



## بررسی آزمایشگاهی دقت سرعت سنج صوتی جانب نگر در میدان جریان آشفته

مصطفی نبی پور<sup>1</sup>، سید علی اکبر صالحی نیشابوری<sup>2\*</sup>، رضا صادقی دودران<sup>3</sup>، امیر رضا زراتی<sup>4</sup>، سید حسین مهاجری<sup>5</sup>، محمد ضابطیان طرقي<sup>6</sup>

1- دانشجوی دکتری، مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران  
 2- استاد، مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران  
 3- دانشجوی دکتری، مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران  
 4- استاد، مهندسی عمران، دانشگاه امیرکبیر، تهران  
 5- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه بین المللی امام خمینی، قزوین  
 6- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران  
 \* تهران، صندوق پستی 14115116، salehi@modares.ac.ir

### چکیده

یکی از روش‌های متداول در اندازه‌گیری میدان جریان در کانال‌های باز استفاده از دستگاه سرعت‌سنج صوتی داپلر می‌باشد. حضور فیزیکی حسگرها و بدنه دستگاه سرعت‌سنج صوتی در داخل جریان سبب تغییر در الگو و ساختارهای آشفتگی جریان می‌شود. بنابراین خطای دستگاه سرعت‌سنج صوتی داپلر از دو عامل خطای ذاتی دستگاه و حضور فیزیکی بدنه و حسگرهای دستگاه در داخل جریان ناشی می‌شود. برای مطالعه این موضوع، در این مقاله میدان جریان با استفاده از ابزار سرعت‌سنجی تصویری ذرات و دستگاه سرعت‌سنج صوتی جانب‌نگر اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که در اندازه‌گیری سرعت طولی، نتایج هر دو ابزار به یکدیگر نزدیک بوده و به‌طور متوسط 5 درصد اختلاف دارند، در حالی که سرعت‌های قائم و عرضی دارای تفاوت قابل توجهی با یکدیگر می‌باشند. همچنین مقایسه مقادیر شدت آشفتگی طولی و عرضی و تنش برشی رینولدز نشان می‌دهد که اختلاف مقادیر در نزدیکی سطح آب کمتر و با نزدیک شدن به بستر افزایش می‌یابد.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
 دریافت: 03 آبان 1396  
 پذیرش: 04 دی 1396  
 ارائه در سایت: 29 دی 1396  
 کلید واژگان:  
 سرعت‌سنج صوتی جانب‌نگر  
 سرعت‌سنج تصویری ذرات  
 الگوی جریان  
 پارامترهای آشفتگی

## Experimental study of side looking ADV probe accuracy in a turbulent flow field

Mostafa Nabipour<sup>1</sup>, Seyed Ali Akbar Salehi Neyshabouri<sup>1\*</sup>, Reza Sadeghi Dodaran<sup>1</sup>, Amir Reza Zarrati<sup>2</sup>, Seyed Hossein Mohajeri<sup>3</sup>, Mohammad Zabetian Toroghi<sup>4</sup>

1-Department of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran  
 2- Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran  
 3- Department of Civil Engineering, Emam Khomeini International University, Ghazvin, Iran  
 4- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran  
 \* P.O.B. 14115116 Tehran, Iran, salehi@modares.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
 Received 25 October 2017  
 Accepted 25 December 2017  
 Available Online 19 January 2018

#### Keywords:

Side looking Acoustic Doppler Velocimeter  
 Particle Image Velocimetry  
 Flow pattern  
 Turbulence parameters

### ABSTRACT

One of the usual and useful techniques for the flow field measurement in open channels is Acoustic Doppler Velocimeter (ADV). Physical presence of ADV probe and its holding system against flow disturb natural flow pattern which can change turbulent flow structure. Thus, the error of the Acoustic Doppler Velocimeter is consist of its intrinsic error and the physical presence of ADV against flow. To study this issue in this paper, flow field in an open-channel is measured using Particle Image Velocimetry (PIV) technique and side-looking ADV probe. The results show that streamwise velocity obtained from both methods are in good agreement and on average, there is 5 percent difference, while vertical and lateral components of velocity are considerably different. Also, comparison of streamwise and lateral turbulence intensities and the Reynolds shear stress shows lower differences for measured points near the water surface and the differences increase approaching to the bed.

### 1- مقدمه

جریان در محیط‌های مختلف می‌باشند [1]، اما هنوز پیش‌بینی میدان جریان در موقعیت‌های پیچیده و شرایط سه بعدی با استفاده از این ابزارها از دقت کافی برخوردار نبوده و با مدل‌سازی عددی امکان‌پذیر نیست [2]. از سوی دیگر در بررسی‌های میدانی و آزمایشگاهی اغلب نیاز به کنترل و بررسی جریان به کمک تجهیزات اندازه‌گیری می‌باشد. بنابراین اندازه‌گیری جریان در مطالعات آزمایشگاهی و میدانی از اهمیت بالایی برخوردار بوده و داده‌های با

به‌طور کلی شناخت یک پدیده هیدرولیکی و کشف زوایای مختلف آن از سه روش بررسی میدانی، مطالعه آزمایشگاهی و یا شبیه‌سازی عددی آن پدیده صورت می‌گیرد. هرچند امروزه شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از مدل‌های هیدرولیک محاسباتی<sup>1</sup>، یکی از پرکاربردترین ابزارها برای شناخت میدان

<sup>1</sup> Computational Fluid Dynamics (CFD)

### Please cite this article using:

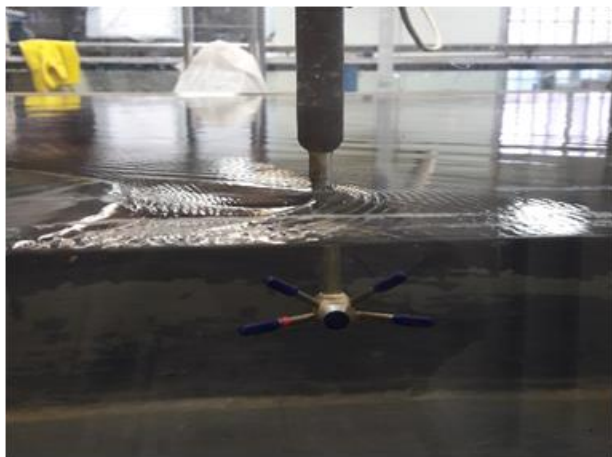
M. Nabipour, S. A. A. Salehi Neyshabouri, R. Sadeghi Dodaran, A. R. Zarrati, S. H. Mohajeri, M. Zabetian Toroghi, Experimental study of side looking ADV probe accuracy in a turbulent flow field, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 01, pp. 406-412, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

تجاوز نماید، دوم اینکه شدت‌های آشفته‌گی زیاد باشند و سوم اینکه محل اندازه‌گیری سرعت در نزدیکی مرزهای صلب (دیواره‌ها) باشد. در نزدیکی دیواره به علت انعکاس گروهی از امواج صوتی توسط مرز صلب، اندازه‌گیری سرعت سیال با مشکل مواجه می‌شود [12]. روان و همکاران به مقایسه کمی تنش‌های رینولدز در کانال باز حاصل از روش‌های سرعت‌سنجی تصویری ذرات<sup>10</sup> و سرعت‌سنج صوتی پروفایلر<sup>11</sup> پایین‌نگر پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که مقادیر اندازه‌گیری شده بوسیله دو دستگاه دارای اختلاف بوده و اندازه‌گیری پارامترهای آشفته‌گی با دستگاه سرعت‌سنج صوتی داپلر نیازمند ارزیابی دقیق می‌باشد [13]. البته ایشان در خصوص دقت دستگاه سرعت‌سنج صوتی داپلر در اندازه‌گیری جریان‌های ثانویه اظهار نظر نکرده‌اند.

علاوه بر خطای ذاتی دستگاه سرعت‌سنج صوتی داپلر، حضور حسگرهای دستگاه در داخل جریان به صورت یک مانع عمل نموده و موجب تغییر الگوی جریان و بروز خطا می‌شود (شکل 1). برای کاهش اثر تداخلی شاخک‌های دستگاه سرعت‌سنج صوتی، نسل جدید حسگرها طراحی و به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. 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 [14]. به همین منظور در تحقیق حاضر نیز از شاخک‌های نسل جدید سرعت‌سنج صوتی داپلر استفاده گردید.

علی‌رغم استفاده گسترده از دستگاه سرعت‌سنجی صوتی داپلر در مطالعات آزمایشگاهی، تاکنون مطالعه جامعی در مورد بررسی دقت دستگاه سرعت‌سنج صوتی با تکنیک‌های اندازه‌گیری تصویری میدان جریان انجام نشده است. بنابراین لزوم تحقیقات بیشتر بر روی اثر دستگاه سرعت‌سنج صوتی داپلر در الگوی جریان و ساختار آشفته‌گی در محدوده اندازه‌گیری دستگاه ضروری به نظر می‌رسد. بدین منظور در این تحقیق میدان جریان با استفاده از ابزار سرعت‌سنج تصویری ذرات (در محدوده حجم نمونه‌گیری) و دستگاه سرعت‌سنج صوتی داپلر جانب‌نگر اندازه‌گیری و مورد بررسی قرار



**Fig. 1** A view of the interference of the acoustic doppler velocimetry in the flow during the measurement of velocity (flow direction from right to left)

**شکل 1** نمایی از ایجاد تداخل دستگاه سرعت‌سنج صوتی داپلر جانب‌نگر در جریان هنگام اندازه‌گیری سرعت (جهت جریان از راست به چپ می‌باشد).

کیفیت بالا، نقش اساسی در فهم پدیده‌های هیدرولیکی و توسعه و صحت‌سنجی مدل‌های عددی دارند [3].

از جمله روش‌های پرکاربرد اندازه‌گیری میدان جریان در کانال‌های باز استفاده از دستگاه سرعت‌سنج صوتی داپلر<sup>1</sup> می‌باشد. دستگاه سرعت‌سنج صوتی داپلر با توجه به جهت قرارگیری حسگر به دو نوع پایین‌نگر<sup>2</sup> و جانب‌نگر<sup>3</sup> تقسیم می‌شود. این دستگاه برای اولین بار در سال 1993 توسط شرکت سونتک<sup>4</sup> ارائه شده و به طور گسترده برای اندازه‌گیری مولفه‌های سه‌بعدی جریان آشفته مورد استفاده قرار گرفته است [4]. نسل جدید این سرعت‌سنج‌ها از طریق ارسال امواج صوتی<sup>5</sup> با فرکانس 1 تا 200 هرتز از یک فرستنده به سمت یک حجم نمونه‌گیری<sup>6</sup> (به شکل استوانه به قطر 6 میلی‌متر و ارتفاع 3 میلی‌متر که در فاصله 5 سانتی‌متری فرستنده واقع شده است) و دریافت امواج برگشتی توسط سه یا چهار شاخک گیرنده، سرعت ذرات داخل حجم نمونه‌گیری را اندازه‌گیری می‌کند. اساس عملکرد این ابزار، پدیده داپلر شیفت (تغییر فرکانس امواج رفت و برگشتی به واسطه برخورد با ذرات داخل حجم نمونه‌گیری) می‌باشد. در این روش فرض بر آن است که ذرات داخل حجم نمونه‌گیری با سرعت جریان حرکت می‌کنند. لازم به ذکر است که با توجه به اساس عملکرد دستگاه، سنسور فرستنده و همچنین شاخک‌های گیرنده بایستی همواره در جریان مستغرق باشند [5].

مطالعات گذشته حاکی از آن است که دستگاه سرعت‌سنج صوتی دارای دقت مناسب در اندازه‌گیری سرعت میانگین بوده، در حالی که این دستگاه در اندازه‌گیری پارامترهای آشفته‌گی از جمله تنش‌های رینولدز و انرژی جنبشی آشفته‌گی از دقت کافی برخوردار نیست [7,6]. دو منشا اصلی داده‌های نادرست در دستگاه سرعت‌سنج صوتی داپلر، ناشی از پدیده داپلر نویز<sup>7</sup> و پدیده هم‌انرژی سیگنال<sup>8</sup> می‌باشند [8]. لوه‌رم و همکاران برای بررسی میزان کارآمدی دستگاه سرعت‌سنج صوتی داپلر در اقیانوس‌ها، به مقایسه این دستگاه با دستگاه سرعت‌سنج لیزری داپلر<sup>9</sup> در فلوام آزمایشگاهی پرداختند. نتایج این پژوهشگران نشان داد که در محدوده سرعت‌های بالا (5 تا 80 سانتی‌متر در ثانیه) مطابقت خوبی بین تنش‌های رینولدز اندازه‌گیری شده با دستگاه سرعت‌سنج صوتی داپلر و دستگاه سرعت‌سنج لیزری داپلر وجود دارد، هر چند این تطابق در سرعت‌های پایین (کمتر از 10 سانتی‌متر در ثانیه) کمتر است [9]. اما ایشان در خصوص جریان‌های متوسط ثانویه (سرعت متوسط قائم و عرضی) و شدت‌های آشفته‌گی اظهار نظر نکردند. نیکورا و گورینگ به منظور بررسی دقت دستگاه سرعت‌سنج صوتی داپلر در محیط‌های متفاوت، آزمایش‌هایی در سه شرایط مختلف (در حوضچه ذخیره آب حاوی سیلت، در فلوام آزمایشگاهی حاوی ذرات معلق و در آب طبیعی حاوی حباب‌های هوا) انجام دادند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که پدیده داپلر نویز می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر روی مشخصه‌های آشفته‌گی داشته باشند [10]. همچنین گورینگ و نیکورا به بررسی اثر پدیده هم‌انرژی سیگنال بر روی داده‌های حاصل از دستگاه سرعت‌سنج صوتی داپلر پرداختند [11]. احتمال رخداد این خطا در دستگاه سرعت‌سنجی صوتی داپلر در سه حالت بیشتر است: اول اینکه سرعت جریان از محدوده سرعت مجاز دستگاه

<sup>1</sup> Acoustic Doppler Velocimetry (ADV)

<sup>2</sup> Down Looking

<sup>3</sup> Side Looking

<sup>4</sup> Sontek

<sup>5</sup> Acoustic

<sup>6</sup> Sample Volume

<sup>7</sup> Doppler Noise

<sup>8</sup> Aliasing of Signal

<sup>9</sup> Laser Doppler Velocimetry

<sup>10</sup> Particle Image Velocimetry

<sup>11</sup> ADV Profiler Velocimeter

گرفت. تصویربرداری از صفحه نورانی با کیفیت 2048×1080 پیکسل و سرعت 239.76 فریم در ثانیه و در حالت خام<sup>1</sup> انجام شد. برای روشن کردن صفحه برداشت از یک لیزر از نوع حالت جامد<sup>2</sup> با موج پیوسته استفاده شد. این لیزر دارای توان حداکثر 2.15 وات بوده و نور سبزرنگ با طول موج 532 نانومتر را از طریق یک عدسی با زاویه راس 45 درجه پرتاب می‌کند. ذرات الک‌شده پلاپولایت<sup>3</sup> 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 [17]. برای به‌دست آوردن 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 به‌صورت گردشی در کل مجموعه مخزن و کانال حرکت می‌کنند. تراکم ذرات ردیاب و ابعاد پنجره‌های کاوش به‌گونه‌ای تنظیم شد که دقت اندازه‌گیری سرعت جریان افزایش یابد [18].

پردازش و تحلیل تصاویر با استفاده از نرم‌افزار پی‌آی‌وی لب<sup>4</sup> انجام شد [19]. فاصله بردارهای سرعت بدست‌آمده در هر یک از صفحه‌های اندازه‌گیری حدود 1 میلی‌متر بوده است. زمان و فرکانس نمونه‌برداری به‌ترتیب حدود 80 ثانیه 240 هرتز در نظر گرفته شد. بر اساس بررسی‌های انجام‌شده، زمان مذکور برای عدم تغییر مقادیر متوسط سرعت و تنش‌های رینولدز کافی است. برای مقایسه داده‌های برداشت‌شده توسط دستگاه سرعت‌سنجی تصویری ذرات و دستگاه سرعت‌سنج صوتی جانب‌نگر، مولفه‌های سرعت لحظه‌ای توسط دستگاه سرعت‌سنج صوتی جانب‌نگر برداشت گردید. این دستگاه سه مولفه سرعت لحظه‌ای را در سه جهت به صورت همزمان برداشت می‌کند. مشابه اندازه‌گیری سرعت توسط دستگاه سرعت‌سنجی تصویری ذرات، برداشت سرعت در میانه سیلابدشت (با فاصله 30 سانتی‌متر از دیواره سمت راست کانال در شکل 2 و در امتداد قائم (از عمق 0.5 تا 7.5 سانتی‌متری از کف) انجام شده است. لازم به ذکر است با توجه به محدودیت‌های دستگاه سرعت‌سنج صوتی جانب‌نگر، برداشت سرعت در فاصله کمتر از 5 میلی‌متر از کف کانال و همچنین در فاصله 25 میلی‌متر از سطح آب قابل انجام نیست. علاوه بر این سرعت جریان توسط دستگاه سرعت‌سنج صوتی جانب‌نگر در امتداد افقی و در عمق 5 سانتی‌متری از کف، و در محدوده 25 الی 35 سانتی‌متری از جداره سمت راست هم برداشت گردید. فواصل نقاط برداشت در عمق و در عرض کانال، 1 سانتی‌متر می‌باشند. فرکانس برداشت اطلاعات 100 هرتز و حجم نمونه‌برداری 6 میلی‌متر مکعب تعیین گردید. برای داشتن سری زمانی پایدار در محاسبه مقادیر مؤلفه‌های متوسط سرعت و همچنین تنش‌های رینولدز، برداشت سرعت در هر نقطه به‌مدت 180 ثانیه (3 دقیقه) در نظر گرفته شد و برای پاکسازی داده‌های پرت از نرم‌افزار وین‌ای‌دی وی<sup>5</sup> استفاده شد [20].

### 3- نتایج و بحث

همان‌طور که در بخش مقدمه گفته شد خطای دستگاه سرعت‌سنج صوتی داپلر ناشی از دو عامل خطای ذاتی دستگاه و حضور بدنه و شاخک‌های دستگاه در داخل جریان می‌باشد. در ابتدا به منظور بررسی کیفی اثر تداخلی شاخک‌های سرعت‌سنج صوتی در محدوده حجم کنترل، برداشت میدان جریان بوسیله سرعت‌سنج تصویری ذرات در صفحه قائم با حضور فیزیکی

گرفته‌است. در ادامه به توضیح این آزمایش‌ها و نحوه برداشت میدان جریان پرداخته می‌شود.

### 2- تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس در یک کانال مستقیم به طول 11، عرض 1 و ارتفاع 0.7 متر انجام شد. کانال آزمایشگاهی مذکور، یک کانال عریض با مقطع مرکب می‌باشد (شکل 2). با توجه به عرض زیاد کانال و همچنین عرض زیاد سیلاب‌دشت، پروفیل سرعت در وسط سیلاب‌دشت مشابه پروفیل سرعت لگاریتمی با بستر صاف می‌باشد و به‌عبارت دیگر جریان در اواسط سیلاب‌دشت تقریباً دوبعدی است [15]. همچنین با توجه به نسبت عرض سیلاب‌دشت به عمق جریان ( $b/h = 6 > 5$ )، کانال از نوع عریض محسوب می‌شود [16]. جداره‌های جانبی و کف کانال از جنس شیشه بوده و برای تصویربرداری از جریان، مناسب می‌باشند.

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 مبداء آن دیواره سمت راست کانال می‌باشد. برای کنترل عمق آب، از یک سرریز قابل تنظیم در انتهای کانال استفاده شد. دبی در ورودی کانال با استفاده از شیر تنظیم دبی خروجی از پمپ، کنترل شده و به‌وسیله یک دبی‌سنج الکترومغناطیسی اندازه‌گیری شد. به منظور حذف تلاطم در ابتدای کانال از صفحه‌های موازی آرام‌کننده جریان استفاده شده است. شرایط توسعه‌یافتگی جریان در مقطع اندازه‌گیری توسط نبی‌پور و همکاران مورد بررسی و تایید قرار گرفت [15]. عمق جریان در سیلاب‌دشت برابر 10 سانتی‌متر بوده و رژیم جریان در کانال، زیربحرانی و کاملاً آشفته می‌باشد.

برای اندازه‌گیری غیرتداخلی میدان جریان از دستگاه سرعت‌سنجی تصویری ذرات به‌صورت دوبعدی و دومولفه‌ای در صفحات عمودی  $X-Z$  و افقی  $X-Y$  استفاده شد. صفحه عمودی موازی دیواره‌های کانال و به فاصله 30 سانتی‌متری از دیواره سمت راست کانال در شکل 2 در نظر گرفته شد و صفحه افقی موازی بستر کانال و به فاصله 5 سانتی‌متر از آن می‌باشد. این صفحه‌ها به‌صورت خط‌چین در شکل 2 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

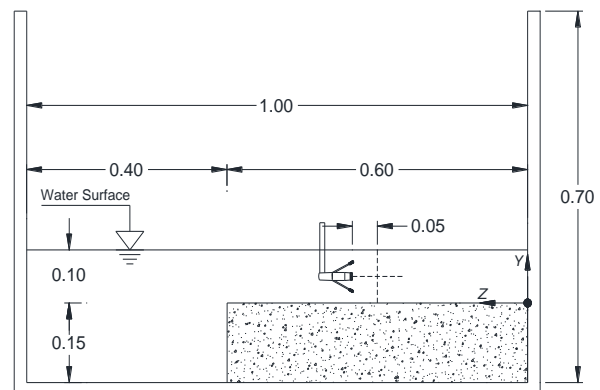


Fig. 2 The cross section of compound channel in present study (All dimensions are in meters.)

شکل 2 مقطع عرضی کانال در مطالعه حاضر (کلیه ابعاد بر حسب متر است)

<sup>1</sup> Raw

<sup>2</sup> Solid State

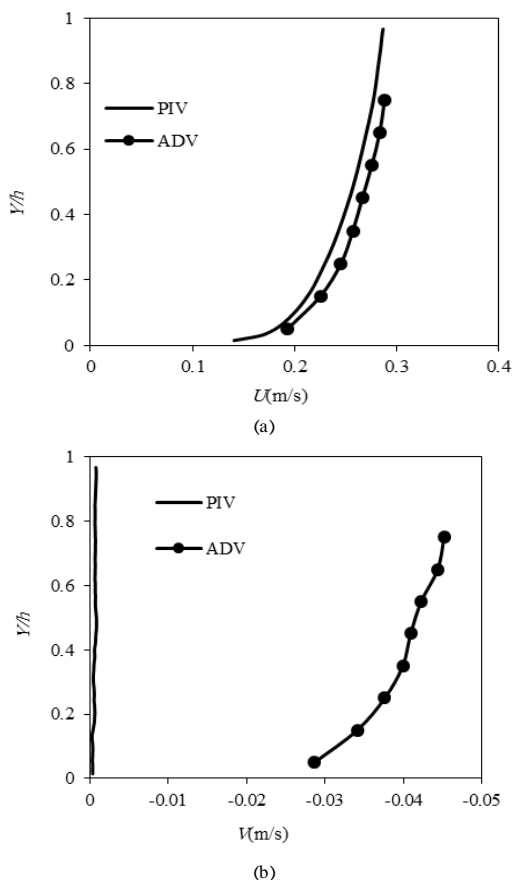
<sup>3</sup> Pliolite

<sup>4</sup> PLV Lab

<sup>5</sup> Win ADV

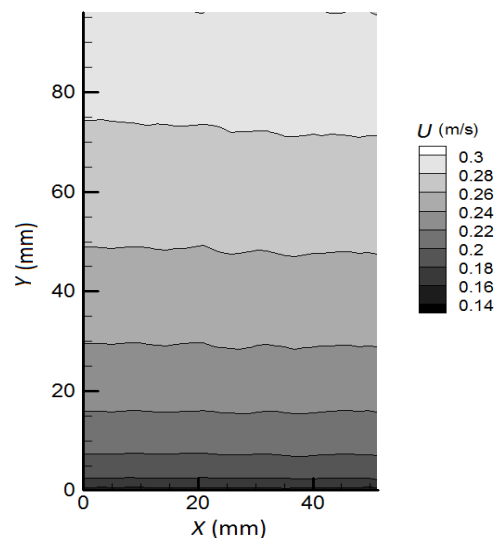
در ادامه نتایج برداشت میدان جریان توسط دستگاه سرعت‌سنج تصویری ذرات و دستگاه سرعت‌سنج صوتی جانب‌نگر مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. در شکل 5 نتایج حاصل از اندازه‌گیری سرعت طولی و قائم جریان (در وسط سیلاب‌دشت و در راستای عمق) با استفاده از دو روش سرعت‌سنج تصویری ذرات و سرعت‌سنج صوتی جانب‌نگر ارائه شده است. محور عمودی این دو نمودار با استفاده از عمق جریان ( $h = 10 \text{ cm}$ ) بی‌بعد شده است. از مقایسه پروفیل سرعت طولی جریان در عمق به دست آمده از دو روش سرعت‌سنج تصویری ذرات و سرعت‌سنج صوتی جانب‌نگر می‌توان دریافت که مقادیر حاصل از دو روش به یکدیگر نزدیک بوده و این مطلب بیانگر قابلیت هر دو روش در اندازه‌گیری سرعت طولی جریان می‌باشد. سرعت طولی حاصل از روش سرعت‌سنج صوتی جانب‌نگر در راستای عمق (بجز در نزدیکی کف) در حدود 5.2 درصد بیشتر از روش سرعت‌سنج تصویری ذرات است. این اختلاف در مطالعات پیشین برابر 4 درصد گزارش شده است [21]، که بیانگر صحت نتایج تحقیق حاضر است.

همان‌طور که در شکل 5-b مشاهده می‌شود برخلاف سرعت طولی، مقادیر سرعت قائم حاصل از دو روش مذکور تفاوت قابل توجهی با یکدیگر دارند. با توجه به نمودارهای شکل 5 متوسط نسبت سرعت قائم به سرعت طولی جریان حاصل از روش سرعت‌سنج صوتی جانب‌نگر برابر  $(v/u) = 0.15$  است و این بدان معنی است که زاویه بردار برآیند سرعت متوسط جریان (با مؤلفه افقی  $\bar{U}$  و مؤلفه قائم  $0.15\bar{U}$ )، دارای زاویه 8.75 درجه نسبت به افق



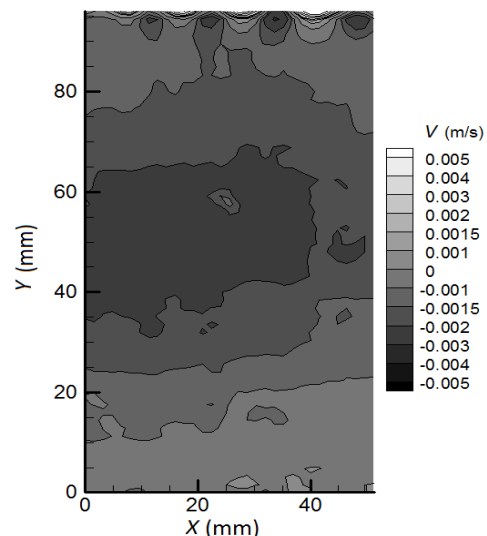
**Fig. 5** Comparison the results of measurement the longitudinal and vertical velocity of the flow by using PIV and side looking ADV  
 شکل 5 مقایسه نتایج اندازه‌گیری سرعت طولی و عمقی جریان با استفاده از روش‌های PIV و ADV جانب‌نگر

سرعت‌سنج صوتی داپلر (در حالت خاموش) صورت گرفت. دستگاه سرعت‌سنج صوتی در عمق 5 سانتی‌متری جریان و به فاصله عرضی 5 سانتی‌متر از صفحه برداشت قرار داده شد. شکل‌های 3 و 4 اثرات ناشی از حضور بدنه و شاخک‌های سرعت‌سنج صوتی را در اندازه‌گیری سرعت طولی و قائم نشان می‌دهند. همان‌طور که در این دو شکل مشاهده می‌شود اثر تداخلی حضور دستگاه سرعت‌سنج صوتی در سرعت طولی قابل ملاحظه نبوده و سرعت طولی جریان در راستای کانال تغییر عمده‌ای نمی‌کند. این در حالی است که سرعت قائم در راستای جریان کاملاً تغییر کرده و الگوی جریان شکل‌گرفته متفاوت از جریان کاملاً توسعه یافته در کانال باز می‌باشد. بنابراین انتظار می‌رود که اندازه‌گیری جریان‌های ثانویه توسط دستگاه سرعت‌سنج صوتی نسبت به سرعت طولی با خطای بیشتری مواجه گردد. البته قابل ذکر است که بررسی میزان تأثیر تداخل دستگاه سرعت‌سنج صوتی در محدوده حجم نمونه‌گیری آن با توجه به شرایط هیدرولیکی مختلف نیاز به بررسی و مطالعات بیشتر دارد.



**Fig. 3** Longitudinal velocity in vertical sheet with the physical presence of ADV

شکل 3 سرعت طولی جریان در صفحه قائم با حضور فیزیکی سرعت‌سنج صوتی



**Fig. 4** Vertical velocity in vertical sheet with the physical presence of ADV

شکل 4 سرعت قائم جریان در صفحه قائم با حضور فیزیکی سرعت‌سنج صوتی

می‌باشند. اما در عرض‌های کمتر مقدار سرعت اندازه‌گیری شده توسط سرعت‌سنجی صوتی کمی بیشتر از سرعت‌سنجی تصویری ذرات است که این پدیده به دلیل نزدیک شدن سرعت‌سنجی صوتی به جداره کانال و افزایش سرعت طولی مابین جداره کانال و سرعت‌سنجی صوتی به واسطه تنگ‌شدگی جریان است.

با دقت در شکل 6-b می‌توان دریافت که سرعت عرضی حاصل از دو روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات و سرعت‌سنجی صوتی جانب‌نگر تفاوت قابل ملاحظه‌ای با هم دارند. مقدار سرعت عرضی حاصله از روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات حدود 0.5 درصد حداکثر سرعت طولی است، در حالی که این مقدار در روش سرعت‌سنجی صوتی حدود 4.5 درصد می‌باشد. مشاهدات حاصل از روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات با نتایج محققین پیشین در خصوص نسبت مقادیر سرعت ثانویه [24,23] به حداکثر سرعت طولی در وسط سیلاب‌دشت همخوانی داشته و با نتایج حاصل از روش سرعت‌سنجی صوتی جانب‌نگر متناقض است.

در شکل 7 نتایج شدت آشفتگی طولی و قائم با استفاده از دو روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات و سرعت‌سنجی صوتی جانب‌نگر ارائه شده است. مقادیر شدت آشفتگی با استفاده از سرعت برشی کف بی‌بعد شده‌اند. برای بدست آوردن سرعت برشی کف از برون‌یابی مقادیر تنش برشی رینولدز حاصل از روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات استفاده شده است. همان‌طور که در شکل 7 مشاهده می‌شود مقادیر شدت آشفتگی طولی و قائم حاصل از سرعت‌سنجی صوتی همواره بزرگتر از مقادیر سرعت‌سنجی تصویری ذرات می‌باشد. با دقت در نتایج شکل 7 می‌توان دریافت که اختلاف مقادیر شدت آشفتگی طولی و قائم حاصل از دو روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات و سرعت‌سنجی صوتی جانب‌نگر با نزدیک شدن به بستر افزایش می‌یابد. علت این پدیده می‌تواند ناشی از افزایش تداخل دستگاه سرعت‌سنجی صوتی در اندازه‌گیری نقاط با عمق بیشتر باشد.

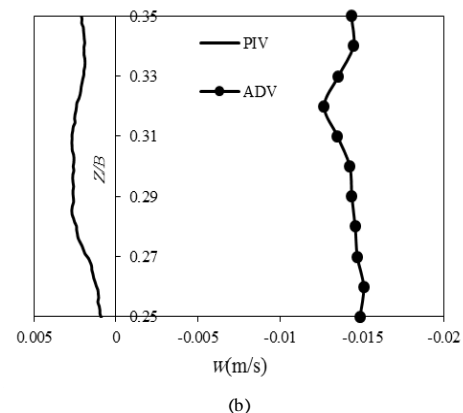
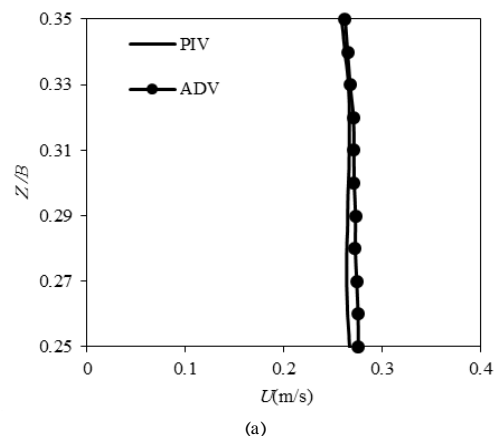
از مقایسه شکل 5-a و 7-a می‌توان دریافت که علی‌رغم اختلاف کم سرعت طولی حاصل از دو روش (به‌طور متوسط 5.2 درصد)، تفاوت شدت آشفتگی طولی به‌دست آمده از روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات و سرعت‌سنجی صوتی زیاد است، به‌طوری‌که میزان خطای شدت آشفتگی طولی روش سرعت‌سنجی صوتی نسبت به روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات در بیشترین حالت (در نزدیکی بستر) به حدود 42 درصد می‌رسد. علت خطای بیشتر شدت آشفتگی طولی نسبت به سرعت متوسط طولی این است که مقدار نوسانات سرعت طولی نسبت به مقادیر لحظه‌ای سرعت طولی کوچک‌تر بوده و اندازه‌گیری آن با خطای بیشتری همراه است.

از طرفی میزان خطای شدت آشفتگی قائم حاصل از روش سرعت‌سنجی صوتی نسبت به شدت آشفتگی طولی در این روش بیشتر است که این اختلاف با توجه به خطای بسیار بالای روش سرعت‌سنجی صوتی در اندازه‌گیری سرعت قائم جریان قابل توجیه است. البته واضح است که میزان خطای حاصل از روش سرعت‌سنجی صوتی در اندازه‌گیری نوسانات سرعت قائم کمتر از سرعت متوسط قائم می‌باشد.

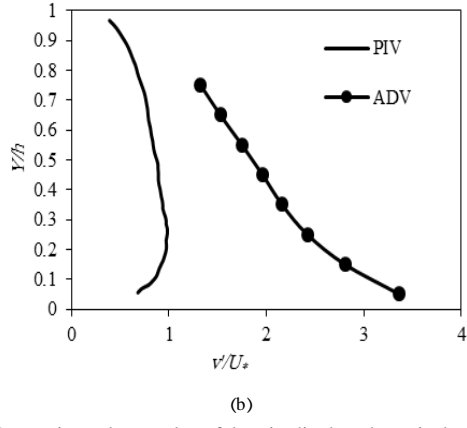
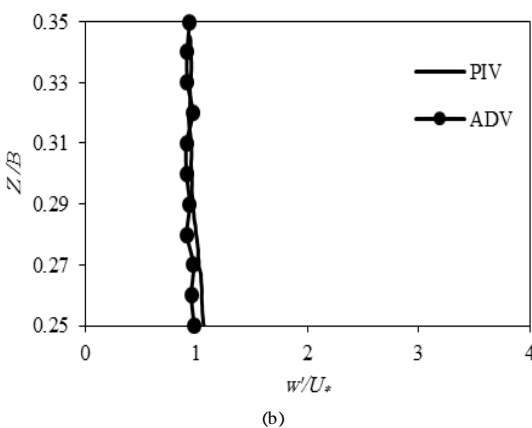
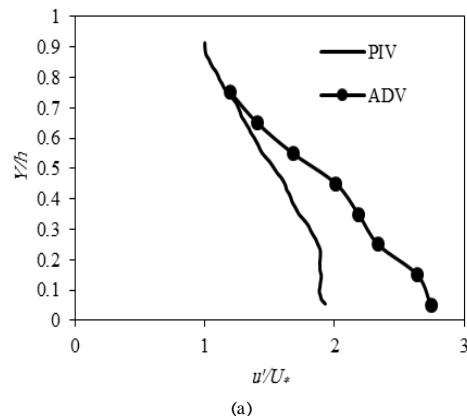
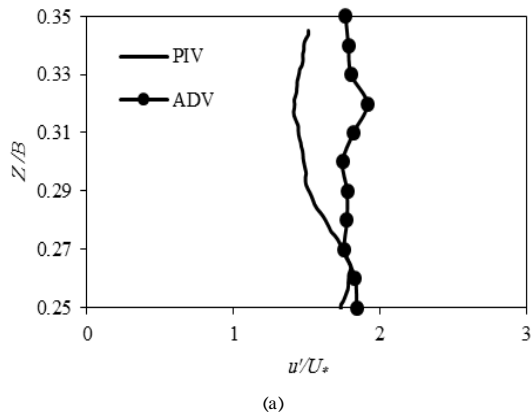
در شکل 8 نتایج شدت آشفتگی طولی و عرضی با استفاده از دو روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات و سرعت‌سنجی صوتی جانب‌نگر ارائه شده است. مقادیر شدت آشفتگی با استفاده از سرعت برشی کف (حاصل از برون‌یابی مقادیر تنش برشی رینولدز روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات تا کف) بی‌بعد شده‌اند. بازه اعداد شدت آشفتگی طولی و عرضی در شکل 8 به‌گونه‌ای در نظر

خواهد بود. از سوی دیگر با توجه به اطمینان از برقراری جریان یکنواخت در کانال و همچنین شیب بسیار کم آن (0.0003)، بدیهی است که نتایج برداشت سرعت قائم توسط دستگاه سرعت‌سنج صوتی با واقعیت مطابقت ندارد. خطای زیاد دستگاه سرعت‌سنج صوتی جانب‌نگر در اندازه‌گیری سرعت قائم در راهنمای دستگاه مورد اشاره قرار گرفته است. دلیل این خطای زیاد، ایجاد داده‌های نادرست متعدد در راستای قائم نسبت به راستای افقی به علت ساختار هندسی سرعت‌سنج صوتی جانب‌نگر ذکر شده است [22]. علت عدم دقت مقادیر سرعت قائم حاصل از سرعت‌سنج صوتی جانب‌نگر، عدم هم‌راستایی امواج ارسالی و دریافتی در جهت قائم می‌باشد. گفتنی است در سرعت‌سنج صوتی پایین‌نگر به دلیل هم‌راستایی امواج ارسالی و دریافتی در راستای عمق، مقادیر سرعت اندازه‌گیری شده در راستای قائم دارای دقت بیشتری نسبت به راستای عرضی است [22].

در شکل 6 نتایج حاصل از اندازه‌گیری سرعت طولی و عرضی جریان (در وسط سیلاب‌دشت و در راستای عرض) با استفاده از دو روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات و سرعت‌سنجی صوتی جانب‌نگر ارائه شده است. محور عمودی این دو نمودار با استفاده از عرض کانال ( $B = 100 \text{ cm}$ ) بی‌بعد شده است. بازه اعداد سرعت طولی در شکل 6-a از 0 تا 0.4 متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است تا امکان مقایسه دو نمودار 5-a و 6-a وجود داشته باشد. همان‌طور که در شکل 6-a مشاهده می‌شود مقادیر سرعت طولی حاصل از دو روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات و سرعت‌سنجی صوتی به هم نزدیک



**Fig. 6** Comparison the results of measurement the longitudinal and transverse velocity of the flow by using PIV and side looking ADV  
 شکل 6 مقایسه نتایج اندازه‌گیری سرعت طولی و عرضی جریان با استفاده از روش‌های PIV و ADV جانب‌نگر



**Fig.8** Comparison the results of longitudinal and transverse turbulence intensity by using PIV and side looking ADV

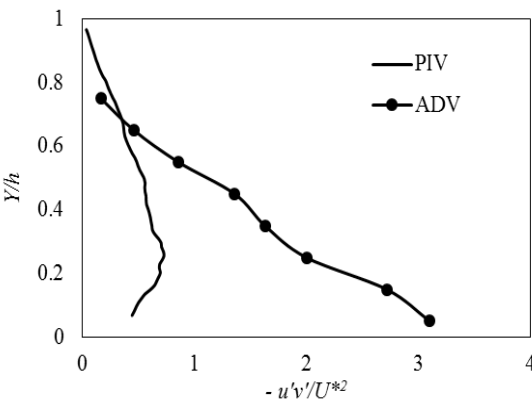
**Fig.7** Comparison the results of longitudinal and vertical turbulence intensity by using PIV and side looking ADV

شکل 8 مقایسه نتایج شدت آشفتگی طولی و عرضی جریان با استفاده از روش‌های PIV و ADV جانب‌نگر

شکل 7 مقایسه نتایج شدت آشفتگی طولی و قائم جریان با استفاده از روش‌های PIV و ADV جانب‌نگر

گرفته شده است تا امکان مقایسه این نمودارها با نمودارهای شکل 7 وجود داشته باشد.

با توجه به شکل 8-a می‌توان دریافت که شدت آشفتگی طولی حاصل از دستگاه سرعت‌سنجی صوتی در صفحه افق نیز مشابه صفحه قائم با نتایج حاصل از روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات اختلاف قابل توجهی دارد. از سوی دیگر شکل 8-b نشان می‌دهد که شدت آشفتگی عرضی حاصل از دو روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات و سرعت‌سنجی صوتی (برخلاف شدت آشفتگی قائم) تغییرات بسیار ناچیزی دارد و می‌توان نتیجه گرفت که سرعت‌سنجی صوتی جانب‌نگر شدت آشفتگی عرضی را به خوبی اندازه‌گیری می‌کند. این در حالی است که سرعت‌سنجی صوتی جانب‌نگر در اندازه‌گیری سرعت متوسط عرضی مناسب نیست (شکل 6-b).



**Fig.9** Comparison the results of Reynolds Shear Stress by using PIV and side looking ADV

در شکل 9 نتایج تنش برشی رینولدز با استفاده از دو روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات و سرعت‌سنجی صوتی جانب‌نگر ارائه شده است. مقادیر تنش برشی رینولدز با استفاده از سرعت برشی کف بی‌بعد شده‌اند. همان‌طور که گفته شد سرعت برشی کف با استفاده از برون‌یابی تنش برشی رینولدز (حاصل از روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات) تا بستر به‌دست آمده است. با دقت در نتایج شکل 9 می‌توان دریافت که اختلاف مقادیر تنش برشی رینولدز حاصل از دو روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات و سرعت‌سنجی صوتی جانب‌نگر با نزدیک شدن به بستر افزایش می‌یابد. مقایسه کمی نتایج تنش برشی رینولدز با استفاده از دو روش اندازه‌گیری نشان می‌دهد که تنش برشی کف حاصل از دستگاه سرعت‌سنجی صوتی حدود 3.4 برابر دستگاه سرعت‌سنجی

شکل 9 مقایسه نتایج تنش برشی رینولدز جریان با استفاده از روش‌های PIV و ADV جانب‌نگر

تصویری ذرات می‌باشد. با توجه به اختلاف شدت آشفتگی طولی و قائم در دو روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات و سرعت‌سنجی صوتی جانب‌نگر، می‌توان انتظار داشت که نتایج تنش برشی رینولدز حاصل از روش سرعت‌سنجی صوتی نیز دارای دقت کافی نباشد. افزایش اختلاف مقادیر تنش برشی رینولدز حاصل از دو روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات و سرعت‌سنجی صوتی جانب‌نگر با نزدیک شدن به بستر و در سرعت‌های پایین با نتایج تحقیق لوهرمن و همکاران سازگار است [9].

## 4- نتیجه‌گیری

دستگاه سرعت‌سنجی صوتی داپلر به طور گسترده در مطالعات میدانی و آزمایشگاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مطالعه حاضر به بررسی آزمایشگاهی دقت دستگاه سرعت‌سنج صوتی جانب‌نگر در جریان آشفته می‌پردازد. در این تحقیق میدان جریان در محدوده حجم نمونه‌گیری با استفاده از دستگاه سرعت‌سنجی تصویری ذرات و سرعت‌سنجی صوتی جانب‌نگر اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از پژوهش حاضر عبارتند از:

- حضور فیزیکی سرعت‌سنج صوتی داپلر جانب‌نگر در میدان جریان اثر تداخلی داشته که این اثر در اندازه‌گیری سرعت‌های ثانویه شدیدتر از سرعت طولی جریان می‌باشد.

- دستگاه سرعت‌سنج صوتی در اندازه‌گیری سرعت طولی، دارای دقت مناسبی بوده و سرعت طولی حاصل از دستگاه سرعت‌سنج صوتی به طور متوسط حدود 5 درصد بیشتر از مقادیر سرعت طولی حاصل از سرعت‌سنج تصویری ذرات می‌باشد.

- علی‌رغم دقت مناسب دستگاه سرعت‌سنج صوتی در اندازه‌گیری سرعت طولی، این دستگاه در اندازه‌گیری سرعت‌های قائم و عرضی دارای خطای قابل توجهی می‌باشد.

- خطای دستگاه سرعت‌سنج صوتی جانب‌نگر در اندازه‌گیری سرعت قائم بسیار بیشتر از سرعت عرضی است. که دلیل این امر هندسه شاخک‌های سرعت‌سنج صوتی جانب‌نگر می‌باشد.

- علی‌رغم دقت بالا در اندازه‌گیری سرعت طولی با استفاده از سرعت‌سنج صوتی، مقادیر شدت آشفتگی طولی این ابزار تفاوت قابل ملاحظه‌ای با نتایج سرعت‌سنج تصویری ذرات دارد.

- مقادیر شدت آشفتگی طولی و قائم حاصل از سرعت‌سنجی صوتی جانب‌نگر همواره بزرگتر از مقادیر سرعت‌سنجی تصویری ذرات می‌باشد و با نزدیک شدن به بستر افزایش می‌یابد.

- شدت آشفتگی عرضی حاصل از دو روش سرعت‌سنجی صوتی جانب‌نگر و سرعت‌سنجی تصویری ذرات تغییرات بسیار ناچیزی دارد و لذا سرعت‌سنجی صوتی جانب‌نگر شدت آشفتگی عرضی را به خوبی اندازه‌گیری می‌کند، اما نتایج شدت آشفتگی قائم حاصل از سرعت‌سنجی صوتی جانب‌نگر قابل اعتماد نیست.

- مقادیر تنش برشی رینولدز حاصل از سرعت‌سنج صوتی جانب‌نگر در اکثر نقاط بزرگتر از مقادیر حاصل از روش سرعت‌سنج تصویری ذرات بوده و در نزدیکی بستر حدود 3.4 برابر مقدار حاصل از روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات است.

## 5- مراجع

- [1] Q. Chen, Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications, *Building Environment*, Vol. 44, No. 4, pp. 848-858, 2009.
- [2] E. Lobutova, C. Resagk, R. Rank, D. Müller, Extended three dimensional particle tracking velocimetry for large enclosures, In: W. Nitsche, Dobriloff C. (eds) *Imaging Measurement Methods for Flow Analysis*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [3] P. H. Biwole, W. Yan, Y. Zhang, J. Roux, A complete 3D particle tracking algorithm and its applications to the indoor airflow study, *Measurement Science and Technology*, Vol. 20, No. 11, pp. 1154-1156, 2009.
- [4] S. Fu, P. H. Biwole, Ch. Mathis, Particle tracking velocimetry for indoor airflow field: A review, *Building and Environment*, Vol. 87, No. 1, pp. 34-44, 2015.
- [5] A. Safarzadeh, *Experimental Study of Turbulent Flow Pattern Around a Groyne with Various Head Shapes*, PhD Thesis, Department of Civil Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, 2011. (in Persian)
- [6] G. Voulgaris, J. H. Trowbridge, Evaluation of the acoustic Doppler velocimeter (ADV) for turbulence measurements, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 15, No. 1, pp. 272-289, 1998.
- [7] D. Hurther, U. Lemmin, A correction method for turbulence measurements with a 3D acoustic Doppler velocity profiler, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 18, No. 1, pp. 446-458, 2001.
- [8] T. L. Wahl, Discussion of despiking acoustic Doppler velocimeter data, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 129, No. 1, pp. 484-487, 2003.
- [9] A. Lohrmann, R. Cabrera, G. Gelfenbaum, J. Haines, Direct measurements of reynolds stress with an acoustic doppler velocimeter, *5th Working Conference on Current Measurement*, IEEE, Piscataway, USA, 1995.
- [10] V. Nikora, D. Goring, ADV Measurements of Turbulence: Can we improve their interpretation?, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 124, No. 6, pp. 630-634, 1998.
- [11] D. Goring, V. Nikora, Despiking acoustic doppler velocimeter data, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 128, No. 1, pp. 117-126, 2002.
- [12] M. Parsheh, F. Sotiropoulos, P. Agel, Estimation of power spectra of acoustic-doppler velocimetry data contaminated with intermittent spikes, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 136, No. 6, pp. 368-378, 2010.
- [13] B. Ruonan, C. Liekai, W. Xingkui, L. Danxun, Comparison of ADV and PIV measurements in open channel flows, *Procedia Engineering*, Vol. 154, No. 1, pp. 995-1001, 2016.
- [14] P. Rusello, A. Lohrmann, E. Siegel, T. Maddux, Improvements in acoustic doppler velocimetry, *The 7th International Conference on Hydrosience and Engineering (ICHE-2006)*, Philadelphia, USA, 2006.
- [15] M. Nabipour, S. A. A. Salehi Neyshabouri, S. H. Mohajeri, A. R. Zarrati, M. Zabetian, Study on turbulent flow in a compound channel with shallow overbank using Particle Image Velocimetry, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 8, pp. 164-172, 2017. (in Persian)
- [16] I. Nezu, Nakagawa, *Turbulence in Open-Channel Flows*, pp. 96-97, Rotterdam, Balkema, 1993.
- [17] X. Zhang, H. Nepf, Exchange flow between open water and floating vegetation, *Environmental Fluid Mechanics*, Vol. 11, No. 5, pp. 531-546, 2011.
- [18] M. Raffel, Ch. Willert, S. Wereley, J. Kompenhans, *Particle Image Velocimetry, A practical Guide*, pp. 170-172, New York, Springer, 2007.
- [19] W. Thielicke, E. Stamhuis, PIVlab—Towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in matlab, *Journal of Open Research Software*, Vol. 2, No. 1, pp. e30, 2014.
- [20] A. Safarzadeh, S. A. A. Salehi Neyshabouri, A. R. Zarrati, Experimental investigation on 3D turbulent flow around straight and T-shaped groynes in a flat bed channel, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 142, No. 8, pp. 1-15, 2016.
- [21] U. Lemmin, T. Rolland, An acoustic velocity profiler for laboratory and field studies, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 123, No. 12, pp. 1089-1098, 1997.
- [22] Nortek, *Comprehensive Manual*, pp. 110-120, Rud, Norway: Nortek AS, 2015.
- [23] S. Kara, T. Stoesser, T. W. Sturm, Turbulence statistics in compound channels with deep and shallow overbank flows, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 50, No. 5, pp. 482-493, 2012.
- [24] A. Tominaga, I. Nezu, Turbulent structure in compound open-channel flows, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 117, No. 1, pp. 21-41, 1991.