مجله مهندسی مکانیک مدرس، آبان 1396، دوره 17، شماره 8، ص‌ص 164-172

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مطالعه تجربی جریان آشفته در یک کانال مرکب با عمق کم سیلاب‌دشت به‌کمک سرعت‌سنجی تصویری ذرات

مصطفی نبی‌پور[1]، سید علی اکبر صالحی نیشابوری[2*]، سید حسین مهاجری[3]، امیر رضا زراتی[4]، محمد ضابطیان طرقی[5]

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

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

چکیده

در کانال‌های مرکب علاوه بر جریان برشی ناشی از کف (جریان لایه مرزی)، نیروهای دیگری توسط انتقال مومنتم بین کانال اصلی و سیلاب-دشت‌ها (لایه برشی آزاد) نیز ایجاد می‌شود. به‌دلیل 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. به‌منظور 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 آشفتگی در کانال اصلی دارای دو رفتار متفاوت در دو ناحیه پایین و بالای تراز سیلاب‌دشت است، در مطالعه حاضر برای پروفیل شدت آشفتگی طولی و تنش برشی رینولدز در عمق، سه رفتار متفاوت (کاهشی و یا افزایشی) و برای شدت آشفتگی 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.

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

Mostafa Nabipour[1], Seyed Ali Akbar Salehi Neyshabouri[1*], Seyed Hossein Mohajeri[2], Amir Reza Zarrati[3], Mohammad Zabetian Toroghi[4]

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:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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)

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 بزرگ‌مقیاس[1] و تبادل مومنتم[2] شدید بین دو مقطع کم‌عمق 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 مومنتم به‌وسیله لایه برشی آزاد[3] بین مناطق عمیق و کم‌عمق ایجاد می‌شود [2]. نیروهای بازدارنده حاصل از انتقال مومنتم از کانال اصلی (با مومنتم بیشتر) به سیلاب‌دشت (با مومنتم کمتر)، باعث کاهش دبی کانال اصلی، افزایش دبی سیلاب‌دشت و کاهش ظرفیت انتقال جریان رودخانه می‌شود [3,4]. علی‌رغم پژوهش‌های انجام‌شده در مورد کانال مرکب، طبیعت سه‌بعدی گردابه‌ها و پیچیدگی‌های آشفتگی جریان در ناحیه اندرکنش هنوز بطور کامل مشخص نشده است [5].

در کانال مرکب دو نوع گردابه بزرگ‌مقیاس با محور عمودی و طولی (جریان‌های ثانویه[4]) تشکیل می‌شود [6]. تراکم و ویژگی‌های گردابه‌های بزرگ‌مقیاس در کانال مرکب به تغییرات عمق جریان وابسته است [7]. بر اساس عمق نسبی (نسبت عمق کانال اصلی به سیلاب‌دشت)، سه نوع جریان کم‌عمق، بینابینی و عمیق قابل تشخیص است [8-10]. جریان کم‌عمق 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 حالی‌که در جریان عمیق با عمق نسبی کمتر از 2، میزان برش در ناحیه اندرکنش کاهش یافته و گردابه‌های بزرگ‌مقیاس 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 آشفتگی 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 سرعت‌سنج صوتی داپلر[5] و سرعت‌سنج لیزری داپلر[6] با دقت کافی قابل انجام نیست [16]. بنابراین بررسی میدان جریان و ویژگی‌های آشفتگی 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 آشفتگی 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[7] یا نیروسنج قابل انجام است که این روش‌ها به تجهیزات خاص و فشارسنج‌های با دقت بالا نیاز دارد [4]. یکی از روش‌های ساده محاسبه سرعت برشی[8] 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 مومنتم ناشی از جریان‌های ثانویه، می‌توان سرعت برشی بستر u_{*b} را با استفاده از استفاده از رابطه (1) به‌دست آورد [17]:

$$u_{*b} = \sqrt{gYS_f} \tag{1}$$

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[9] سرعت (رابطه 2) نیز بهره برد [18]:

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

که در آن $\bar{u}$ سرعت متوسط زمانی در یک نقطه به فاصله z از کف، κ ثابت فون‌کارمن (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 کاملا 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 این‌که استفاده از رابطه لگاریتمی سرعت در جریان‌های پیچیده سه‌بعدی 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 ($30 < Z^+ < 300$) حتی در جریان‌های سه‌بعدی مناسب ارزیابی کرده‌اند [21].

هنگامی‌که اندازه‌گیری پارامترهای آشفتگی در کانال انجام شده باشد، می‌توان از تنش‌های رینولدز[10] نیز برای محاسبه سرعت برشی بستر استفاده نمود. به کمک معادله‌های دوبعدی ناویراستوکس 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].

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

که در آن τ_{xz} تنش برشی در عمق z ، ρ 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[11] می‌باشد. تنش برشی τ_{xz} در هر نقطه برابر مجموع دو ترم تنش برشی ناشی از لزجت و تنش برشی رینولدز $-\overline{u'w'}$ (u' 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

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

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

که در آن $(-\overline{u'w'})_{\mathrm{b(Ext.)}}$ مقدار تنش برشی رینولدز در محل برخورد خط برازش یافته با بستر می‌باشد. روش دیگر محاسبه سرعت برشی بستر استفاده از انرژی جنبشی آشفتگی[1] 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].

$$u_{*\mathrm{b}} = \sqrt{0.9\left(\overline{w'^2}\right)_{\mathrm{b(Ext.)}}} \tag{5}$$

که در آن $\left(\overline{w'^2}\right)_{\mathrm{b(Ext.)}}$ مقدار تنش رینولدز در محل برخورد خط برازش یافته با بستر می‌باشد. بیرون و همکاران برای جریان در اطراف منحرف‌کننده‌های جریان (تنگ‌شوندگی و باز شوندگی) 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 می‌باشد. بدین منظور سرعت طولی و ویژگی‌های 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 سرعت‌سنجی تصویری ذرات[2] اندازه‌گیری شد که در ادامه شرایط آزمایشگاهی توضیح داده می‌شود.

2- مواد و روش‌ها

آزمایش‌های 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 به‌علت 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 پایین‌دست مثبت است. محور z مربوط به راستای عمود بر جریان و جهت مثبت آن از کف بستر سیلاب‌دشت به سمت بالا می‌باشد. در نهایت محور y در راستای عرضی بوده و از دیواره سیلاب‌دشت به سمت کانال اصلی مثبت است. جداره‌های کانال به‌صورت قائم و از جنس شیشه بوده و برای تصویربرداری از جریان، مناسب می‌باشد. با توجه به زبری شیشه، عدد بی‌بعد زبری بستر بسیار کوچکتر از 3 و در نتیجه جداره‌های کانال از نظر هیدرولیکی صاف می‌باشند. جهت کاهش اثرات پایاب بر شرایط جریان یکنواخت، از یک سرریز قابل تنظیم در انتهای کانال استفاده شد. دبی در ورودی کانال با استفاده از شیر تنظیم دبی خروجی از پمپ، کنترل و به‌وسیله یک دبی‌سنج الکترومغناطیسی اندازه‌گیری شد. به منظور حذف تلاطم در ابتدای کانال از صفحه‌های موازی آرام‌کننده جریان استفاده شده است.

شرایط هیدرولیکی آزمایش‌های انجام‌شده به‌طور خلاصه در جدول 1 ارائه شده است. براساس اطلاعات گزارش شده در این جدول، جریان در کانال مرکب دارای رژیم زیربحرانی و کاملاً آشفته است. عمق جریان در سیلاب-دشت و کانال اصلی به‌ترتیب 5 و 20 سانتی‌متر می‌باشد. بنابراین عمق نسبی برابر 4 (بزرگتر از 3) خواهد بود که نشان می‌دهد جریان از نوع کم‌عمق محسوب می‌شود [15].

اندازه‌گیری‌ها 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 پایین‌دست ناچیز می‌باشد. پروست و همکاران گزارش کردند که در یک کانال مرکب با دیواره‌های قائم (با عمق نسبی 0.3) در طول حدود 5.6 برابر عرض سیلاب‌دشت، عرض لایه اختلاطی به مقدار ثابتی می‌رسد [27]. به منظور اطمینان از توسعه‌یافتگی جریان در محل آزمایش، اندازه‌گیری سرعت جریان در سه مقطع (در مرکز کانال اصلی) به فاصله 6.9، 7.4 و 7.9 متر از ورودی کانال توسط سرعت‌سنج 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 دیواره‌های کانال و در راستای جریان) در فاصله‌های 30، 50، 60 و 70 سانتی‌متری از دیواره سیلاب-دشت (دیواره سمت راست در شکل 1) اندازه‌گیری شد. این صفحه‌ها به-صورت خط‌چین در "شکل 1" نشان داده شده‌اند.

به منظور اندازه‌گیری صحیح سرعت (مخصوصاً سرعت قائم که مقدار بسیار کوچکی دارد) استفاده از ابزار اندازه‌گیری غیرتداخلی[3] اهمیت دارد. بنابراین برای اندازه‌گیری میدان جریان از دستگاه سرعت‌سنجی تصویری

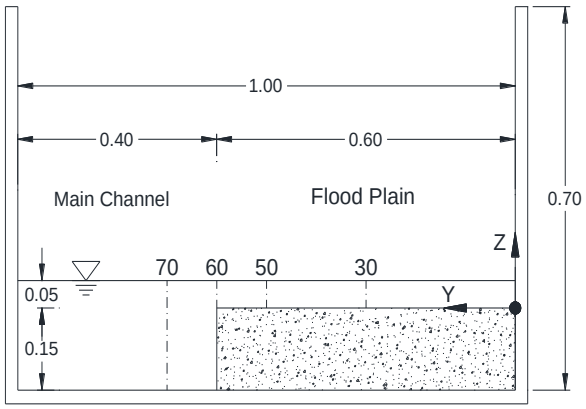

Fig. 1 The cross section of compound channel in the present study (All dimensions are in meters.)

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

جدول 1 شرایط هیدرولیکی آزمایش‌ها

Table 1 Hydraulic conditions of experiments

عمق جریان در سیلاب‌دشت (متر)	0.05
عمق جریان در کانال اصلی (متر)	0.20
نسبت عمق کانال اصلی به سیلاب‌دشت	4
دبی (متر مکعب در ثانیه)	0.039
سرعت متوسط (متر در ثانیه)	0.35
عدد فرود	0.34
عدد رینولدز	2.8×10^4

[1] Turbulent Kinetic Energy
[2] Particle Image Velocimetry
[3] Non-Intrusive

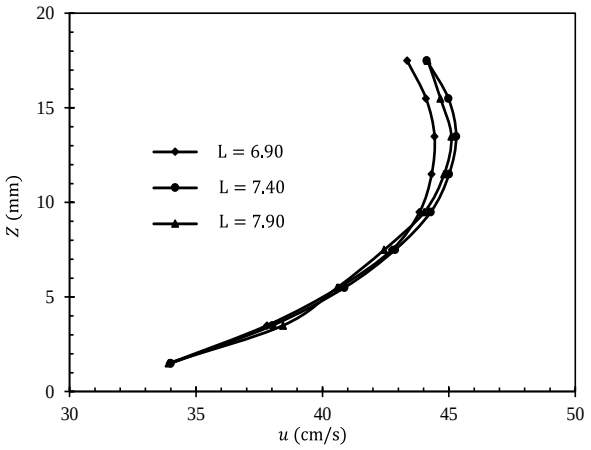

Fig. 2 The profile of streamwise flow velocity at the center of the main channel in three sections with the distances of 7.9, 7.4 and 6.9 meters from channel inlet

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 به‌عنوان بخشی از تحقیق حاضر) به‌صورت 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 سانتی‌متری، دوربین در کناره راست کانال و برای برداشت صفحه 70 سانتی‌متری، دوربین در کناره چپ کانال قرار داده شد. روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات امکان اندازه‌گیری سرعت جریان در همه عمق‌ها را با دقت مناسب فراهم می‌کند، در حالی‌که اندازه‌گیری سرعت با سایر روش‌ها مانند روش سرعت‌سنج صوتی داپلر در نزدیکی سطح آب امکان‌پذیر نبوده و در نزدیکی جداره‌ها با خطا همراه است [28].

در تمامی اندازه‌گیری‌ها، دوربین پرسرعت مدل افاس 700 [1] (محصول شرکت سونی) به همراه لنز ماکرو با فاصله کانونی 100 میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت. تصویربرداری از صفحه نورانی با کیفیت 1080×2048 پیکسل و سرعت 239.76 فریم در ثانیه و در حالت خام[2] انجام شد. برای روشن کردن صفحه برداشت از یک لیزر از نوع حالت جامد[3] 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 پلایولایت[4] 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 [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 نرم‌افزار پی‌آی‌وی‌لب[5] انجام شد [30]. فاصله بردارهای سرعت بدست‌آمده در هر یک از صفحه‌های اندازه‌گیری حدود 1 میلی‌متر بوده است. زمان و فرکانس نمونه‌برداری به‌ترتیب حدود 240 هرتز و 80 ثانیه بوده است. براساس پژوهش‌های دیگر پژوهشگران زمان و

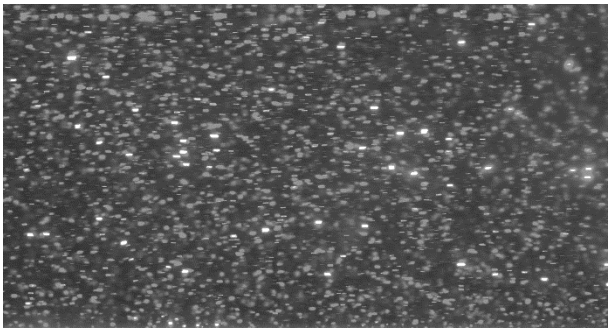

Fig. 3 An example of captured images

شکل 3 نمونه‌ای از تصاویر برداشت شده

فرکانس نمونه‌برداری مذکور برای اندازه‌گیری سرعت در کانال مرکب کافی به نظر می‌رسد [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 یک‌بیستم 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. همان‌طور که در "شکل 4" دیده می‌شود، شکل کلی پروفیل سرعت در سیلاب‌دشت با پروفیل سرعت در کانال اصلی متفاوت است. میزان سرعت در صفحه 30 سانتی‌متری کمی از سرعت در صفحه 50 سانتی‌متری بزرگتر است (مخصوصا در ترازهای بالاتر). دلیل این مشاهده به این موضوع برمی‌گردد که صفحه 30 سانتی‌متری 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) می‌باشد. کاهش سرعت صفحه 50 نسبت به صفحه 30 سانتی‌متری نشان می‌دهد که لایه برشی شکل‌گرفته در صفحه 50 سانتی‌متری به‌صورت یک مانع در برابر جریان عمل می‌کند. از طرفی بیشترین کاهش سرعت در صفحه 50 سانتی‌متری نسبت به صفحه 30 سانتی‌متری در سطح جریان رخ داده است. این پدیده نشان می‌دهد که در صفحه 50 سانتی‌متری در بخش پایینی

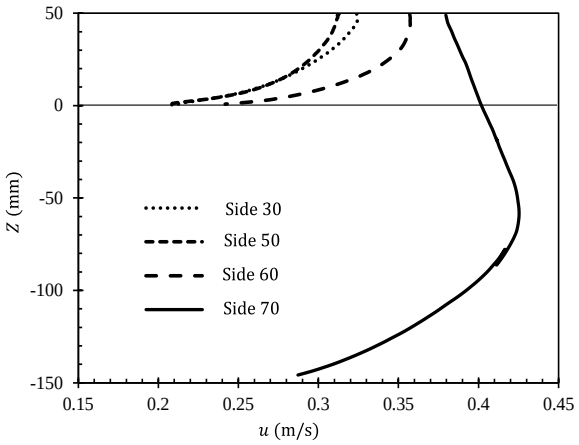

Fig. 4 The profile of streamwise flow velocity in depth at different positions in transverse direction

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

[1] FS 700
[2] Raw
[3] Solid State
[4] Pliolite
[5] PIVLab

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 به‌طور قابل توجهی از دیگر نقاط سیلاب‌دشت بیشتر است. نسبت سرعت طولی به سرعت حداکثر ($U/U_{\max}$) در مقطع سیلاب‌دشت در تحقیق‌های تامیناگاوا و نزو کمتر از مقادیر $U/U_{\max}$ در مقاله حاضر است [11]. به‌عنوان مثال، متوسط نسبت $U/U_{\max}$ در مقطع اندرکنش در تحقیق-های ایشان برابر 0.66 و در مطالعه حاضر برابر 0.83 است. زیرا در آزمایش‌های تامیناگاوا و نزو در جریان کم‌عمق با دیواره‌های قائم و عمق نسبی مشابه، عمق جریان در سیلاب‌دشت برابر 2 سانتی‌متر در نظر گرفته شد، در حالی‌که 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 $Z = -58$ mm رخ می‌دهد. انتقال محل سرعت حداکثر از نزدیکی سطح آب به عمق جریان[1] در کانال اصلی، به‌دلیل وقوع جریان‌های ثانویه قوی است که در جریان کم‌عمق، شدت بیشتری نیز دارد. این جریان‌های ثانویه در سطح جریان و گوشه‌های کانال‌های غیردایروی کم‌عرض به‌دلیل 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 تامیناگاوا 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 اندازه-گیری کرده و بیان نمودند که تغییرات مقادیر سرعت در سطح جریان در عرض کانال (از کانال اصلی به سیلاب‌دشت) نزولی است [15]، در حالی‌که در تحقیق حاضر سرعت در سطح جریان (سرعت جریان در ارتفاع 50 میلی‌متر در شکل 5) در عرض کانال (از کانال اصلی به سیلاب‌دشت) به‌صورت کاملا نزولی نیست.

3-2-تنش‌های رینولدز مرتبه دوم

در "شکل 5" توزیع عمقی تنش برشی رینولدز بی‌بعد $-\overline{u'w'}/u_{*\mathrm{b}}^2$ ($u_{*\mathrm{b}}$ سرعت برشی بستر) و در "شکل 6 و 7" به‌ترتیب توزیع عمقی شدت آشفتگی بی‌بعد قائم $\sqrt{\overline{w'^2}}/u_{*\mathrm{b}}$ و طولی $\sqrt{\overline{u'^2}}/u_{*\mathrm{b}}$ در نقاط مختلف کانال ارائه شده است. سرعت برشی بستر با استفاده از برون‌یابی تنش برشی رینولدز در محدوده خطی تا بستر به‌دست 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 نسبتا خطی کاهش می‌یابد. لازم به توضیح است که رفتار خطی تنش برشی رینولدز و همچنین رفتار تقریبا خطی شدت‌های آشفتگی در کانال‌های مستطیلی نیز گزارش شده است [22].

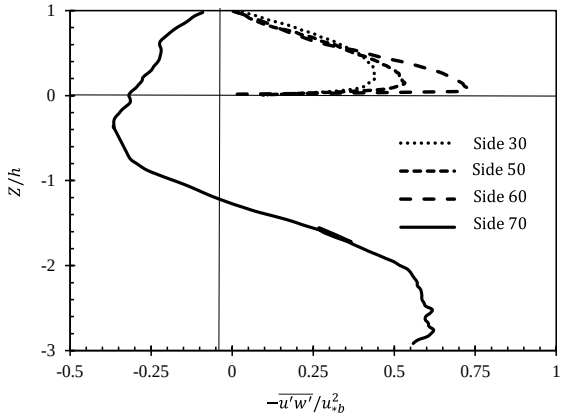

Fig. 5 The distribution of $\overline{u'w'}/u_{*\mathrm{b}}{}^2$ in depth at different positions in transverse direction

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

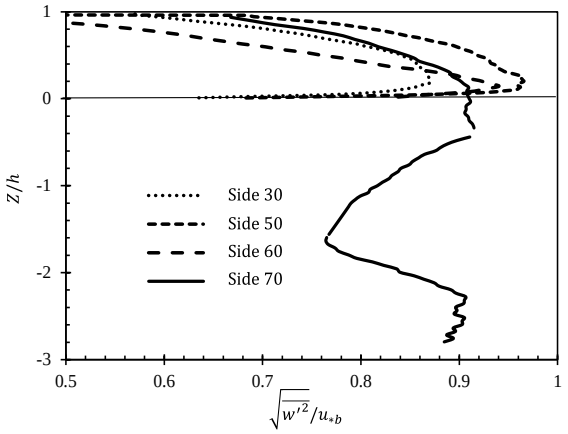

Fig. 6 The distribution of $\sqrt{\overline{w'^2}}/u_{*\mathrm{b}}$ in depth at different positions in transverse direction

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

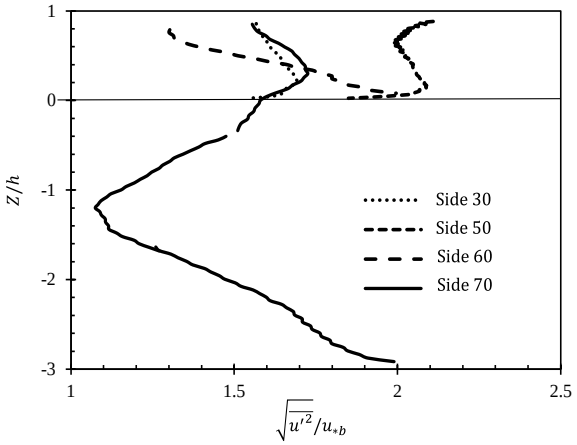

Fig. 7 The distribution of $\sqrt{\overline{u'^2}}/u_{*\mathrm{b}}$ in depth at different positions in transverse direction

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

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

[1] 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 سانتی‌متری به‌ترتیب 25 و 12 درصد بیش از مقطع 30 سانتی‌متری می‌باشد. بنابراین میزان آشفتگی با نزدیک شدن به ناحیه اندرکنش در حال افزایش است. این در حالی است که در مقطع 60 سانتی‌متری، متوسط شدت آشفتگی قائم نسبت به مقطع 50 سانتی‌متری تغییر قابل توجهی ندارد، اما شدت آشفتگی طولی به خصوص در ارتفاع بالاتر نسبت به صفحه 50 سانتی‌متری به شدت کاهش می‌یابد.

در کانال اصلی (مقطع 70 سانتی‌متری) سرعت جریان در محدوده 4 میلی‌متری 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 به‌دلیل صفر بودن $\partial U/\partial z$ (U سرعت متوسط طولی و z محور قائم) در محل سرعت حداکثر و همچنین $\partial W/\partial x$ (W سرعت متوسط قائم و x محور طولی) به‌دلیل توسعه‌یافتگی جریان، تنش برشی رینولدز $-\overline{u'w'}$ که بر اساس فرضیه بوزینسک معادل $\nu_t(\partial U/\partial z + \partial W/\partial x)$ (ν_t لزجت گردابه‌ای) 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 سانتی‌متری) شدت آشفتگی طولی بی‌بعد $\left(\sqrt{\overline{u'^2}}/u_{*b}\right)$ 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 به‌دلیل 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 تامیناگاوا 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 سیلاب‌دشت، 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 سیلاب‌دشت 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 سانتی‌متری) 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[1] 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 به‌دلیل 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 میلی‌متری 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 سیلاب دشت 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 به‌دلیل 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

[1] Bottom Vortex

برای بدست آوردن سرعت برشی در چهار موقعیت مختلف در عرض کانال (به فاصله 30، 50، 60 و 70 سانتی‌متر از دیواره سیلاب‌دشت) از چهار روش ذکرشده 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 می‌توان همان‌طور 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 $u^+ = u/u_{*\mathrm{b}}$ برحسب $\ln(Z^+)$ ($Z^+ = Zu_{*\mathrm{b}}/\nu$) در کل عمق جریان برای دو صفحه 30 و 60 سانتی‌متری ارائه شده است. همان‌طور که در "شکل 8" مشاهده می‌شود شیب خطوط برازش داده شده یکسان و برابر $1/\kappa = 2.44$ است. عرض از مبداء خط مربوط به صفحه 30 سانتی‌متری نزدیک به مقادیر ذکر شده برای کانال مستطیلی با بستر صاف (برابر با 5.3) است [19]. در حالی‌که عرض از مبداء خط مربوط به صفحه 60 سانتی‌متری برابر با 8.2 است که با مقدار مشاهده شده برای بسترهای صاف بسیار متفاوت است. علت این پدیده وجود جریان‌های قوی ثانویه در این مقطع است که با فرضیات معادله لگاریتمی همخوانی ندارد، در حالی‌که در صفحه 30 سانتی‌متری (که در وسط سیلاب‌دشت قرار دارد) فرض یک جریان توسعه یافته برقرار است [6].

البته باید توجه داشت که در تعیین سرعت برشی بستر براساس 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 (به‌دلیل یک سو شدن جریان در منطقه نزدیک بستر و دور از زیرلایه ورقه‌ای)، 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 روش‌ها در خصوص فاصله بردارهای سرعت، کمترین مقدار Z^+ برداشت‌شده در صفحه‌های 30 و 50 تقریبا برابر 5، در صفحه 60 برابر 10 و در صفحه 70 سانتی‌متری معادل 57 بوده است. علت افزایش مقدار Z^+ حداقل در صفحه 60 نسبت به صفحه‌های 30 و 50 سانتی‌متری، افزایش فاصله بردارهای سرعت به‌دلیل کاهش وضوح تصویر و طبیعت سه‌بعدی جریان در ناحیه اندرکنش بوده است. اما کاهش Z^+ حداقل در صفحه 70 سانتی‌متری به‌دلیل عدم اندازه‌گیری سرعت جریان در فاصله 4 میلی‌متر از کف کانال اصلی (به‌دلیل نوع پایه دوربین) بوده است.

روش‌های سوم و چهارم تعیین سرعت برشی بستر بر اساس توزیع تنش‌های رینولدز $-\rho\overline{u'w'}$ و $\rho\overline{w'^2}$ در عمق و برون‌یابی خط برازش داده‌شده تا بستر می‌باشند. برای نمونه در "شکل 9" نحوه برون‌یابی $-\rho\overline{u'w'}$ در صفحه 50 سانتی‌متری ارائه شده است. در سیلاب‌دشت، تنش‌های رینولدز از سطح آب تا نزدیک بستر تقریبا بصورت خطی افزایش یافته و سپس با گرادیان شدید کاهش می‌یابند. این روند توسط بیرون و همکاران در کانال‌های مستطیلی هم گزارش شده است [26]. شایان ذکر است که در پژوهش‌های آزمایشگاهی انجام شده در کانال مرکب (که عمدتاً اندازه‌گیری توسط سرعت‌سنج صوتی داپلر انجام شده است) به دلیل عدم دقت کافی سرعت‌سنج صوتی داپلر در نزدیکی بستر، روند کاهشی تنش‌های رینولدز در نزدیکی بستر گزارش نشده است. در کانال اصلی (صفحه 70 سانتی‌متری) تنش‌های رینولدز در ترازهای پایین‌تر از کف سیلاب‌دشت، یک رفتار خطی داشته و در نزدیکی بستر مقدار ثابتی به خود می‌گیرند و به‌دلیل عدم اندازه‌گیری سرعت جریان در محدوده 4 میلی‌متری کف، کاهش تنش‌های 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 دایره‌های توخالی نشان داده شده‌اند. در این شکل که منحنی تنش برشی رینولدز در صفحه 50 سانتی‌متری را در راستای عمق نشان می‌دهد، محدوده خطی تنش برشی رینولدز در بازه $210 < Z^+ < 635$ می‌باشد. در صفحه‌های 30 و 60 سانتی‌متری به‌ترتیب در بازه‌های $345 < Z^+ < 760$ و $95 < Z^+ < 745$ تنش برشی رینولدز دارای روند خطی است.

در "شکل 10" نتایج سرعت برشی بدست آمده از روش‌های مختلف به همراه عدم قطعیت آن‌ها (که به‌صورت میله‌های عمودی در نقاط اندازه‌گیری مشخص هستند) ارائه شده است. عدم قطعیت اندازه‌گیری اطلاعاتی راجع به کیفیت نتایج حاصل از اندازه‌گیری را بیان می‌کند. در حقیقت عدم قطعیت

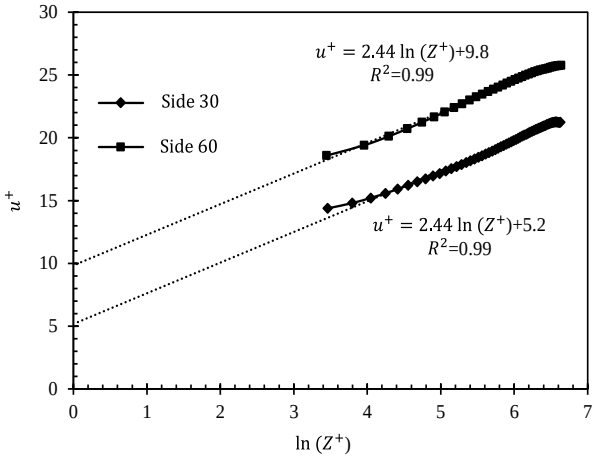

Fig. 8 The changes of $u^+ = u/u_{*\mathrm{b}}$ Vs. $\ln(Z^+)$ for total flow depth at two sections with the distanses of 30 and 60 centimeters from floodplain wall

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

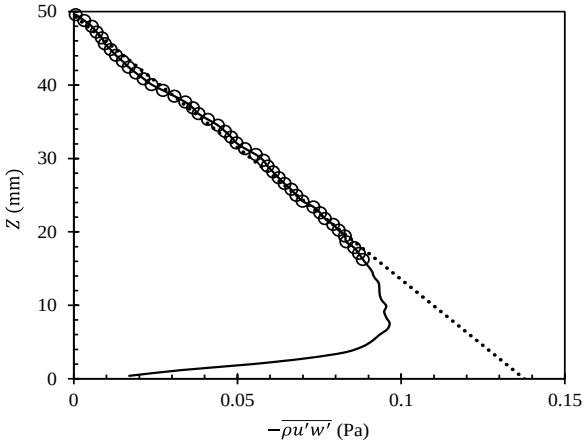

Fig. 9 The distribution of $-\rho\overline{u'w'}$ in depth at floodplain (the section of 50 centimeters), Hollow points are used for line fitting and extrapolation.

شکل 9 توزیع عمقی $-\rho\overline{u'w'}$ درسیلاب‌دشت (صفحه 50 سانتی‌متری)، نقاط توخالی جهت برازش خط و برون‌یابی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

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 برآوردشده از روش المان قائم در سیلاب‌دشت (صفحه‌های 30 و 50) با روش‌های لگاریتمی، برون‌یابی تنش رینولدز قائم $\overline{w'^2}$ و برون‌یابی تنش برشی رینولدز $-\overline{u'w'}$ همخوانی دارد. اما در مقطع اندرکنش (صفحه 60) و مخصوصا 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 متاثر 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 $\overline{w'^2}$ تطابق خوبی دارند. از تغییرات سرعت برشی بستر (به‌دست آمده از روش‌های لگاریتمی، برون‌یابی تنش رینولدز قائم $\overline{w'^2}$ و برون‌یابی تنش برشی رینولدز $-\overline{u'w'}$) 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

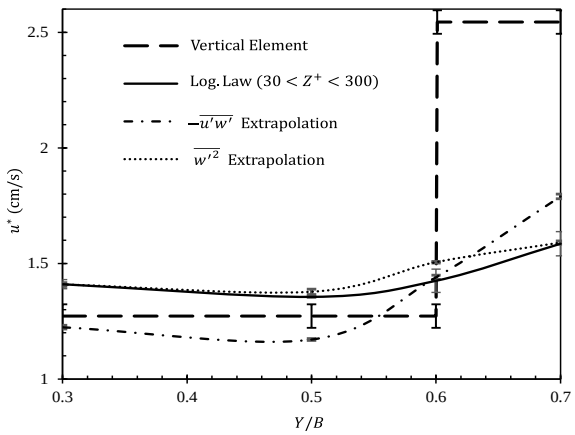

Fig. 10 Shear velocities at different sections of channel estimated by several methods with their uncertainties (Y is the distance from floodplain wall and B is the channel width equal to 1 meter.)

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.)

هستند و اختلاف بین مقادیر برآورد شده از روش‌های لگاریتمی و برون‌یابی تنش رینولدز قائم $\overline{w'^2}$ نسبت به روش برون‌یابی تنش برشی رینولدز $-\overline{u'w'}$ 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. به‌دلیل 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 تاثیر 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 شیب‌درا در دو ناحیه پایین و بالای تراز سیلاب‌دشت با دو رفتار متفاوت در شدت‌های آشفتگی تشخیص داده شد. این در حالی‌است 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 تاثیر قابل‌توجه 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. Uijttewaal, Momentum exchange in straight uniform compound channel flow, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 131, No. 3, pp. 175-183, 2005.

[2] A. Kozioł, 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. Kozioł, 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.

[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, *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, Cambrigde: 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.