ADV و بدون حضور آن

Experimental study on flow pattern and scour hole dimensions around a T-shaped spur dike in a channel bend under emerged and submerged conditions. International Journal of Civil Engineering. 2017;15(7):1019-1034.

11- Rusello P, Lohrmann A, Siegel E, Maddux T. Improvements in Acoustic Doppler Velocimetry. The 7th International Conference on Hydrosience and Engineering (ICHE-2006); 2006 September 10-13; Philadelphia, USA.

12- Nabipour M, Salehi Neyshabouri SAA, Sadeghi Dodaran R, Mohajeri SH, Zarrati AR, Zabetian M. Experimental study of side looking ADV probe accuracy in a turbulent flow field. Modares Mechanical Engineering. 2018;18(1):406-412. [Persian]

13- Nabipour M, Salehi Neyshabouri SAA, Mohajeri SH, Zarrati AR, Zabetian M. Study on turbulent flow in a compound channel with shallow overbank using Particle Image Velocimetry. Modares Mechanical Engineering. 2017;17(8):164-172. [Persian]

14- Nakagawa H, Nezu I. Turbulence in open-channel flows. Rotterdam: Balkema; 1993.

15- Zhang X, Nepf HM. Exchange flow between open water and floating vegetation. Environmental Fluid Mechanics. 2011;11(5):531-546.

16- Raffel M, Willert C, Wereley S, Kompenhans J. Particle image velocimetry, a practical guide. 2nd Edition. Berlin: Springer; 2007.

17- Thielicke W, Stamhuis E. PIVlab-towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in MATLAB. Journal of Open Research Software. 2014;2(1):e30.

18- Okamoto T, Nezu I, Sanjou M. Flow-vegetation interactions: length-scale of the "monami" phenomenon. Journal of Hydraulic Research. 2016;54(3):251-262.

19- Shiono K, Feng T. Turbulence measurements of dye concentration and effects of secondary flow on distribution in open channel flows. Journal of Hydraulic Engineering. 2003;129(5):373-384.

20- Mohajeri SH, Grizzi S, Righetti M, Romano GP, Nikora V. The structure of gravel bed flow with intermediate submergence: a laboratory study. Water Resources Research. 2015;51(11):9232-9255.

21- Ahmed F, Rajaratnam N. Flow around bridge piers. Journal of Hydraulic Engineering. 1998;124(3):288-300.

22- Dargahi B. The turbulent flow field around a circular cylinder. Experiments in Fluids. 1989;8(1-2):1-12.

23- Kara S, Stoesser T, Sturm TW. Turbulence statistics in compound channels with deep and shallow overbank flows. Journal of Hydraulic Research. 2012;50(5):482-493.

اشخاص دیگر ندارد.

سهم نویسندگان: رضا صادقی دودران (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/ پژوهشگر اصلی/تحلیلگر/نگارنده بحث (۳۵٪)؛ سیدعلی اکبر صالحی نیشابوری (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی/تحلیلگر (۱۰٪)؛ مصطفی نبی پور (نویسنده سوم)، پژوهشگر اصلی/تحلیلگر/نگارنده بحث (۳۵٪)؛ سیدحسین مهاجری (نویسنده چهارم)، پژوهشگر اصلی/تحلیلگر (۱۰٪)؛ امیررضا زراتی (نویسنده پنجم)، پژوهشگر کمکی/تحلیلگر (۱۰٪)

منابع مالی: این پژوهش توسط دانشگاه تربیت مدرس حمایت مالی شده است.

منابع

- 1- Chanson H. Turbulence in positive surges and tidal bores. Effects of bed roughness and adverse bed slopes. Hydraulic Model Report series CH. Brisbane, Australia: The University of Queensland; 2008 Jun 1. Report No. CH68/08.
- 2- C Koch C, Chanson H. An experimental study of tidal bores and positive surges: hydrodynamics and turbulence of the bore front. Brisbane, Australia: Department of Civil Engineering, University of Queensland; 2005.
- 3- Kraus NC, Lohrmann A, Cabrera R. New Acoustic meter for measuring 3D laboratory flows. Journal of Hydraulic Engineering. 1994;120(3):406-412.
- 4- Wahl TL. Discussion of despiking acoustic doppler velocimeter data. Journal of Hydraulic Engineering. 2003;129(6):484-487.
- 5- Parsheh M, Sotiropoulos F, Agel P. Estimation of power spectra of acoustic-doppler velocimetry data contaminated with intermittent spikes. Journal of Hydraulic Engineering. 2010;136(6):368-378.
- 6- Chickadel CC, Talke SA, Devine ARH, Jessup AT. Infrared-based measurements of velocity, turbulent kinetic energy, and dissipation at the water surface in a tidal river. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2011;8(5):849-853.
- 7- Fox JF, Belcher BJ. Comparison of macroturbulence measured using decomposition of PIV, ADV and LSPIV data. Journal of Hydraulic Research. 2011;49(1):122-126.
- 8- Ruonan B, Liekai C, Xingkui W, Danxun L. Comparison of ADV and PIV measurements in open channel flows. Procedia Engineering. 2016;154:995-1001.
- 9- Hamidifar H, Omid MH, Keshavarzi A. Mean flow and turbulence in compound channels with vegetated floodplains. Journal of Agricultural Engineering Research. 2013;14(3):51-66. [Persian]
- 10- Mehraein M, Ghodsian M, Mashizi M, Vaghefi M.