



## مطالعه تجربی جریان آشفته در یک کانال مرکب با عمق کم سیلابدشت به کمک سرعت‌سنجی تصویری ذرات

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

1- دانشجوی دکتری، مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استاد، مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران

4- استاد، مهندسی عمران، دانشگاه امیرکبیر، تهران

5- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

\* تهران، صندوق پستی 14115116، salehi@modares.ac.ir

### چکیده

در کانال‌های مرکب علاوه بر جریان برشی ناشی از کف (جریان لایه مرزی)، نیروهای دیگری توسط انتقال مومنتم بین کانال اصلی و سیلابدشت‌ها (لایه برشی آزاد) نیز ایجاد می‌شود. به دلیل وقوع چنین انتقال مومنتومی، جریان سه‌بعدی پیچیده‌ای در کانال مرکب شکل می‌گیرد. پژوهش‌های پیشین نشان داده است که با کاهش عمق جریان در سیلابدشت بر شدت جریان های ثانویه و بنابراین پیچیدگی‌های جریان افزوده می‌شود، که این پیچیدگی‌ها به خوبی تبیین و توصیف نشده است. به منظور بررسی ساختار جریان آشفته با عمق کم آب در سیلابدشت، میدان جریان در یک کانال مرکب با دیواره‌های قائم به روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات اندازه‌گیری شده است. بررسی نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که حداکثر سرعت طولی در کانال اصلی در زیر تراز سیلابدشت رخ می‌دهد. متفاوت با پژوهش‌های پیشین در کانال مرکب با دیواره میانی مایل که توزیع عمقی شدت‌های آشفته‌گی در کانال اصلی دارای دو رفتار متفاوت در دو ناحیه پایین و بالای تراز سیلابدشت است، در مطالعه حاضر برای پروفیل شدت آشفته‌گی طولی و تنش برشی رینولدز در عمق، سه رفتار متفاوت (کاهش و یا افزایش) و برای شدت آشفته‌گی قائم چهار رفتار متفاوت مشاهده شد. از تغییرات سرعت برشی بستر در عرض کانال می‌توان دریافت که سرعت برشی در سیلابدشت تقریباً ثابت است و با نزدیک شدن به ناحیه اندرکنش افزایش می‌یابد.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 29 فروردین 1395  
پذیرش: 15 تیر 1395  
ارائه در سایت: 18 مرداد 1396

کلید واژگان:

کانال مرکب

جریان کم‌عمق

جریان آشفته

دیواره میانی قائم

سرعت‌سنجی تصویری ذرات

## Study on turbulent flow in a compound channel with shallow overbank using Particle Image Velocimetry

Mostafa Nabipour<sup>1</sup>, Seyed Ali Akbar Salehi Neyshabouri<sup>1\*</sup>, Seyed Hossein Mohajeri<sup>2</sup>, Amir Reza Zarrati<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 Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University Science and Research Branch, Tehran, Iran

3- Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, 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 18 April 2017  
Accepted 06 July 2017  
Available Online 09 August 2017

### Keywords:

Compound channel  
Shallow flow  
Turbulent flow  
Vertical middle wall  
Particle Image Velocimetry

### ABSTRACT

In compound channels, in addition to shear flow originated from the bed (boundary layer flow), other forces are generated by momentum transform between the main channel and the floodplain (free shear layer). Due to such special type of momentum transport, a complicated three-dimensional flow structure forms in a compound channel. Previous studies showed that in a compound channel, secondary currents are enhanced for shallow overbank flow and consequently the complexity of flow structure increases. However, this complexity has not been described properly. To explore turbulent structure of a shallow overbank flow, flow field is measured in a compound channel with vertical walls using Particle Image Velocimetry. The results show that in the main channel, the maximum amount of streamwise velocity occurs below the floodplain level. Whereas in previous studies in compound channels with inclined transitional wall, turbulence intensities profiles in the main channel showed two different trends at lower and higher elevations of the floodplain invert, in the present study three different increasing or decreasing trends were observed for Reynolds shear stress and longitudinal turbulence intensity profiles and four different trends were observed for vertical turbulence intensity. Bed shear velocity was approximately constant in the floodplain but it increased near the interaction zone.

### Please cite this article using:

M. Nabipour, S. A. A. Salehi Neyshabouri, S. H. Mohajeri, A. R. Zarrati, M. Zabetian Toroghi, 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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## 1- مقدمه

اغلب رودخانه‌های طبیعی دارای یک قسمت اصلی یا کانال اصلی به همراه یک یا دو سیلابدشت مجاور (با تراز بالاتر از کانال اصلی) هستند. به چنین مقطعی در اصطلاح کانال مرکب گفته می‌شود. در کانال مرکب یک جریان عمیق در کانال اصلی و یک جریان با عمق کم در سیلابدشت تشکیل می‌شود. در این شرایط گرادیان شدید سرعت بین کانال اصلی و سیلابدشت موجب تولید گردابه‌های بزرگ مقیاس<sup>1</sup> و تبادل مومنت<sup>2</sup> شدید بین دو مقطع کم عمق و عمیق (منطقه اندرکنش) می‌شود [1]. بنابراین در کانال‌های مرکب علاوه بر اصطکاک ناشی از کف (جریان لایه مرزی)، نیروهای دیگری نیز در اثر انتقال مومنت به وسیله لایه برشی آزاد<sup>3</sup> بین مناطق عمیق و کم عمق ایجاد می‌شود [2]. نیروهای بازدارنده حاصل از انتقال مومنت از کانال اصلی (با مومنت بیشتر) به سیلابدشت (با مومنت کمتر)، باعث کاهش دبی کانال اصلی، افزایش دبی سیلابدشت و کاهش ظرفیت انتقال جریان رودخانه می‌شود [3,4]. علی‌رغم پژوهش‌های انجام شده در مورد کانال مرکب، طبیعت سه بعدی گردابه‌ها و پیچیدگی‌های آشفته‌گی جریان در ناحیه اندرکنش هنوز بطور کامل مشخص نشده است [5].

در کانال مرکب دو نوع گردابه بزرگ مقیاس با محور عمودی و طولی (جریان‌های ثانویه<sup>4</sup>) تشکیل می‌شود [6]. تراکم و ویژگی‌های گردابه‌های بزرگ مقیاس در کانال مرکب به تغییرات عمق جریان وابسته است [7]. بر اساس عمق نسبی (نسبت عمق کانال اصلی به سیلابدشت)، سه نوع جریان کم عمق، بینابینی و عمیق قابل تشخیص است [8-10]. جریان کم عمق با عمق نسبی بیشتر از 3 کاملاً متأثر از برش شدید در ناحیه اندرکنش است و ساختارهای گردابی غالب شبه دوبعدی با محور عمودی در آن شکل می‌گیرد. در حالی که در جریان عمیق با عمق نسبی کمتر از 2، میزان برش در ناحیه اندرکنش کاهش یافته و گردابه‌های بزرگ مقیاس ناشی از دیواره‌های سیلابدشت نیز قابل تشخیص هستند. با کاهش عمق جریان در سیلابدشت و افزایش قدرت جریان‌های ثانویه، محل سرعت حداکثر در ناحیه اندرکنش کانال اصلی از نزدیکی سطح آب به عمق‌های پایین‌تر منتقل می‌شود [6,11]. همچنین با افزایش عمق جریان در کانال مرکب، جریان در کانال مرکب قابل قیاس با جریان در یک کانال ساده خواهد بود [12].

یکی از عوامل موثر در ساختار جریان و توزیع تنش برشی کانال مرکب، هندسه کانال و از جمله شیب دیواره میانی کانال است [13]. اندازه‌گیری میدان جریان و بررسی ویژگی‌های آشفته‌گی جریان در کانال مرکب با دیواره میانی مایل [15,14,4] بیشتر از کانال مرکب با دیواره میانی قائم [11] مورد مطالعه قرار گرفته است. از طرفی اندازه‌گیری سرعت در جریان با عمق کم در سیلابدشت توسط سرعت سنج صوتی داپلر<sup>5</sup> و سرعت سنج لیزری داپلر<sup>6</sup> با دقت کافی قابل انجام نیست [16]. بنابراین بررسی میدان جریان و ویژگی‌های آشفته‌گی در کانال مرکب با استغراق نسبی کم و دیواره میانی قائم نیاز به مطالعه بیشتر داشته و این موضوع نیاز به اندازه‌گیری دقیق سرعت توسط ابزارهای غیرتداخلی دارد.

تنش برشی بستر و ساختارهای آشفته‌گی در نزدیکی کف کانال، نقش اساسی در انتقال رسوب و حفاظت بستر رودخانه‌ها بازی می‌کنند. اندازه‌گیری

مستقیم تنش برشی بستر و محاسبه دقیق سرعت برشی با استفاده از روش‌های مختلفی مانند لوله پرستون<sup>7</sup> یا نیروسنج قابل انجام است که این روش‌ها به تجهیزات خاص و فشارسنج‌های با دقت بالا نیاز دارد [14]. یکی از روش‌های ساده محاسبه سرعت برشی<sup>8</sup> بستر استفاده از روش المان قائم است. در این روش با تقسیم مقطع جریان به المان‌هایی در راستای جریان (از کف تا سطح آب) و با صرف نظر از تنش برشی بین المان‌ها و همچنین صرف نظر از انتقال مومنت ناشی از جریان‌های ثانویه، می‌توان سرعت برشی بستر  $u_{*b}$  را با استفاده از رابطه (1) به دست آورد [17]:

$$u_{*b} = \sqrt{gY S_f} \quad (1)$$

که در آن  $g$  شتاب جاذبه،  $Y$  عمق جریان و  $S_f$  شیب خط انرژی است. به منظور تعیین سرعت برشی موضعی در نقاط مختلف بستر می‌توان از قاعده لگاریتمی<sup>9</sup> سرعت (رابطه 2) نیز بهره برد [18]:

$$\frac{\bar{u}}{u_{*b}} = \frac{1}{\kappa} \ln z + A \quad (2)$$

که در آن  $\bar{u}$  سرعت متوسط زمانی در یک نقطه به فاصله  $z$  از کف،  $\kappa$  ثابت فون کارمن (بین 0.40 تا 0.41)،  $A$  ضریب ثابت مرتبط با زبری بستر است که در یک کانال مستطیلی با بستر صاف برابر با 5.3 است [19]. این رابطه برای جریان‌های دائمی و در لایه مرزی کاملاً توسعه یافته صحیح است. علی‌رغم استفاده فراوان از رابطه لگاریتمی سرعت در مهندسی رودخانه، در جریان‌های پیچیده پروفیل سرعت ممکن است لگاریتمی نباشد. هو و همکاران عرض کانال مرکب را بر اساس همخوانی یا عدم همخوانی با قاعده لگاریتمی سرعت به چهار بخش (بخش میانی کانال اصلی، ناحیه اندرکنش، بخش میانی سیلابدشت و ناحیه مجاور دیواره سیلابدشت) تقسیم کردند [20]. علی‌رغم این که استفاده از رابطه لگاریتمی سرعت در جریان‌های پیچیده سه بعدی مانند کانال مرکب در تمام عمق جریان (از کف تا سطح آب) قابل قبول نیست، اما برخی پژوهشگران کاربرد این رابطه را در ناحیه نزدیک بستر ( $300 < Z^+ < 30$ ) حتی در جریان‌های سه بعدی مناسب ارزیابی کرده‌اند [21].

هنگامی که اندازه‌گیری پارامترهای آشفته‌گی در کانال انجام شده باشد، می‌توان از تنش‌های رینولدز<sup>10</sup> نیز برای محاسبه سرعت برشی بستر استفاده نمود. به کمک معادله‌های دوبعدی ناوراستوکس در یک جریان توسعه یافته و با صرف نظر از سرعت متوسط قائم، معادله (3) برای تنش برشی در عمق جریان قابل استخراج است [22].

$$\tau_{xz}/\rho = u_{*b}^2(1 - z/h) \quad (3)$$

که در آن  $\tau_{xz}$  تنش برشی در عمق  $z$ ،  $\rho$  چگالی،  $h$  عمق جریان و  $z$  فاصله از بستر کانال است. این معادله نشان‌دهنده رابطه خطی تنش برشی در راستای عمق در جریان آزاد توسعه یافته و تک‌جهته<sup>11</sup> می‌باشد. تنش برشی  $\tau_{xz}$  در هر نقطه برابر مجموع دو ترم تنش برشی ناشی از لزجت و تنش برشی رینولدز  $-\overline{u'w'}$  (سرعت نوسانی افقی و  $w'$  سرعت نوسانی قائم) می‌باشد. در نزدیکی بستر تنش برشی ناشی از لزجت غالب و تنش برشی رینولدز کوچک است و بالعکس با فاصله از بستر تنش برشی رینولدز غالب و تنش ناشی از لزجت ناچیز است. بنابراین با داشتن تنش برشی رینولدز در نقاطی با فاصله از بستر (با صرف نظر از تنش برشی ناشی از لزجت در آن نقاط) می‌

1 Large-Scale Vortices

2 Momentum Transfer

3 Free Shear Layer

4 Secondary Currents

5 Acoustic Doppler Velocimetry

6 Laser Doppler Anemometry

7 Preston Tube

8 Shear Velocity

9 Logarithmic Law

10 Reynolds Stresses

11 Unidirectional

دشت و کانال اصلی به ترتیب 5 و 20 سانتی متر می باشد. بنابراین عمق نسبی برابر 4 (بزرگتر از 3) خواهد بود که نشان می دهد جریان از نوع کم عمق محسوب می شود [15].

اندازه گیری ها در فاصله 7.9 متر از ورودی کانال انجام شده است (نسبت طول به عرض سیلابدشت معادل 13.2) که پروفیل سرعت کاملاً توسعه یافته و اثرات سرریز پایین دست ناچیز می باشد. پروست و همکاران گزارش کردند که در یک کانال مرکب با دیواره های قائم (با عمق نسبی 0.3) در طول حدود 5.6 برابر عرض سیلابدشت، عرض لایه اختلاطی به مقدار ثابتی می رسد [27]. به منظور اطمینان از توسعه یافتگی جریان در محل آزمایش، اندازه گیری سرعت جریان در سه مقطع (در مرکز کانال اصلی) به فاصله 6.9، 7.4 و 7.9 متر از ورودی کانال توسط سرعت سنج صوتی داپلر انجام شد که با توجه به عدم تغییر سرعت متوسط طولی در دو مقطع 7.9 و 7.4 متر، توسعه یافتگی جریان در محل آزمایش به اثبات رسید (شکل 2).

سرعت جریان در چهار صفحه عمودی (موازی دیواره های کانال و در راستای جریان) در فاصله های 30، 50، 60 و 70 سانتی متری از دیواره سیلابدشت (دیواره سمت راست در شکل 1) اندازه گیری شد. این صفحه ها به صورت خط چین در "شکل 1" نشان داده شده اند.

به منظور اندازه گیری صحیح سرعت (مخصوصاً سرعت قائم که مقدار بسیار کوچکی دارد) استفاده از ابزار اندازه گیری غیرتداخلی<sup>3</sup> اهمیت دارد. بنابراین برای اندازه گیری میدان جریان از دستگاه سرعت سنجی تصویری

توان یک خط به تنش برشی رینولدز بر حسب عمق برازش داد و با برون یابی این خط تا بستر، تنش برشی کف و سپس سرعت برشی بستر  $u_{*b}$  را به دست آورد [24,23]. بنابراین سرعت برشی بستر در این روش از معادله (4) حاصل خواهد شد:

$$u_{*b} = \sqrt{(-\overline{u'w'})_{b(Ext)}} \quad (4)$$

که در آن  $(-\overline{u'w'})_{b(Ext)}$  مقدار تنش برشی رینولدز در محل برخورد خط برازش یافته با بستر می باشد. روش دیگر محاسبه سرعت برشی بستر استفاده از انرژی جنبشی آشفتگی<sup>1</sup> است. کیم و همکاران پیشنهاد کردند که بجای استفاده از انرژی جنبشی آشفتگی (با مشارکت سه مؤلفه آشفتگی)، از برون یابی خطی تنش رینولدز  $\overline{w'^2}$  (در محدوده خطی) تا بستر به صورت رابطه (5) استفاده شود [25].

$$u_{*b} = \sqrt{0.9(\overline{w'^2})_{b(Ext)}} \quad (5)$$

که در آن  $(\overline{w'^2})_{b(Ext)}$  مقدار تنش رینولدز در محل برخورد خط برازش یافته با بستر می باشد. بیرون و همکاران برای جریان در اطراف منحرف کننده های جریان (تنگ شونده گی و باز شونده گی) استفاده از این روش را برای تخمین سرعت برشی بستر توصیه نمودند [26].

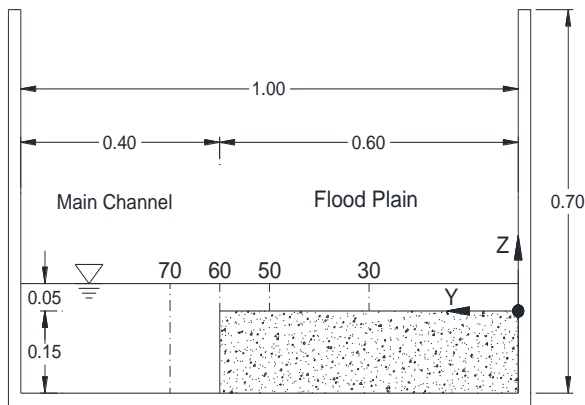
هدف اصلی در مطالعه حاضر، توصیف جریان آشفته در یک کانال مرکب با عمق کم آب در سیلابدشت و دیواره میانی قائم می باشد. بدین منظور سرعت طولی و ویژگی های آشفتگی جریان و سرعت برشی بستر در این شرایط مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفت. به این منظور الگوی جریان در یک کانال آزمایشگاهی به روش سرعت سنجی تصویری ذرات<sup>2</sup> اندازه گیری شد که در ادامه شرایط آزمایشگاهی توضیح داده می شود.

## 2- مواد و روش ها

آزمایش های حاضر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس در یک کانال مستقیم روباز با شیب ثابت 0.00033 و با مقطع مرکب به طول 11، عرض 1 و ارتفاع 0.7 متر انجام پذیرفت. کانال آزمایشگاهی مذکور، یک کانال با مقطع مرکب بوده که به علت تقارن، نیمی از آن ساخته شده است و نمای کلی آن در "شکل 1" ارائه شده است.

در این مطالعه محور  $x$  در راستای جریان اصلی و موازی بستر بوده و در جهت پایین دست مثبت است. محور  $z$  مربوط به راستای عمود بر جریان و جهت مثبت آن از کف بستر سیلابدشت به سمت بالا می باشد. در نهایت محور  $y$  در راستای عرضی بوده و از دیواره سیلابدشت به سمت کانال اصلی مثبت است. جداره های کانال به صورت قائم و از جنس شیشه بوده و برای تصویربرداری از جریان، مناسب می باشد. با توجه به زبری شیشه، عدد بی بعد زبری بستر بسیار کوچکتر از 3 و در نتیجه جداره های کانال از نظر هیدرولیکی صاف می باشند. جهت کاهش اثرات پایاب بر شرایط جریان یکنواخت، از یک سرریز قابل تنظیم در انتهای کانال استفاده شد. دبی ورودی کانال با استفاده از شیر تنظیم دبی خروجی از پمپ، کنترل و به وسیله یک دبی سنج الکترومغناطیسی اندازه گیری شد. به منظور حذف تلاطم در ابتدای کانال از صفحه های موازی آرام کننده جریان استفاده شده است.

شرایط هیدرولیکی آزمایش های انجام شده به طور خلاصه در جدول 1 ارائه شده است. براساس اطلاعات گزارش شده در این جدول، جریان در کانال مرکب دارای رژیم زیر بحرانی و کاملاً آشفته است. عمق جریان در سیلابدشت



**Fig. 1** The cross section of compound channel in the present study (All dimensions are in meters.)

شکل 1 مقطع عرضی کانال مرکب در مطالعه حاضر (کلیه ابعاد بر حسب متر است).

**جدول 1** شرایط هیدرولیکی آزمایش ها

Table 1 Hydraulic conditions of experiments	
0.05	عمق جریان در سیلابدشت (متر)
0.20	عمق جریان در کانال اصلی (متر)
4	نسبت عمق کانال اصلی به سیلابدشت
0.039	دبی (متر مکعب در ثانیه)
0.35	سرعت متوسط (متر در ثانیه)
0.34	عدد فرود
$2.8 \times 10^4$	عدد رینولدز

<sup>3</sup> Non-Intrusive

<sup>1</sup> Turbulent Kinetic Energy

<sup>2</sup> Particle Image Velocimetry

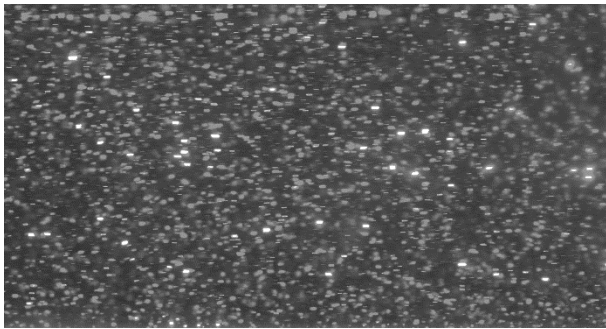


Fig. 3 An example of captured images

شکل 3 نمونه‌ای از تصاویر برداشت شده

فرکانس نمونه برداری مذکور برای اندازه گیری سرعت در کانال مرکب کافی به نظر می رسد [31,11]. براساس تحقیقات پیشین و با توجه به زیاد بودن نسبت قطر ذرات ردیاب به اندازه یک پیکسل در تصویر (بزرگتر از 3 تا 4) در مطالعه حاضر، عدم قطعیت در برآورد نتایج در مرتبه یکدهم تا یک بیستم قطر ذره خواهد بود [32].

### 3- نتایج و بحث

#### 3-1- توزیع سرعت طولی جریان در عمق

در "شکل 4" پروفیل سرعت طولی جریان در مقاطع مختلف در عرض کانال نشان داده شده است. همان طور که در "شکل 4" دیده می شود، شکل کلی پروفیل سرعت در سیلابدشت با پروفیل سرعت در کانال اصلی متفاوت است. میزان سرعت در صفحه 30 سانتی متری کمی از سرعت در صفحه 50 سانتی متری بزرگتر است (مخصوصاً در ترازهای بالاتر). دلیل این مشاهده به این موضوع برمی گردد که صفحه 30 سانتی متری که در وسط سیلابدشت قرار دارد، دارای بیشترین فاصله از دیواره سیلابدشت و همچنین ناحیه اندرکنش (که محل وقوع برش شدید بین کانال اصلی و سیلابدشت است) می باشد. کاهش سرعت صفحه 50 نسبت به صفحه 30 سانتی متری نشان می دهد که لایه برشی شکل گرفته در صفحه 50 سانتی متری به صورت یک مانع در برابر جریان عمل می کند. از طرفی بیشترین کاهش سرعت در صفحه 50 سانتی متری نسبت به صفحه 30 سانتی متری در سطح جریان رخ داده است. این پدیده نشان می دهد که در صفحه 50 سانتی متری در بخش پایینی

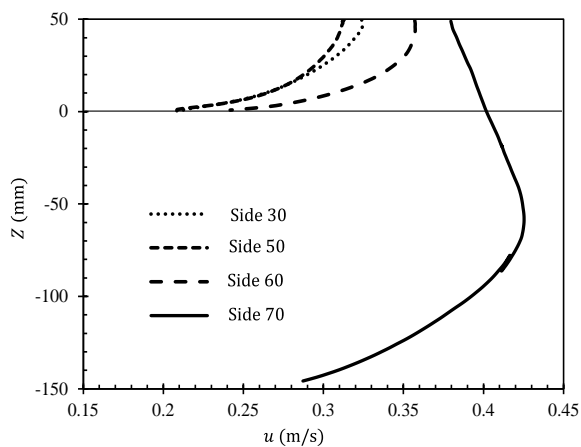


Fig. 4 The profile of streamwise flow velocity in depth at different positions in transverse direction

شکل 4 پروفیل سرعت طولی جریان در عمق برای مقاطع مختلف در عرض کانال

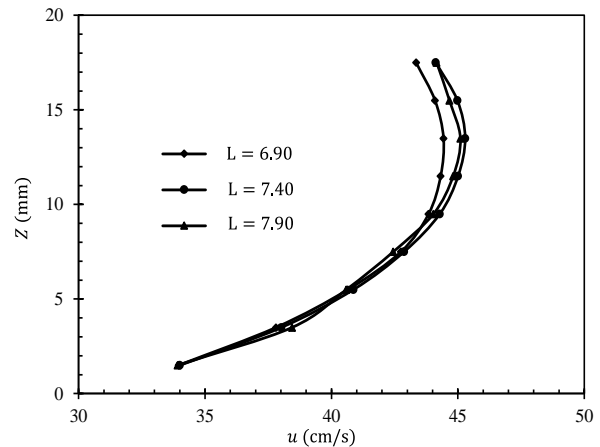


Fig. 2 The profile of streamwise flow velocity at the center of the main channel in three sections with the distances of 7.9, 7.4 and 6.9 meters from channel inlet

شکل 2 پروفیل سرعت طولی جریان در مرکز کانال اصلی در سه مقطع به فاصله 7.9، 7.4 و 6.9 متر از ورودی کانال

ذرات (ساخته شده به عنوان بخشی از تحقیق حاضر) به صورت دو بعدی و دومولفه‌ای در یک صفحه عمودی  $x-z$  استفاده شد. در این شرایط، دوربین در کناره کانال قرار داده و پرتو لیزر از بالای کانال تابیده شد. برای برداشت صفحه‌های 30، 50 و 60 سانتی متری، دوربین در کناره راست کانال و برای برداشت صفحه 70 سانتی متری، دوربین در کناره چپ کانال قرار داده شد. روش سرعت سنجی تصویری ذرات امکان اندازه گیری سرعت جریان در همه عمق‌ها را با دقت مناسب فراهم می کند، در حالی که اندازه گیری سرعت با سایر روش‌ها مانند روش سرعت سنج صوتی داپلر در نزدیکی سطح آب امکان پذیر نبوده و در نزدیکی جداره‌ها با خطا همراه است [28].

در تمامی اندازه گیری‌ها، دوربین پرسرعت مدل افاس 700<sup>1</sup> (محصول شرکت سونی) به همراه لنز ماکرو با فاصله کانونی 100 میلی متر مورد استفاده قرار گرفت. تصویربرداری از صفحه نورانی با کیفیت 2048x1080 پیکسل و سرعت 239.76 فریم در ثانیه و در حالت خام<sup>2</sup> انجام شد. برای روشن کردن صفحه برداشت از یک لیزر از نوع حالت جامد<sup>3</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 می کند. ذرات الک شده پلاویلایت<sup>4</sup> با اندازه 300 تا 600 میکرومتر و چگالی 1.03 گرم در سانتی متر مکعب به عنوان مواد ردیاب در آب استفاده شد. این نوع ذرات توسط پژوهشگران دیگر مانند ژانگ و نف نیز در روش سرعت سنجی تصویری ذرات به کار رفته است [29]. در هر برداشت مواد ردیاب در ورودی کانال تزریق شد. تزریق ذرات هدف (مواد ردیاب) به گونه‌ای انجام شد تا توزیع همگنی از این ذرات بدست آید. در "شکل 3" نمونه‌ای از تصاویر برداشت شده ارائه شده است.

پردازش و تحلیل تصاویر با استفاده از نرم افزار پی آی وی لب<sup>5</sup> انجام شد [30]. فاصله بردارهای سرعت بدست آمده در هر یک از صفحه‌های اندازه گیری حدود 1 میلی متر بوده است. زمان و فرکانس نمونه برداری به ترتیب حدود 240 هرتز و 80 ثانیه بوده است. براساس پژوهش‌های دیگر پژوهشگران زمان و

<sup>1</sup> FS 700

<sup>2</sup> Raw

<sup>3</sup> Solid State

<sup>4</sup> Pliolite

<sup>5</sup> PIVLab

شدت‌های آشفتگی در کانال‌های مستطیلی نیز گزارش شده است [22].

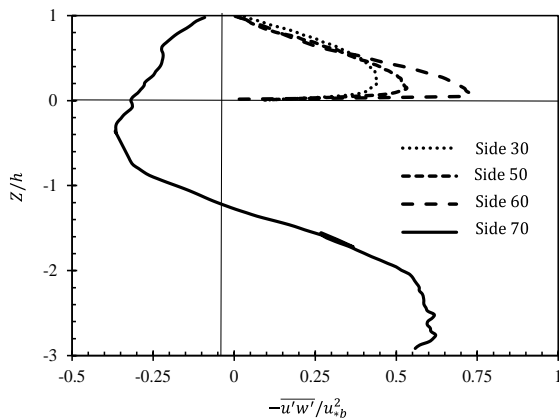


Fig. 5 The distribution of  $\overline{u'w'}/u_{*b}^2$  in depth at different positions in transverse direction

شکل 5 توزیع عمقی  $\overline{u'w'}/u_{*b}^2$  برای مقاطع مختلف در عرض کانال

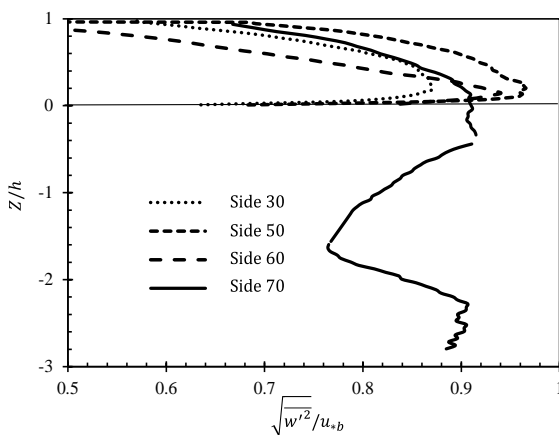


Fig. 6 The distribution of  $\sqrt{w'^2}/u_{*b}$  in depth at different positions in transverse direction

شکل 6 توزیع عمقی  $\sqrt{w'^2}/u_{*b}$  برای مقاطع مختلف در عرض کانال

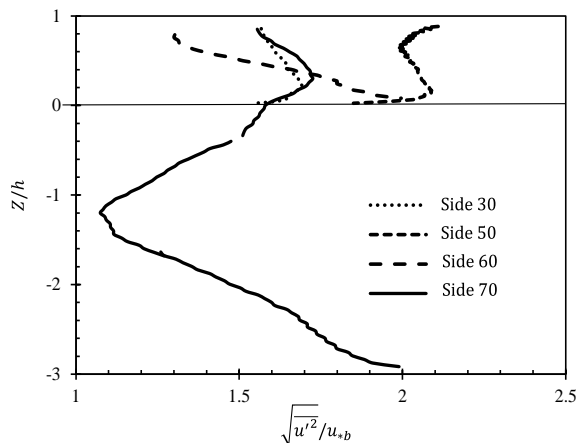


Fig. 7 The distribution of  $\sqrt{u'^2}/u_{*b}$  in depth at different positions in transverse direction

شکل 7 توزیع عمقی  $\sqrt{u'^2}/u_{*b}$  برای مقاطع مختلف در عرض کانال

در تمام عرض‌ها مقدار (قدر مطلق) تنش برشی رینولدز و شدت‌های آشفتگی با نزدیک شدن به سطح آب کاهش می‌یابند. تنها در صفحه 30 سانتی‌متری، شدت آشفتگی طولی با نزدیک شدن به سطح آب ابتدا کاهش و سپس افزایش

جریان (حدود 40 درصد عمق جریان از کف)، اثر تنش برشی کف غالب و در بخش بالایی جریان اثر لایه برشی آزاد غالب است.

سرعت در مقطع 60 سانتی‌متری به وضوح متأثر از جریان پرسرعت در کانال اصلی است و با حفظ شکل کلی پروفیل سرعت در سیلاب‌دشت، سرعت جریان به طور قابل توجهی از دیگر نقاط سیلاب‌دشت بیشتر است. نسبت سرعت طولی به سرعت حداکثر ( $U/U_{max}$ ) در مقطع سیلاب‌دشت در تحقیق‌های تامیناگاو و نزو کمتر از مقادیر  $U/U_{max}$  در مقاله حاضر است [11]. به عنوان مثال، متوسط نسبت  $U/U_{max}$  در مقطع اندرکنش در تحقیق‌های ایشان برابر 0.66 و در مطالعه حاضر برابر 0.83 است. زیرا در آزمایش‌های تامیناگاو و نزو در جریان کم‌عمق با دیواره‌های قائم و عمق نسبی مشابه، عمق جریان در سیلاب‌دشت برابر 2 سانتی‌متر در نظر گرفته شد، در حالی که عمق جریان سیلاب‌دشت در پژوهش حاضر برابر 5 سانتی‌متر می‌باشد.

همان‌طور که در "شکل 4" مشاهده می‌شود، سرعت حداکثر در کانال اصلی (صفحه 70 سانتی‌متری) در تراز پایین‌تر از کف سیلاب‌دشت  $Z = -58 \text{ mm}$  رخ می‌دهد. انتقال محل سرعت حداکثر از نزدیکی سطح آب به عمق جریان<sup>1</sup> در کانال اصلی، به دلیل وقوع جریان‌های ثانویه قوی است که در جریان کم‌عمق، شدت بیشتری نیز دارد. این جریان‌های ثانویه در سطح جریان و گوشه‌های کانال‌های غیردایروی کم‌عرض به دلیل ناهمسانی آشفتگی ایجاد می‌شوند. انتقال محل سرعت حداکثر در مرکز کانال اصلی به فاصله 20 سانتی‌متر از سیلاب‌دشت نیز مشاهده شده است. تشکیل سرعت حداکثر در تراز پایین‌تر از کف سیلاب‌دشت با نتایج کارا و همکاران [33] و تامیناگاو و نزو [11] همخوانی دارد. لازم به توضیح است که وقوع حداکثر سرعت جریان در زیر سطح آب در کانال‌های مستطیلی غیرعریض (با نسبت عرض به عمق کمتر از 5) نیز اتفاق می‌افتد [22]. استوکینو و بروکینی سرعت در سطح جریان در یک کانال مرکب با دیواره میانی مایل و جریان کم‌عمق را اندازه‌گیری کرده و بیان نمودند که تغییرات مقادیر سرعت در سطح جریان در عرض کانال (از کانال اصلی به سیلاب‌دشت) نزولی است [15]، در حالی که در تحقیق حاضر سرعت در سطح جریان (سرعت جریان در ارتفاع 50 میلی‌متر در شکل 5) در عرض کانال (از کانال اصلی به سیلاب‌دشت) به صورت کاملاً نزولی نیست.

### 3-2- تنش‌های رینولدز مرتبه دوم

در "شکل 5" توزیع عمقی تنش برشی رینولدز بی‌بعد  $\overline{u'w'}/u_{*b}^2$  در سرعت برشی بستر) و در "شکل 6 و 7" به ترتیب توزیع عمقی شدت آشفتگی بی‌بعد قائم  $\sqrt{w'^2}/u_{*b}$  و طولی  $\sqrt{u'^2}/u_{*b}$  در نقاط مختلف کانال ارائه شده است. سرعت برشی بستر با استفاده از برون‌یابی تنش برشی رینولدز در محدوده خطی تا بستر به دست آمد که به تفصیل در بخش بعد به آن پرداخته خواهد شد. مشابه کانال‌های مستطیلی، مقادیر شدت آشفتگی طولی همواره بزرگتر از شدت آشفتگی قائم بوده است. در سیلاب‌دشت (صفحه‌های 30، 50 و 60 سانتی‌متری)، تنش برشی رینولدز و شدت‌های آشفتگی از بستر با مقدار بسیار کوچک نزدیک به صفر با گرادیان شدید به حداکثر مقدار خود در نزدیکی بستر می‌رسند. این تغییرات شدید به علت گرادیان شدید سرعت در نزدیکی بستر رخ می‌دهد. با افزایش فاصله از کف، تنش برشی رینولدز و شدت‌های آشفتگی با تغییرات نسبتاً خطی کاهش می‌یابند. لازم به توضیح است که رفتار خطی تنش برشی رینولدز و همچنین رفتار تقریباً خطی

<sup>1</sup> Velocity Dip

می‌یابد. این افزایش مقدار شدت آشفتگی طولی در نزدیکی سطح آب در کانال ساده و به دلیل بروز امواج سطحی نیز مشاهده شده است [16]. مقدار متوسط شدت آشفتگی طولی و قائم بی‌بعد در مقطع 50 سانتی-متری به ترتیب 25 و 12 درصد بیش از مقطع 30 سانتی-متری می‌باشد. بنابراین میزان آشفتگی با نزدیک شدن به ناحیه اندرکنش در حال افزایش است. این در حالی است که در مقطع 60 سانتی-متری، متوسط شدت آشفتگی قائم نسبت به مقطع 50 سانتی-متری تغییر قابل توجهی ندارد، اما شدت آشفتگی طولی به خصوص در ارتفاع بالاتر نسبت به صفحه 50 سانتی-متری به شدت کاهش می‌یابد.

در کانال اصلی (مقطع 70 سانتی-متری) سرعت جریان در محدوده 4 میلی-متری کف، اندازه‌گیری نشده و بنابراین کاهش تنش‌های رینولدز با گرادیان شدید تا بستر در این نتایج ارائه نشده است. تنش برشی رینولدز در کانال اصلی در محل وقوع سرعت حداکثر، تغییر علامت می‌دهد. این تغییر علامت در نتایج پژوهش‌های سایر پژوهشگران نیز قابل مشاهده است [33]. تغییر علامت تنش برشی رینولدز در محل سرعت حداکثر با استفاده از فرضیه بوزینسک قابل توجیه است. بدین ترتیب که به دلیل صفر بودن  $\partial U/\partial z$  سرعت متوسط طولی و  $z$  محور قائم) در محل سرعت حداکثر و همچنین  $\partial W/\partial x$  (سرعت متوسط قائم و  $x$  محور طولی) به دلیل توسعه‌یافتگی جریان، تنش برشی رینولدز  $-\overline{u'w'}$  که بر اساس فرضیه بوزینسک معادل  $v_t(\partial U/\partial z + \partial W/\partial x)$  می‌باشد، نیز برابر صفر خواهد بود. در کانال مستطیلی کم‌عرض نیز که سرعت حداکثر در پایین سطح آزاد رخ می‌دهد، در محل سرعت حداکثر تنش برشی رینولدز تغییر علامت می‌دهد [22]. به همین ترتیب علت منفی شدن تنش برشی رینولدز از سطح آزاد تا عمق حداکثر سرعت، منفی شدن  $\partial U/\partial z$  در این ناحیه است.

در کانال اصلی (مقطع 70 سانتی-متری) شدت آشفتگی طولی بی‌بعد  $(\sqrt{u'^2}/u_{*b})$  در راستای عمق دارای سه رفتار متفاوت است (شکل 7). در بازه اول (از کمی دورتر از بستر تا محل وقوع سرعت حداکثر) شدت آشفتگی طولی با فاصله گرفتن از بستر کانال کاهش می‌یابد و در محل تقریبی حداکثر سرعت ( $Z/h = -1.2$ )، شدت آشفتگی طولی به حداقل مقدار خود می‌رسد. علت وقوع حداکثر نوسانات سرعت طولی  $u'$  و در نتیجه شدت آشفتگی طولی در نزدیکی بستر و حداقل شدت آشفتگی طولی در محل سرعت حداکثر، گرادیان شدید سرعت طولی در راستای عمق در نزدیکی بستر و گرادیان صفر آن در محل سرعت حداکثر است. وقوع حداقل شدت آشفتگی طولی در محل حداکثر سرعت، در کانال‌های مستطیلی کم‌عرض نیز گزارش شده است [22]. در بازه دوم ( $-1.2 < Z/h < 0.3$ ) مقدار شدت آشفتگی طولی با افزایش فاصله از بستر و با نزدیک شدن به تراز بستر سیلاب‌دشت افزایش می‌یابد. زیرا در اثر اختلاط جریان کانال اصلی و سیلاب‌دشت در ترازهای نزدیک به بستر سیلاب‌دشت (که به دلیل نزدیکی به بستر سیلاب‌دشت و همچنین قرارگیری در لایه برشی آزاد، دارای نوسانات سرعت طولی  $u'$  زیادی است)، مقدار نوسانات سرعت طولی  $u'$  و در نتیجه شدت آشفتگی طولی در این ناحیه افزایش می‌یابد. در نهایت در بازه سوم (از  $Z/h = 0.3$  تا نزدیکی سطح آب) مقدار شدت آشفتگی طولی مجدداً کاهش می‌یابد. علت کاهش مقدار نوسانات سرعت طولی در نزدیکی سطح آب دور شدن از نواحی تولید آشفتگی (بستر و لایه برشی آزاد) و تاثیر سطح آزاد است. بدین ترتیب رفتار شدت آشفتگی طولی در راستای عمق را می‌توان با سه معادله خطی در سه بازه مذکور تخمین زد. چنین رفتاری برای شدت آشفتگی طولی در راستای عمق در

کانال اصلی (در مقطع نزدیک به ناحیه اندرکنش و با فاصله از مرکز کانال اصلی) در پژوهش‌های تامیناگاو و نزو [11] (با عمق نسبی 4) نیز مشاهده شده است. با توجه به توضیحات ارائه شده عوامل موثر در شکل‌گیری این تغییرات، تراز کف کانال اصلی، تراز وقوع سرعت حداکثر، تراز کف سیلاب-دشت، ناحیه برقراری لایه برشی آزاد (که در اطراف تراز سیلاب‌دشت است) و محل سطح آزاد جریان است. بدین ترتیب که کف کانال اصلی و کف سیلاب-دشت و ناحیه برقراری لایه برشی آزاد نقاط شدت گرفتن نوسانات سرعت و محل رخداد سرعت بیشینه و سطح آزاد جریان نقاط مستهلک شدن نوسانات سرعت محسوب می‌شوند.

از طرفی در کانال اصلی (مقطع 70 سانتی-متری) شدت آشفتگی قائم در راستای عمق دارای چهار رفتار متفاوت است. شدت آشفتگی قائم در 20 درصد پایینی عمق جریان تغییرات کمی دارد. به نظر می‌رسد این پدیده با شکل‌گیری گردابه بستر مرتبط باشد [22]. مشابه روند تغییرات شدت آشفتگی طولی، با افزایش فاصله از بستر و با نزدیک شدن به تراز بستر سیلاب‌دشت، شدت آشفتگی قائم ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. محل تغییر شیب ( $Z/h = -1.7$ ) کمی پایین‌تر از نقطه وقوع حداکثر سرعت است. بیشترین مقدار شدت آشفتگی قائم در اعماق نزدیک تراز سیلاب‌دشت رخ می‌دهد که به دلیل نزدیکی بیشتر به محل اتصال کانال اصلی و سیلاب‌دشت است. همان‌طور که انتظار می‌رود با نزدیک شدن به سطح جریان از میزان شدت آشفتگی قائم کاسته می‌شود. همان‌طور که گفته شد اندازه‌گیری میدان جریان در فاصله 4 میلی-متری بستر انجام نشد و بنابراین تعداد رفتارهای متفاوت شدت آشفتگی طولی و قائم در راستای عمق بدون در نظر گرفتن ناحیه با گرادیان شدید در مجاورت بستر لحاظ شده است. قابل ذکر است که رفتارهای مختلف تنش برشی رینولدز و شدت‌های آشفتگی در کانال اصلی، در جریان با عمق نسبی بیشتر نیز مشاهده شده است.

شکل کلی توزیع شدت‌های آشفتگی در ناحیه اندرکنش یک کانال مرکب با دیواره میانی مایل با عمق کم جریان در سیلاب‌دشت مشابه شکل کلی چند بخشی گفته‌شده برای کانال مرکب با دیواره میانی قائم متفاوت است. در پژوهش‌های نایت و شیانو در کانال مرکب با دیواره میانی مایل با عمق نسبی 4، حداکثر دو رفتار متفاوت برای شدت‌های آشفتگی قابل تشخیص است [4]. کوزیول توزیع عمقی شدت‌های آشفتگی را در یک کانال مرکب با کناره‌های شیب‌دار مورد بررسی قرار داد و در کانال اصلی دو ناحیه پایین تراز سیلاب‌دشت (که متاثر از بستر و جداره کانال اصلی است) و بالای تراز سیلاب‌دشت (که متاثر از فرآیند اندرکنش بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت است) با دو رفتار متفاوت در شدت‌های آشفتگی تشخیص داد [14]. علت عدم وقوع بیش از دو رفتار متفاوت در این پژوهش‌ها آن است که در شرایط آزمایشگاهی این تحقیقات سرعت بیشینه در بالای تراز سیلاب‌دشت و حتی در نزدیکی سطح آب رخ داده است که این پدیده خود نشان‌دهنده قدرت کمتر جریان‌های ثانویه در شرایط آزمایشگاهی مذکور با دیوار میانی مایل نسبت به آزمایشات پژوهش حاضر است. بدین ترتیب به دلیل قدرت کمتر جریان‌های ثانویه در کانال مرکب با دیواره مایل و فاصله کم تراز سیلاب‌دشت، محل وقوع لایه برشی آزاد و تراز سرعت حداکثر، توزیع عمقی شدت‌های آشفتگی در کانال مرکب با دیواره مایل دارای تغییرات کمتری است.

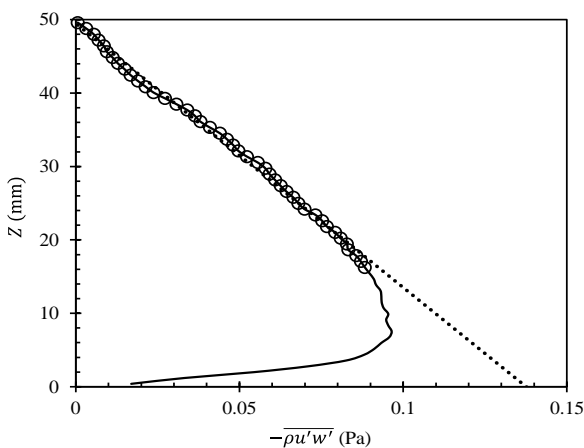
### 3-3- سرعت برشی

<sup>1</sup> Bottom Vortex

وضوح تصویر و طبیعت سه بعدی جریان در ناحیه اندرکنش بوده است. اما کاهش  $Z^+$  حداقل در صفحه 70 سانتی متری به دلیل عدم اندازه گیری سرعت جریان در فاصله 4 میلی متر از کف کانال اصلی (به دلیل نوع پایه دوربین) بوده است.

روش های سوم و چهارم تعیین سرعت برشی بستر بر اساس توزیع تنش های رینولدز  $-\rho \overline{u'w'}$  و  $\rho \overline{w'^2}$  در عمق و برون یابی خط برازش داده شده تا بستر می باشند. برای نمونه در "شکل 9" نحوه برون یابی  $-\rho \overline{u'w'}$  در صفحه 50 سانتی متری ارائه شده است. در سیلابدشت، تنش های رینولدز از سطح آب تا نزدیک بستر تقریباً بصورت خطی افزایش یافته و سپس با گرادیان شدید کاهش می یابند. این روند توسط بیرون و همکاران در کانال های مستطیلی هم گزارش شده است [26]. شایان ذکر است که در پژوهش های آزمایشگاهی انجام شده در کانال مرکب (که عمدتاً اندازه گیری توسط سرعت سنج صوتی داپلر در نزدیکی بستر، روند کاهشی تنش های رینولدز در نزدیکی بستر گزارش نشده است. در کانال اصلی (صفحه 70 سانتی متری) تنش های رینولدز در ترازهای پایین تر از کف سیلابدشت، یک رفتار خطی داشته و در نزدیکی بستر مقدار ثابتی به خود می گیرند و به دلیل عدم اندازه گیری سرعت جریان در محدوده 4 میلی متری کف، کاهش تنش های رینولدز با گرادیان شدید تا بستر در این نتایج ارائه نشده است. در انتخاب محدوده برازش خط در کلیه مقاطع بررسی شده، فقط محدوده دارای رفتار خطی انتخاب شده است [36,35] که در نمودار "شکل 9" با دایره های توخالی نشان داده شده اند. در این شکل که منحنی تنش برشی رینولدز در صفحه 50 سانتی متری را در راستای عمق نشان می دهد، محدوده خطی تنش برشی رینولدز در بازه  $210 < Z^+ < 635$  می باشد. در صفحه های 30 و 60 سانتی متری به ترتیب در بازه های  $345 < Z^+ < 760$  و  $95 < Z^+ < 745$  تنش برشی رینولدز دارای روند خطی است.

در "شکل 10" نتایج سرعت برشی بدست آمده از روش های مختلف به همراه عدم قطعیت آن ها (که به صورت میله های عمودی در نقاط اندازه گیری مشخص هستند) ارائه شده است. عدم قطعیت اندازه گیری اطلاعاتی راجع به کیفیت نتایج حاصل از اندازه گیری را بیان می کند. در حقیقت عدم قطعیت

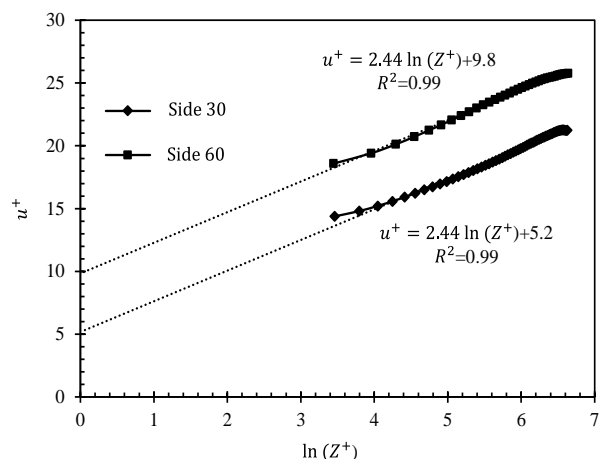


**Fig. 9** The distribution of  $-\rho \overline{u'w'}$  in depth at floodplain (the section of 50 centimeters), Hollow points are used for line fitting and extrapolation.

شکل 9 توزیع عمقی  $-\rho \overline{u'w'}$  در سیلابدشت (صفحه 50 سانتی متری)، نقاط توخالی جهت برازش خط و برون یابی مورد استفاده قرار گرفته اند.

برای بدست آوردن سرعت برشی در چهار موقعیت مختلف در عرض کانال (به فاصله 30، 50، 60 و 70 سانتی متر از دیواره سیلابدشت) از چهار روش ذکر شده در بخش مقدمه استفاده شده است. ابتدا با فرض برقراری جریان یکنواخت (برابری شیب کف کانال و شیب خط انرژی)، سرعت برشی بستر از رابطه (1) محاسبه شد. در روش قاعده لگاریتمی با رسم منحنی  $u$  برحسب  $\ln z$  و برازش یک خط به آن، مقدار سرعت برشی بستر را می توان همان طور که در رابطه (2) قابل مشاهده است، از شیب خط بدست آورد. برای مقایسه پروفیل سرعت در کانال مرکب با پروفیل لگاریتمی سرعت در کانال مستطیلی با بستر صاف، در "شکل 8" نمودار  $u^+ = u/u_{*b}$  برحسب  $\ln(Z^+)$  در کل عمق جریان برای دو صفحه 30 و 60 سانتی متری ارائه شده است. همان طور که در "شکل 8" مشاهده می شود شیب خطوط برازش داده شده یکسان و برابر  $1/\kappa = 2.44$  است. عرض از مبدا خط مربوط به صفحه 30 سانتی متری نزدیک به مقادیر ذکر شده برای کانال مستطیلی با بستر صاف (برابر با 5.3) است [19]. در حالی که عرض از مبدا خط مربوط به صفحه 60 سانتی متری برابر با 8.2 است که با مقدار مشاهده شده برای بسترهای صاف بسیار متفاوت است. علت این پدیده وجود جریان های قوی ثانویه در این مقطع است که با فرضیات معادله لگاریتمی همخوانی ندارد، در حالی که در صفحه 30 سانتی متری (که در وسط سیلابدشت قرار دارد) فرض یک جریان توسعه یافته برقرار است [6].

البته باید توجه داشت که در تعیین سرعت برشی بستر بر اساس روش پروفیل لگاریتمی در یک جریان پیچیده و سه بعدی، باید استفاده از معادله سرعت را به ناحیه  $30 < Z^+ < 300$  که محدوده نسبی صحت رابطه لگاریتمی است (به دلیل یک سو شدن جریان در منطقه نزدیک بستر و دور از زیرلایه ورقه ای)، محدود نمود [34,21]. بنابراین در این مقاله برای محاسبه سرعت برشی بستر از رابطه لگاریتمی در این بازه استفاده شد. لازم به توضیح است که بر اساس توضیحات ارائه شده در بخش مواد و روش ها در خصوص فاصله بردارهای سرعت، کمترین مقدار  $Z^+$  برداشت شده در صفحه های 30 و 50 تقریباً برابر 5، در صفحه 60 برابر 10 و در صفحه 70 سانتی متری معادل 57 بوده است. علت افزایش مقدار  $Z^+$  حداقل در صفحه 60 نسبت به صفحه های 30 و 50 سانتی متری، افزایش فاصله بردارهای سرعت به دلیل کاهش



**Fig. 8** The changes of  $u^+ = u/u_{*b}$  Vs.  $\ln(Z^+)$  for total flow depth at two sections with the distances of 30 and 60 centimeters from floodplain wall

شکل 8 نمودار  $u^+ = u/u_{*b}$  برحسب  $\ln(Z^+)$  در تمام عمق جریان برای دو مقطع به فاصله 30 و 60 سانتی متر از دیواره سیلابدشت

هستند و اختلاف بین مقادیر برآورد شده از روش‌های لگاریتمی و برون‌یابی تنش رینولدز قائم  $w'^2$  نسبت به روش برون‌یابی تنش برشی رینولدز  $-u'w'$  حداکثر حدود 15 درصد است که با توجه خطای اندازه‌گیری و خطای برآورد سرعت برشی با استفاده از روش‌های مختلف، قابل قبول است.

#### 4- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر به بررسی ساختار جریان در یک کانال مرکب با عمق کم سیلابدشت (نسبت عمق کانال اصلی به سیلابدشت بیشتر از 3) و دیواره میانی قائم پرداخته شد. به این منظور الگوی جریان توسط روش سرعت-سنجی تصویری ذرات برداشت گردید. به دلیل وجود جریان کم‌عمق در سیلابدشت و عرض کم کانال اصلی نسبت به عمق جریان، سرعت حداکثر در کانال اصلی در تراز پایین‌تر از کف سیلابدشت رخ می‌دهد. هندسه کانال و عمق نسبی جریان تأثیر قابل توجهی در ساختار جریان در کانال مرکب دارد. در پژوهش‌های قبلی [14] توزیع عمقی شدت‌های آشفتگی در کانال اصلی یک کانال مرکب با کناره‌های شیب‌دار در دو ناحیه پایین و بالای تراز سیلابدشت با دو رفتار متفاوت در شدت‌های آشفتگی تشخیص داده شد. این در حالی است که در این تحقیق توزیع عمقی شدت آشفتگی طولی و تنش برشی رینولدز دارای سه رفتار و شدت آشفتگی قائم دارای چهار رفتار است. این تفاوت در توزیع عمقی شدت‌های آشفتگی بیانگر تأثیر قابل توجه زاویه قرارگیری دیواره میانی است.

بررسی سرعت برشی از طریق روش‌های مختلف نشان می‌دهد که سرعت برشی در کف سیلابدشت تقریباً ثابت است و با نزدیک شدن به ناحیه اندرکنش و کانال اصلی افزایش می‌یابد.

#### 5- مراجع

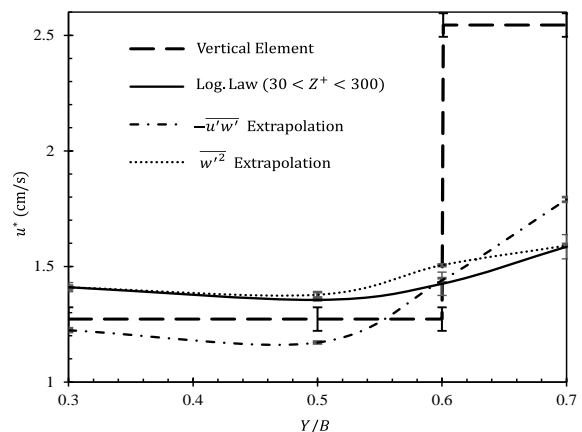
- [1] B. C. Van Prooijen, J. A. Battjes, W. S. Uijtewaald, Momentum exchange in straight uniform compound channel flow, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 131, No. 3, pp. 175-183, 2005.
- [2] A. Koziol, Scales of turbulent eddies in a compound channel, *Acta Geophysica*, Vol. 63, No. 2, pp. 514-532, 2015.
- [3] R. H. J. Sellin, A laboratory investigation into the interaction between the flow in the channel of a river and that over its flood plain, *La Houille Blanche*, Vol. 19, No. 7, pp. 793-802, 1964.
- [4] D. Knight, K. Shiono, Turbulence measurements in a shear layer region of a compound channel, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 28, No. 2, pp. 175-196, 1990.
- [5] W. Czernuszenko, A. Koziol, P. M. Rowiński, Measurements of 3D turbulence structure in a compound channel, *Arch Hydro-Eng Environ Mech*, Vol. 54, No. 1, pp. 3-21, 2007.
- [6] Y. Joung, S. U. Choi, Investigation of twin vortices near the interface in turbulent compound open-channel flows using DNS data, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 134, No. 12, pp. 1744-1756, 2008.
- [7] K. Shiono, D. W. Knight, Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 222, pp. 617-646, 1991.
- [8] I. Nezu, T. Nakayama, Space-time correlation structures of horizontal coherent vortices in compound open-channel flows by using particle-tracking velocimetry, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 35, No. 2, pp. 191-208, 1997.
- [9] G. Besio, A. Stocchino, S. Angiolani, M. Brocchini, Transversal and longitudinal mixing in compound channels, *Water Resources Research*, Vol. 48, No. 12, pp. W12517, 2012.
- [10] A. Stocchino, G. Besio, S. Angiolani, M. Brocchini, Lagrangian mixing in straight compound channels, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 675, pp. 168-198, 2011.
- [11] A. Tominaga, I. Nezu, Turbulent structure in compound open-channel flows, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 117, No. 1, pp. 21-41, 1991.

شک و گمانی است که درباره نتیجه هر اندازه‌گیری پدید می‌آید. عدم قطعیت در روش المان قائم مربوط به عدم قطعیت موجود در تعیین ترم‌های معادله (1) (عمق و شیب کانال) است. در ارتباط با روش معادله لگاریتمی، تنش برشی رینولدز و ممان مرتبه دوم سرعت قائم، عدم قطعیت مربوط به برازش خط به داده‌ها می‌باشد. محور افقی نمودار "شکل 10" نسبت فاصله نقطه از دیواره سیلابدشت به عرض کانال (1 متر) است.

با مشاهده "شکل 10" می‌توان دریافت که سرعت برشی بستر برآورد شده از روش المان قائم در سیلابدشت (صفحه‌های 30 و 50) با روش‌های لگاریتمی، برون‌یابی تنش رینولدز قائم  $w'^2$  و برون‌یابی تنش برشی رینولدز  $-u'w'$  همخوانی دارد. اما در مقطع اندرکنش (صفحه 60) و مخصوصاً در کانال اصلی (صفحه 70) مقادیر به‌دست آمده از روش المان قائم متفاوت از دیگر روش‌هاست. علت خطای زیاد این روش در کانال اصلی، ناچیز فرض کردن تنش برشی بین المان‌های عمودی سیال در رابطه (1) و عدم برقراری این فرض در جریان با عمق زیاد در کانال اصلی است. از طرفی در اثبات رابطه (1) از هرگونه انتقال مومنتم توسط جریان‌های ثانویه صرف نظر شده است، که این فرض نیز در ناحیه اندرکنش و صفحه 70 (که متأثر از ناحیه اندرکنش است) برقرار نیست.

همان‌طور که در "شکل 10" مشاهده می‌شود، برآورد سرعت برشی بستر با استفاده از روش‌های لگاریتمی (در ناحیه  $30 < Z^+ < 300$ ) و برون‌یابی تنش رینولدز قائم  $w'^2$  تطابق خوبی دارند. از تغییرات سرعت برشی بستر (به دست آمده از روش‌های لگاریتمی، برون‌یابی تنش رینولدز قائم  $w'^2$  و برون‌یابی تنش برشی رینولدز  $-u'w'$ ) در عرض کانال می‌توان دریافت که سرعت برشی در کف سیلابدشت (صفحه‌های در موقعیت 30 و 50 سانتی‌متری از جداره جانبی سمت راست) تقریباً ثابت است و با نزدیک شدن به ناحیه اندرکنش و کانال اصلی افزایش می‌یابد. این روند با تغییرات تنش برشی در کانال مرکب کم‌عمق با دیواره‌های قائم مطابقت دارد [38,37]. علت افزایش سرعت برشی بستر در کانال اصلی و ناحیه اندرکنش نسبت به سیلابدشت، افزایش گرادیان سرعت طولی و در نتیجه تنش برشی بستر در کانال اصلی نسبت به سیلابدشت است.

مقادیر به‌دست آمده سرعت برشی از روش‌های مختلف به هم نزدیک



**Fig. 10** Shear velocities at different sections of channel estimated by several methods with their uncertainties ( $Y$  is the distance from floodplain wall and  $B$  is the channel width equal to 1 meter.)

شکل 10 سرعت برشی در نقاط مختلف کانال برآورد شده توسط روش‌های گوناگون به همراه عدم قطعیت آن‌ها ( $Y$  فاصله نقطه از دیواره سیلابدشت و  $B$  عرض کانال (1 متر) است.)



- Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 29, No. 11, pp. 1403-1415, 2004.
- [27] S. Proust, J. N. Fernandes, Y. Peltier, J. B. Leal, N. Riviere, A. H. Cardoso, Turbulent non-uniform flows in straight compound open-channels, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 51, No. 6, pp. 656-667, 2013.
- [28] 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. 3, pp. 446-458, 2001.
- [29] X. Zhang, H. M. Nepf, Exchange flow between open water and floating vegetation, *Environmental Fluid Mechanics*, Vol. 11, No. 5, pp. 531-546, 2011.
- [30] 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.
- [31] K. Shiono, T. Feng, Turbulence measurements of dye concentration and effects of secondary flow on distribution in open channel flows, *Journal Of Hydraulic Engineering*, Vol. 129, No. 5, pp. 373-384, 2003.
- [32] A. Prasad, R. Adrian, C. Landreth, P. Offutt, Effect of resolution on the speed and accuracy of particle image velocimetry interrogation, *Experiments in Fluids*, Vol. 13, No. 2, pp. 105-116, 1992.
- [33] 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.
- [34] S. B. Pope, *Turbulent Flows*, pp. 264-322, Cambridge: Cambridge Univ Press, 2000.
- [35] S. Mohajeri, S. Grizzi, M. Righetti, G. P. Romano, V. Nikora, The structure of gravel-bed flow with intermediate submergence: A laboratory study, *Water Resources Research*, Vol. 51, No. 11, pp. 9232-9255, 2015.
- [36] W. Graf, T. Song, Bed-shear stress in non-uniform and unsteady open-channel flows, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 33, No. 5, pp. 699-704, 1995.
- [37] N. Rajaratnam, R. Ahmadi, Hydraulics of channels with flood-plains, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 19, No. 1, pp. 43-60, 1981.
- [38] P. Rameshwaran, P. S. Naden, Three-dimensional numerical simulation of compound channel flows, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 129, No. 8, pp. 645-652, 2003.
- [12] W. Myers, Momentum transfer in a compound channel, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 16, No. 2, pp. 139-150, 1978.
- [13] A. Holden, C. James, Boundary shear distribution on flood plains, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 27, No. 1, pp. 75-89, 1989.
- [14] A. Koziol, Three-dimensional turbulence intensity in a compound channel, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 139, No. 8, pp. 852-864, 2013.
- [15] A. Stocchino, M. Brocchini, Horizontal mixing of quasi-uniform straight compound channel flows, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 643, pp. 425-435, 2010.
- [16] I. Nezu, *Turbulent Structure in Open-Channel Flows*, PhD Thesis, Kyoto university, Kyoto, 1977.
- [17] S. R. Khodashenas, K. E. K. Abderrezzak, A. Paquier, Boundary shear stress in open channel flow: A comparison among six methods, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 46, No. 5, pp. 598-609, 2008.
- [18] H. Schlichting, *Boundary Layer Theory*, 7th edition, pp. 596-631, New York: McGraw-Hill, 1987.
- [19] I. Nezu, W. Rodi, Open-channel flow measurements with a laser Doppler anemometer, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 112, No. 5, pp. 335-355, 1986.
- [20] C. Hu, Z. Ji, Q. Guo, Flow movement and sediment transport in compound channels, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 48, No. 1, pp. 23-32, 2010.
- [21] M. Sanjou, I. Nezu, K. Itai, Space-time correlation and momentum exchanges in compound open-channel flow by simultaneous measurements of two-sets of ADVs, *Proceeding of River Flow*, pp. 495-502, Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau, 2010.
- [22] I. Nezu, *Turbulence in Open-Channel Flows*, pp. 48-130, Rotterdam: Balkema, 1993.
- [23] X. Chen, Y. M. Chiew, Response of velocity and turbulence to sudden change of bed roughness in open channel flow, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 129, No. 1, pp. 35-43, 2003.
- [24] V. Nikora, D. Goring, Flow turbulence over fixed and weakly mobile gravel beds, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 126, No. 9, pp. 679-690, 2000.
- [25] S. C. Kim, C. Friedrichs, J. Y. Maa, L. Wright, Estimating bottom stress in tidal boundary layer from acoustic Doppler velocimeter data, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 126, No. 6, pp. 399-406, 2000.
- [26] P. M. Biron, C. Robson, M. F. Lapointe, S. J. Gaskin, Comparing different methods of bed shear stress estimates in simple and complex flow fields,