

تعیین پروفیل سرعت طولی جریان آشفته در بسترهای زبر به روش متوسط‌گیری دوگانه

سید حسین مهاجری^{۱*}، اکبر صفرزاده^۲، سید علی اکبر صالحی نیشابوری^۳

- ۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی
- ۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی
- ۳- استاد سازه‌های هیدرولیکی، پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس

*hossein.mohajeri@khu.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۵/۱۰/۱۸]

تاریخ دریافت: [۹۵/۴/۲۰]

چکیده

به‌طور کلی حرکت آشفته سیال، با استفاده از معادلات متوسط زمانی ناویر استوکس مطالعه و مدل می‌شود. از آنجا که در طی حل معادلات متوسط زمانی ناویر استوکس ویژگی‌های سیال به صورت محلی (نقطه به نقطه) حل می‌شود از نظر مفهومی تضادی بین این معادله و مفاهیم سنتی هیدرولیک مانند زبری مانینگ، دبی جریان، فرض یکنواختی جریان که در مقیاس بزرگ تعریف می‌شود وجود دارد. به‌منظور حل این مشکل، معادلات متوسط زمانی ناویر استوکس دوباره در مکان متوسط‌گیری می‌شوند و معادلات متوسط دوگانه ناویر استوکس را تشکیل می‌دهند. این مطالعه یکی از کاربردهای این معادلات در مطالعه جریان در بسترهای زبر، در تعیین پروفیل سرعت طولی را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج حاصل از پژوهش، محاسبه دقیق سرعت برشی بستر توسط پروفیل تنش برشی رینولدز، مستلزم استفاده از پروفیل متوسط‌گیری شده در مکان است. علاوه بر این، با استفاده از سرعت برشی محاسبه شده بر اساس بحث میانگین مکانی، یک روش جدید برای تعیین پروفیل لگاریتمی سرعت طولی جریان در بسترهای زبر نیز پیشنهاد شده است. در این روش تعیین پارامترهای پروفیل سرعت به‌صورت صریح انجام شده و هماهنگی نتایج حاصل با داده‌های اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی نیز بسیار مناسب است.

واژگان کلیدی: بستر زبر، پروفیل سرعت، جریان آشفته، سرعت سنج صوتی (ADV)، متوسط‌گیری دوگانه.

۱- مقدمه

تا اندازه پیمان‌رودها) تغییر پیدا می‌کند. از طرف مقابل حضور زیباگان^۲ (موجودات زنده) و انتقال رسوب در رودخانه‌ها اثر مهمی بر جریان سیال می‌گذارند و در نهایت جریان آب، رسوب و زیباگان در طیف وسیعی از مقیاس (از ابعاد بستر زبر تا اندازه پیمان‌رودها) با یکدیگر در اندرکنش هستند. بنابراین مدل‌سازی و مطالعه جریان سیال آشفته در این شرایط با معادلات رایج انتقال (معادلات متوسط زمانی ناویر

در حوزه مطالعات مهندسی هیدرولیک و رودخانه، جریان آب به صورت جریان محدود به‌جداره^۱ در نظر گرفته می‌شود. خاص بودن این جریان از آن ناشی می‌شود که مرزهای جریان اغلب متحرک و تغییر شکل‌پذیر است. به‌علاوه، شکل بستر رودخانه‌ها دارای ساختار پیچیده‌ای است، که در طیف وسیعی از مقیاس‌ها (از ابعاد سنگ‌دانه‌های بستر

استوکس¹) همواره امکان پذیر نیست [1, 2].

عدم کارایی معادلات متوسط زمانی ناویر استوکس از آنجا ناشی می شود که جریان های رودخانه ای با توجه به- شرایط مرزی پیچیده، در مقیاس های گوناگون زمانی و مکانی تغییر می کنند. به بیان دیگر اثر تغییرات بستر در زمان و مکان بدون استفاده از معادلات کمکی و با پیچیدگی فراوان در این معادلات دیده نمی شوند. به علاوه، تغییرات شدید در شرایط مرزی موجب می شود که فرض جریان دوبعدی که به طور رایج در مدل سازی رودخانه استفاده می شود، در این شرایط قابل کاربرد نباشد. به عنوان نمونه شرایط جریان در قسمت شکنج و گودآب² یا قبل و بعد از یک دسته پوشش گیاهی³ یکسان نیست و نمی توان فرض جریان دوبعدی را به کار برد. همچنین، در اغلب طراحی ها و مطالعات در حیطه مهندسی رودخانه با ویژگی های متوسط گیری مکانی شده (مانند ضریب زبری مانینگ، عمق متوسط جریان، دبی و...) سر و کار داریم که این مقادیر با حل نقطه به نقطه ویژگی های جریان در معادلات متوسط زمانی ناویر استوکس دارای اختلاف است. در نهایت نیروی درگ ناشی از لزجت⁴ و شکل بستر⁵ که در لایه نزدیک به جداره های زیر بسیار مهم است، در معادلات متوسط زمانی ناویر استوکس به صورت صریح ظاهر نمی شوند.

به منظور غلبه بر این مشکل، معادلات متوسط زمانی ناویر استوکس دوباره در مکان، در یک لایه افقی (در راستای طول و عرض و موازی با بستر) متوسط گیری می شوند. معادله های حاصل از متوسط گیری مکانی معروف به معادله های متوسط دوگانه ناویر استوکس⁶ است. ریشه روش متوسط گیری دوگانه به هیدرودینامیک جریان های چند فاز و هیدرودینامیک جریان در محیط های متخلخل برمی گردد [3] [4]. در حیطه مهندسی هیدرولیک این روش برای نخستین بار توسط اسمیت و مک لین [5] و در مطالعه سطوح موجی ناشی

از تلماسه⁷ استفاده شد. بعدها خیمنز- کورتو و همکاران [6] این روش را در مطالعه فرآیندهای انتقال در نزدیکی ساحل دریا مورد استفاده قرار دادند. امروزه این روش در حیطه مهندسی هیدرولیک به طور گسترده استفاده می شود [7].

معادلات متوسط دوگانه ناویر استوکس در شرایط جریان ناهمگن⁸ که در اغلب مطالعات هیدرولیکی مشاهده می شود، دارای قابلیت کاربرد است. جریان ناهمگن به جریانی گفته می شود که در آن نتوان از تغییرات ویژگی های جریان در مکان چشم پوشی کرد. جریان حول پوشش گیاهی، جریان در اطراف بسترهای شنی و زبر و یا جریان ناشی از تشکیل شکل بستر نمونه هایی از جریانات ناهمگن است که با استفاده از روش متوسط گیری دوگانه مطالعه شده اند [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14].

همان طور که اشاره شد روش متوسط گیری دوگانه در مطالعه جریان روی بسترهای شنی، که نوع خاصی از جریان روی بسترهای زبر، سودمند است. در شرایط بستر زبر، ویژگی های جریان مانند سرعت طولی، تنش های رینولدز و انرژی جنبشی آشفتهگی به ویژه در نزدیکی جداره به شدت در مکان تغییر می کنند. این تغییرات موجب می شود که پروفیل های به دست آمده برای مشخصات جریان در مکان های مختلف متفاوت باشد. همچنین به لحاظ تفاوت زبری بستر و جداره های جانبی سرعت برشی به دست آمده از روش شیب انرژی⁹ که به طور گسترده استفاده می شود، چندان معتبر نیست [15].

این مقاله به معرفی روش متوسط گیری دوگانه و معرفی کاربرد خاصی از این روش در تعیین پروفیل سرعت متوسط جریان (در زمان) و سرعت برشی در شرایط بستر زبر می پردازد. به بیان دقیق تر در این مطالعه ابتدا روشی برای تعیین سرعت برشی توسط تنش برشی رینولدز متوسط مکانی معرفی می شود. سپس پروفیل سرعت طولی بر مبنای سرعت متوسط دوگانه و بر اساس یک روش نوین تعیین می شود.

1 Reynolds averaged Navier-Stokes (RANS) equations

2 Pool and riffle

3 Meadow

4 Viscosity drag force

5 Bed form drag force

6 Double averaged Navier-Stokes (DANS) equations

7 Dune

8 Heterogenous flows

9 Energy slope

شکل ۱. تجهیزات آزمایشگاهی (a) پلان کانال آزمایشها (b) سرعت سنج و ابزار جابه جایی سه بعدی (c) بستر زیر شده کانال.

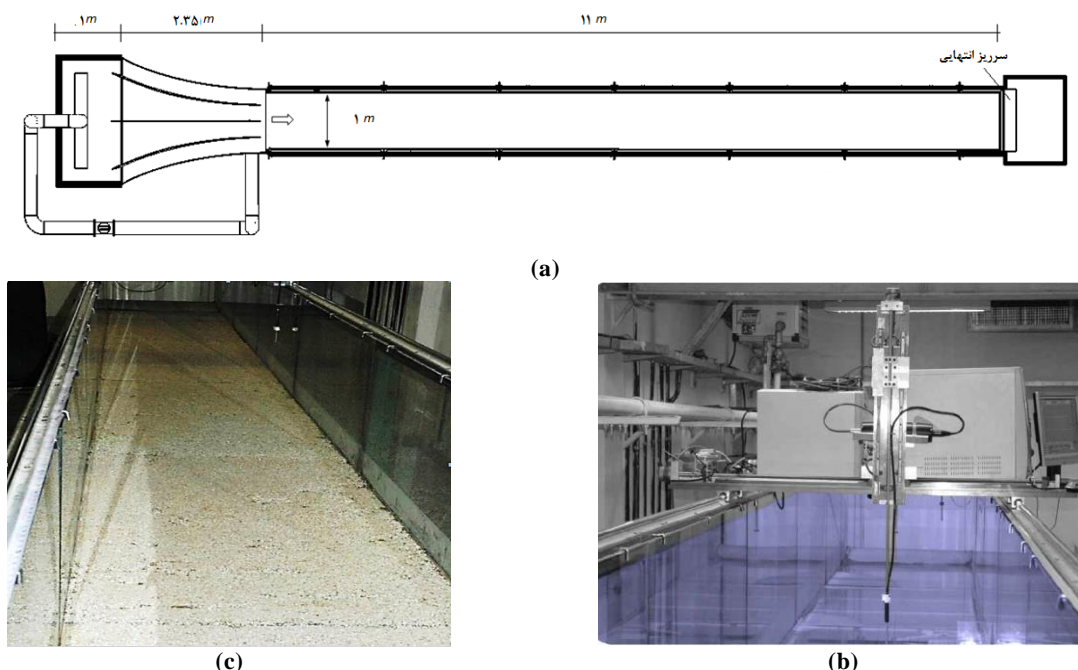


Fig. 1. Experimental Setup (a) Plan of open-channel (b) ADV and traversing system (c) crushed stones spread in open-channel bed.

شیشه و جنس بستر آن از پلکسی گلاس است، انجام شده است (شکل ۱-الف). به منظور تنظیم عمق آب، در پایین دست کانال یک سرریز پروانه ای اتوماتیک نصب شده است. به منظور کاهش اغتشاش و نوسان آب در ورودی کانال از دیوارهای هادی و صفحه آرام کننده جریان استفاده شده است. همچنین برای حذف اغتشاشات سطحی در ورود جریان از مخزن بالادست به کانال، از یک صفحه یونولیت شناور در سطح آب استفاده شده است. کنترل دبی جریان توسط یک شیر دریچه ای انجام شده و دبی ورودی به کانال از مخزن زیرین، توسط یک دبی سنج مغناطیسی با دقت ۰/۲٪ واقع در مسیر لوله انتقال، اندازه گیری شده است. از عمق سنج دیجیتال برای اندازه گیری عمق آب در داخل کانال استفاده شده است [16].

مشخصات زبری بستر در جدول (۱) نمایش داده شده است. ضریب یکنواختی (σ_g) در محدوده مصالح با دانه بندی یکنواخت قرار دارد [21]. عمق آب در آزمایش های حاضر در مقطع هفت متری (فاصله از ابتدای کانال

۲- مواد و روش ها

در این پژوهش جریان آشفته در کانال مستقیم و با بستر زیر به صورت آزمایشگاهی مطالعه شده است. به این منظور از روش متوسط گیری دوپل بهره برده شد. براساس این روش، نوسان های مکانی هر یک از مولفه های سرعت همراه با نوسان های زمانی در مقادیر متوسط گیری شده در نظر گرفته می شود [7]. همچنین مولفه های تنش ایجاد شده ناشی از همبستگی نوسان های مکانی مولفه های سرعت تحت عنوان تنش های ناشی از شکل بستر^{۱۲} نیز در معادلات ظاهر می شوند [11, 12]. به همین دلیل این مطالعات برای بررسی جریان در بسترهای زیر بسیار مناسب است.

آزمایشها در یک کانال مستطیلی مستقیم به طول ۱۴/۳۵ متر (۱۱ متر طول کانال و ۳/۳۵ متر طول مخزن و دیواره انتقالی)، عرض ۱/۰۰ متر و ارتفاع ۰/۷۰ متر، با شیب طولی ۰/۰۳۳ درصد که جداره های جانبی آن از

مستقیم بعد از دیواره‌های انتقالی) که مقطع اندازه‌گیری است، سیزده سانتی‌متر ثابت نگه‌داشته‌شد. در این مطالعه بر اساس پیشنهاد اسمارت [22] مقدار زبری بستر معادل با قطر عبوری ۹۰ درصد مصالح (d_{90}) در نظر گرفته شد.

جدول ۱. مشخصات زبری بستر در آزمایش‌ها.

فاکتور	زبری ۱	زبری ۲
d_{90} (mm)	4.70	9.5
d_{50} (mm)	3.13	7.01
$\sigma_g = \sqrt{\frac{d_{94}}{d_{16}}}$	1.41	1.41

Table 1. Characteristics of rough bed in experiments.

در جدول (۲) خلاصه‌ای از شرایط آزمایش‌ها ارائه شده است. شرایط هیدرولیکی در آزمایش‌ها (زبری بستر، عدد فرود، شیب کانال و سایر موارد) به گونه‌ای انتخاب شدند که بیشترین شباهت را با شرایط جریان در رودخانه‌های طبیعی داشته باشد. در این جدول S_0 شیب کانال، Q دبی جریان، H عمق جریان در کانال و Re عدد رینولدز جریان است. k_s^+ پارامتر بی‌بعد زبری یا عدد رینولدز بر پایه زبری بستر است که از رابطه $k_s^+ = k_s U_* / \nu$ به دست می‌آید. در این رابطه k_s مقدار زبری بستر (که برابر با d_{50} است)، ν لزجت سینماتیکی سیال و U_* سرعت برشی است. لازم به ذکر است که مقدار سرعت برشی براساس روش شیب انرژی به دست آمده است ($U_* = \sqrt{gRS_0}$) در این رابطه R شعاع هیدرولیکی و g شتاب ثقل است). مقدار k_s^+ هر دو آزمایش انجام شده از عدد ۷۰ بزرگتر است. مطالعات پیشین نشان داده‌است که در شرایط k_s^+ بزرگتر از ۷۰، می‌توان حرکت سیال را جریان با بستر زبر فرض نمود [23].

به منظور برداشت مؤلفه‌های سرعت لحظه‌ای از حس‌گر روبه پایین سرعت‌سنج صوتی (ADV) با دقت ۰/۵٪ استفاده شد. این دستگاه قادر به برداشت هر سه مؤلفه سرعت به صورت هم‌زمان است. به منظور تعیین موقعیت برداشت و جابه‌جایی سرعت‌سنج صوتی از یک دستگاه جابه‌جاکننده اتوماتیک استفاده شد. فرکانس برداشت اطلاعات ۱۰۰ هرتز و حجم نمونه‌برداری ۴/۹۰ میلی‌متر مکعب تعیین شد. برای داشتن سری زمانی پایدار در محاسبه مقادیر مؤلفه‌های متوسط سرعت و همچنین تنش‌های رینولدز، برداشت سرعت در هر نقطه به مدت ۳۰۰ ثانیه (۵ دقیقه) در نظر گرفته شد [17]. به منظور حذف داده‌های پرت، سری‌های زمانی برداشت شده با استفاده از روش ویولت^۳ پاک‌سازی شدند [18]. این روش یک نوع تبدیل مانند تبدیل فوریه است؛ با این تفاوت که به جای معادله پیوسته کسینوسی در تبدیل فوریه، معادله اصلی ویولت استفاده می‌شود. براساس این روش مقادیر سرعت لحظه‌ای در فضای ویولت با یک مقدار مشخص مقایسه شده و پاک‌سازی می‌شوند [18]. با توجه به محدودیت‌های ناشی از دستگاه سرعت‌سنج، امکان برداشت اطلاعات در فاصله پنج سانتی‌متر از سطح آب وجود ندارد. همچنین برای تداخل امواج ارسالی با بستر زبر، اطلاعات یک سانتی‌متری نزدیک به جداره نیز در تحلیل نتایج مورد استفاده قرار نگرفت [19]. اندازه‌گیری‌ها در فاصله هفت-متری از ورودی کانال انجام شده است. در این فاصله، بر اساس طول لازم برای توسعه یافتگی برآورد شده از رابطه کیرگوز و آردیچی اوغلو [20] و گزارش شده در جدول (۲) توسط α لایه مرزی به توسعه یافتگی کامل می‌رسد.

۳- نتایج و بحث

در شکل (۲) منحنی‌های هم‌سرعت طولی بی‌بعد شده با سرعت برشی در کانال و برای عمق ۱۳ سانتی‌متری برای دو آزمایش با زبری ۱ و زبری ۲ نمایش داده شده است.

یافته و جریانات ثانویه قوی تری تشکیل می شود [24,25]. این موضوع اهمیت اثر زبری در تغییرات مکانی ویژگی های جریان و ایجاد شرایط ناهمگنی را نشان می دهد. در بسیاری از مطالعات گذشته اهمیت زبری در تغییرات مکانی ویژگی های جریان مشاهده شده است. مک لین و نیکورا [26] مشاهده نمودند که تغییرات مکانی شدید خصوصیات جریان در نزدیکی بستر ناشی از حضور زبری است. هاردی و همکاران [27] شبیه به آنچه که توسط مک لین و نیکورا [26] مشاهده شده بود را گزارش نموده اند. این مطالعات همراه با مطالعه حاضر در مجموع بیان می دارد که تغییرات مکانی ناشی از زبری در این شرایط قابل چشم پوشی کردن نیست و اثر محسوسی در تعیین پارامترهای پروفیل لگاریتمی سرعت دارد.

به منظور مشاهده بهتر اثر تغییرات مکانی در راستای عرض کانال ویژگی های جریان، در شکل (۳)، مقادیر بی بعد شده سرعت متوسط (زمانی) طولی همراه با پروفیل لگاریتمی سرعت نشان داده شده است. پروفیل سرعت طولی در ناحیه داخلی و در بسترهای زبر، از رابطه لگاریتمی زیر تبعیت می کند:

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{k_s}\right) + A \quad (1)$$

که در این رابطه U سرعت متوسط زمانی در راستای طولی، κ ثابت فون کارمن برابر با 0.41 و A ثابت انتگرال-گیری است. در بسیاری از موارد مقدار برابر با $1/50$ در نظر گرفته می شود [23].

در شکل (۳) مشاهده می شود که در هر دو نوع زبری، تفاوت بین سرعت طولی متوسط (زمانی) و پروفیل لگاریتمی سرعت قابل توجه است (محور افقی در مقیاس لگاریتمی رسم شده است).

شکل ۲. منحنی های تراز سرعت طولی بی بعد شده با سرعت برشی در عمق ۱۳ سانتی متر در حضور زبری: (a) زبری ۱ (b) زبری ۲.

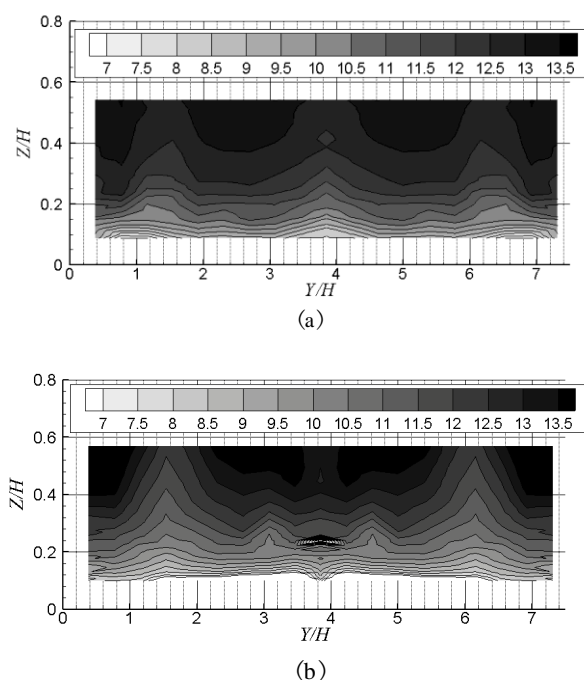


Fig. 2. Contourmaps of dimensionless longitudinal velocity for $H=13$ cm (a) Rough1 (b) Rough2

تغییرات متناوب خطوط تراز سرعت در راستای عرض کانال در این شکل ها قابل مشاهده است. این تغییرات در ناحیه نزدیک بستر شدیدتر است و با دور شدن از کف کانال و در ناحیه مرکزی کانال خطوط تراز سرعت، مقادیر نسبتاً ثابتی را نشان می دهند و تغییرات کمتری در این ناحیه مشاهده می شوند. به علاوه مشاهده می شود که تغییرات منحنی های تراز در شرایط زبری ۲ شکل (۲_ب) از تغییرات منحنی های تراز در شرایط زبری ۱ شکل (۲_الف) بیشتر است. همچنین مشاهده می شود که در هر دو شکل بیش از یک هسته مرکزی پرسرعت تشکیل شده است. این موضوع به تشکیل جریانات ثانویه در شرایط بستر زبر مربوط است. مطالعات پیشین نشان داده است که در شرایط بستر زبر، اختلاف زبری بین جداره های جانبی و بستر کانال افزایش

جدول ۲. مشخصات هیدرولیکی آزمایش‌ها بر روی بستر زبر.

x_l (m)	Fr	Re	U_* (m s ⁻¹)	k_s^+	H(cm)	Q (lit s ⁻¹)	S_o (%)	Exp. Name
6.35	0.23	26900	0.019	89	13	33.89	0.033	Rough1
6.3	0.20	24300	0.018	173	13	30.70	0.033	Rough2

Table (2): Hydraulic characteristics of experiments above rough bed.

اندازه پروفیل لگاریتمی سرعت به دست آمده بر اساس اطلاعات سرعت طولی متوسط در نقاط گوناگون می‌تواند متفاوت باشد و تحت اثر زبری تغییر می‌کند. بر همین اساس هوور و اکرمین [28] سه نوع پروفیل سرعت متوسط طولی در مکان‌های مختلف مشاهده نمودند. آنها بیان داشتند که در نواحی بالای سنگدانه‌ها (و نه در محل حفره ایجاد شده در میان سنگ‌ها)، پروفیل سرعت از پروفیل لگاریتمی سرعت رشد شدیدتری را نشان می‌دهد (یعنی نسبت به پروفیل لگاریتمی، رابطه چاق‌تری را شاهد خواهیم بود) و این پروفیل را پروفیل سرعت شدت یافته^۱ نامیدند. در ناحیه پشتی سنگ-دانه‌ها پروفیل سرعت جریان شبیه به لایه اختلاطی^۲ است؛ و در نهایت در شرایطی که نفوذ زبری شدید نیست، این پروفیل بسیار شبیه به پروفیل لگاریتمی^۳ سرعت است [28]. بنابراین یافته‌های مطالعه حاضر همراه با مشاهده هوور و اکرمین [28] نشان می‌دهد که استفاده از اطلاعات برداشت شده تنها در یک موقعیت مکانی، برای محاسبه پروفیل لگاریتمی سرعت مناسب نیست.

علاوه بر سرعت متوسط طولی جریان، سایر مشخصات آشفتگی جریان نیز تحت اثر زبری در مکان تغییر می‌کنند. به منظور مشاهده این تغییر، در شکل (۴) تنش برشی رینولدز ($u'w'$) بی‌بعد شده با سرعت برشی نمایش داده شده است. در این شکل معادله توزیع خطی تنش برشی رینولدز در راستای عمق جریان نیز نمایش داده شده است [23]. این معادله به صورت زیر است:

به بیان دقیق‌تر مشاهده می‌شود که در این شکل سرعت طولی متوسط در نزدیکی جداره معمولاً از مقادیر حاصل از معادله لگاریتمی کمتر است، این در حالی است که در نقاط دور از بستر، مقادیر سرعت طولی متوسط بیشتر از مقادیر حاصل از معادله لگاریتمی است.

شکل ۳. پروفیل سرعت طولی متوسط در زمان بی‌بعد شده با

سرعت برشی در: (a) زبری ۱ (b) زبری ۲.

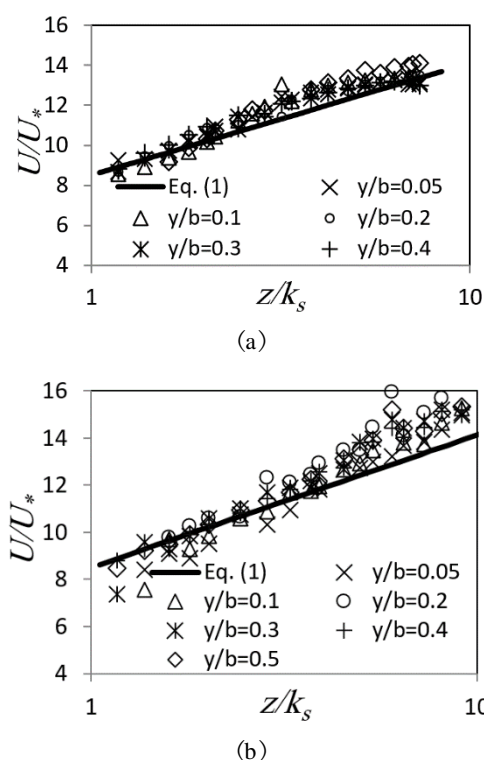


Fig. 3. Dimensionless mean longitudinal velocity with shear velocity (a) Rough1 (b) Rough2

علاوه بر این مشاهده می‌شود که در شرایط زبری ۲ شکل (۳-ب) این تغییرات محسوس‌تر از شرایط زبری ۱ شکل (۳-الف) است. این موضوع نشان می‌دهد که تا چه

1 Accelerated velocity profile

2 Mixing layer profile

3 Logarithmic profile

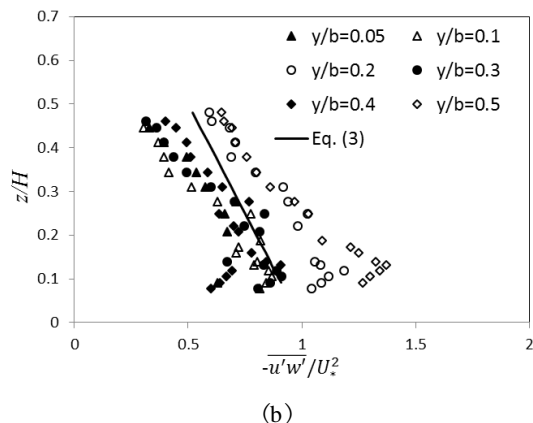


Fig. 4. Profiles of Reynolds shear stress dimensionalized with shear velocity (a) Rough1 (b) Rough2

بدین منظور، پوکراجاچ و همکاران [15] پیشنهاد نموده‌اند که برای تعیین سرعت برشی بستر از مقادیر تنش برشی رینولدز متوسط در مکان استفاده شود. براساس این روش پروفیل تنش برشی رینولدز متوسط در مکان که در نواحی دور از جداره از معادله خطی تبعیت می‌کنند، انتخاب می‌شوند. سپس براساس تحلیل رگرسیون، یک معادله خطی به این نقاط برازش داده می‌شود. در نهایت براساس معادله خط برازش داده‌شده، مجذور مقدار به‌دست آمده حاصل از برون‌یابی تا سطح مبنای بستر (که در این مطالعه $0.33 d_{90}$ بالای کف کانال در نظر گرفته شده است) را به‌عنوان سرعت برشی در نظر می‌گیریم.

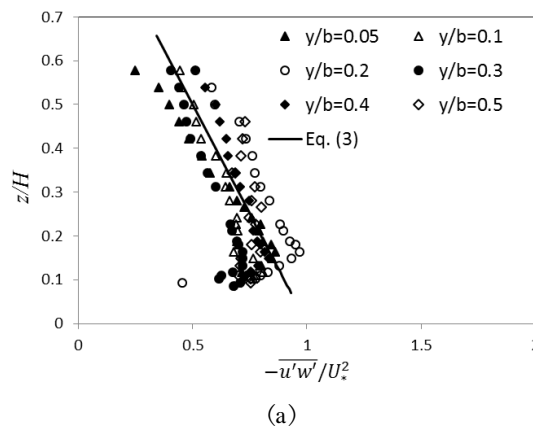
در شکل (۵)، مقادیر تنش برشی رینولدز متوسط در مکان برای هر دو برداشت نمایش داده‌شده است. مشاهده می‌شود که تنش‌های برشی متوسط در مکان در نقاط دور از بستر کاملاً از یک معادله خطی پیروی می‌نمایند. در نقاط نزدیک به بستر تنش برشی رینولدز از معادله خطی فاصله گرفته و شروع به کم‌شدن می‌نمایند. رفتار مشابهی در مطالعات پیشین نیز مشاهده شده است [15, 1]. این کاهش از این واقعیت ناشی می‌شود که در جداره‌ها شرایط عدم‌لغزش وجود دارد و در این شرایط تنش برشی تقریباً برابر صفر می‌شود [1]. پس میزان تنش برشی در نزدیکی بستر شروع به کاهش می‌نماید. براساس تنش‌های برشی متوسط در مکان در

$$\frac{\overline{u'w'}}{U_*^2} = \left(1 - \frac{z}{H}\right) \quad (2)$$

در شکل (۴)، مشاهده می‌شود که به‌طور کلی تنش برشی رینولدز در هر دو شکل ابتدا در امتداد عمق به‌صورت خطی افزایش پیدا می‌کند. اما در نزدیکی بستر ($z/H < 0.30$)، مقادیر تنش برشی رینولدز دیگر به‌طور خطی افزایش پیدا نمی‌کنند و به‌سرعت شروع به کاهش می‌گذارند. مشابه این نتایج در مطالعات قبلی نیز مشاهده شده‌است [23, 29]. مقایسه تنش برشی رینولدز در شرایط زیری ۱ شکل (۴-الف) و زیری ۲ شکل (۴-ب) نشان می‌دهد که مانند سرعت متوسط طولی، تنش برشی رینولدز در شرایط زیری ۲ بیشتر نوسان می‌کند و از معادله خطی برآورد شده تفاوت بیشتری دارد. علاوه بر این مشاهده می‌شود که شیب معادله خطی به‌دست آمده از معادله (۲) با شیب خط فرضی ناشی از اطلاعات آزمایشگاهی تنش برشی رینولدز متفاوت است. این مشاهده از آنجا ناشی می‌شود که سرعت برشی به‌دست آمده از روش شیب انرژی جدول (۲) از مقادیر حقیقی سرعت برشی در بستر کانال متفاوت است. این تفاوت نیز از آنجا ناشی می‌شود که در شرایط بستر زیر، زیری بستر با زیری جداره‌ها متفاوت، و بنابراین توزیع تنش برشی بین جداره‌های جانبی و بستر کانال با شرایط زیری یکسان جداره‌های جانبی و بستر، متفاوت است. بنابراین مقدار واقعی سرعت برشی باید از روش دیگری غیر از روش شیب انرژی به‌دست آید.

شکل ۴. پروفیل تنش برشی رینولدز بی‌بعد شده با سرعت برشی در

(الف) زیری ۱ (ب) زیری ۲.



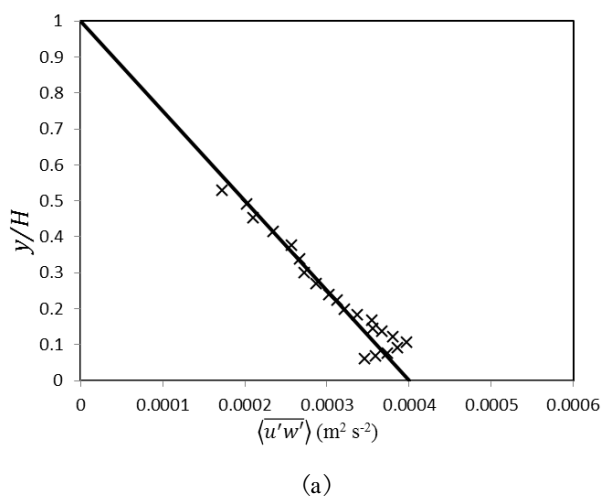
می‌نماییم و براساس آن مقدار و با داشتن داده‌های آزمایشگاهی، k_s ، A را از معادله (۳) و بر اساس تحلیل هم-بستگی^۳ محاسبه می‌کنیم. به بیان دقیق‌تر، یک خط به زوج اطلاعات سرعت متوسط دوگانه (سمت راست معادله ۳) و لگاریتم نپین موقعیت برداشت سرعت در عمق (ترم اول در سمت چپ معادله ۳) برازش می‌دهیم و مقدار ضریب همبستگی به دست آمده برای خط برازشی ثبت می‌شود.

۳- مقدار d را به‌میزان کوچکی افزایش می‌دهیم و مجدد گام دوم را تکرار می‌نماییم. بر این اساس ضریب همبستگی را محاسبه می‌نماییم.

۴- گام دوم و سوم را آن قدر تکرار می‌نماییم که ضریب همبستگی بیشینه مشخص شود. پارامترهای به‌دست آمده در شرایط ضریب همبستگی بیشینه، بهینه‌ترین مقادیر است و به-عنوان پارامترهای معادله لگاریتمی انتخاب می‌شوند.

به‌منظور بررسی درستی و قابلیت این روش در تعیین پارامترهای معادله لگاریتمی، این روش به‌نتایج آزمایشگاهی موجود اعمال شد. نتایج حاصل از این روش روی اطلاعات آزمایشگاهی در شکل (۶) و جدول (۳) نمایش داده شده است. مقادیر به‌دست آمده برای پارامترهای معادله لگاریتمی نشان می‌دهد که ثابت انتگرال‌گیری چندان با مقدار رایج آن (۸/۵۰) متفاوت نیست.

شکل ۵. پروفیل تنش برشی رینولدز متوسط در مکان در: (الف) زبری ۱ (ب) زبری ۲.



نقاط دور از بستر، سرعت برشی در بستر کانال به‌روش پوکراجاچ و همکاران [15] محاسبه و در شکل (۵) نشان داده‌شد. سرعت‌های برشی به‌دست آمده از مقدار به‌دست آمده به‌روش شیب انرژی بیشتر است. به‌علاوه مشاهده می‌شود مقدار به‌دست آمده در شرایط زبری ۲ از مقدار به‌دست آمده در شرایط زبری ۱ بیشتر است. این موضوع نشان می‌دهد که زبری بستر توزیع تنش برشی بین جداره‌های جانبی و بستر را تغییر می‌دهد و در نتیجه تنش برشی در بستر کانال را افزایش می‌دهد.

چنان‌که اشاره شد، معادله لگاریتمی سرعت بر مبنای سرعت متوسط زمانی چندان صحیح نیست. اما مستندات کافی وجود دارد که معادله لگاریتمی قابلیت کاربرد در سرعت متوسط دوگانه (در زمان و مکان) را دارد [1, 30, 31]. در این شرایط شکل معادله لگاریتمی سرعت متوسط دوگانه به‌شکل زیر است:

$$\frac{\langle U \rangle}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z-d}{k_s} \right) + A \quad (3)$$

پارامترهای این معادله مشابه معادله (۱) است. با این تفاوت که در این معادله $\langle U \rangle$ نشان دهنده سرعت متوسط دوگانه است که بر این اساس $\langle U \rangle = U + \bar{u}$ است که U سرعت متوسط در زمان و \bar{u} نشان‌دهنده نوسانات سرعت در مکان، و معروف به مؤلفه ناشی از شکل^۱ است. به‌علاوه در این معادله، پارامتر d اضافه شده است. این پارامتر که معروف به تغییر مکان صفحه‌صفر^۲ است، نشان‌دهنده موقعیتی در راستای قائم است که صفر معادله لگاریتمی سرعت در آن قرار دارد.

بر همین اساس، برای تعیین پارامترهای معادله لگاریتمی سرعت روش زیر پیشنهاد می‌شود:

۱- فرض می‌کنیم مقدار سرعت برشی از روش پوکراجاچ و همکاران [15] به‌دست آمده است و ثابت فون کارمن معلوم است ($\kappa = 0.41$).

۲- در ابتدا مقداری برای d به‌عنوان فرض اولیه، انتخاب

می‌شود. نیکورا و همکاران [30] روشی برای تعیین پارامترهای معادله لگاریتمی براساس سرعت طولی متوسط دوگانه ارائه نموده‌اند. براساس این روش با فرض معلوم بودن سرعت برشی و ثابت فون کارمن، مقدار تغییر مکان صفحه‌صفر براساس معادله (۴) به دست می‌آید:

$$\frac{d \langle U \rangle}{dz} = \frac{U_*}{\kappa(z-d)} \quad (4)$$

در ادامه این روش، مقادیر A' و k'_s از معادله (۳) به دست می‌آید. مزیت روش نیکورا و همکاران [30] در قیاس با روش ارائه شده در این مطالعه این است که مقادیر A' و k'_s بدون نیاز به مقایسه ضریب هم‌بستگی معادله (۳) به دست آمده‌اند. به علاوه این روش قابلیت استفاده در شرایط استغراق نسبی پایین (نسبت عمق جریان به زبری معادل کوچکتر از ۲۰) را دارا می‌باشد [30, 32]. هر چند که باید توجه داشت نرخ تغییرات سرعت طولی در راستای قائم که براساس اطلاعات آزمایشگاهی محاسبه شده است، خطای قابل توجهی (ناشی از تقسیم خطای موجود در محاسبه سرعت تقسیم بر مقدار کوچک dz) را شامل می‌شود.

دی و داس [33] نیز روش دیگری برای تعیین پارامترهای معادله لگاریتمی براساس سرعت طولی متوسط دوگانه ارائه نمودند. در این روش، با فرض معلوم بودن سرعت برشی و ثابت فون کارمن، براساس رابطه زیر و مشابه روش ارائه شده در این نوشتار پارامترهای معادله لگاریتمی محاسبه می‌شود:

$$\frac{\langle U \rangle}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) \quad (5)$$

که در این رابطه z_0 پارامتر جدیدی است که متشکل از زبری معادل و ثابت انتگرال‌گیری است [33]. با وجود شباهت روش دی و داس [33] و روش ارائه شده در این مطالعه، مزیت اصلی معادله ۳ نسبت به معادله (۵) مفهوم فیزیکی پارامترهای معادله لگاریتمی است. به بیان دیگر z_0 پارامتری

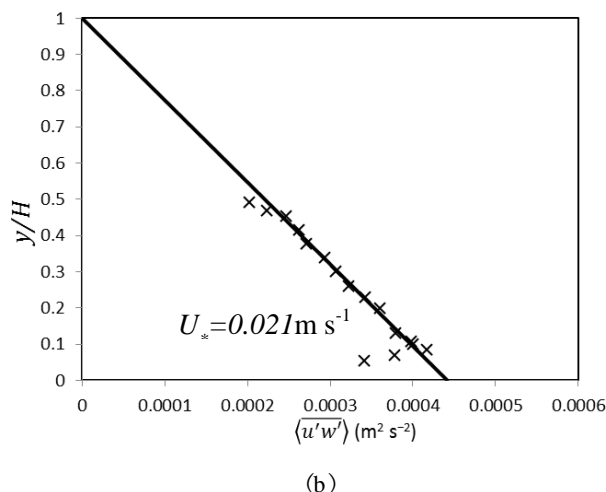


Fig. 5. Profiles of double-averaged Reynolds shear stress (a) Rough1 (b) Rough2.

به علاوه مقادیر به دست آمده برای تغییر مکان صفحه‌صفر (d) از سطح مرجع راستای قائم ($0.33d_{90}$) کمی پایین‌تر است. نکته قابل توجه در ارتباط با تغییر مکان صفحه‌صفر افزایش محسوس این مقدار در شرایط زبری ۲ در قیاس با زبری ۱ است. این مسأله نشان می‌دهد که با افزایش اندازه عناصر زبر در بستر، معادله لگاریتمی در عمق بیشتری می‌تواند معتبر باشد. در نهایت مقادیر به دست آمده برای زبری معادل از معادله لگاریتمی (k'_s) اختلاف چشم‌گیری نیز با d_{90} سنگ‌دانه‌های بستر ندارد. بنابراین انتخاب d_{90} به عنوان زبری معادل در این مطالعه و دست‌کم برای شرایط زبری حاضر مناسب می‌باشد.

اطلاعات آزمایشگاهی نمایش داده شده در شکل (۶) و برای هر دو آزمایش، متفاوت از شکل (۳)، از معادله لگاریتمی به دست آمده پیروی می‌نمایند. این تفاوت از آنجا ناشی می‌شود که اولاً مقدار سرعت برشی در شکل (۶) از روش پوکراجاچ و همکاران [15] محاسبه شده است، این در حالی است که در شکل (۳)، سرعت برشی از روش شیب-انرژی به دست آمده بود. به علاوه، در شکل (۶)، پارامترهای معادله لگاریتمی براساس نتایج آزمایشگاهی بهینه شده‌اند.

استفاده از سرعت طولی متوسط دوگانه در تعیین پارامترهای معادله لگاریتمی در مطالعات گذشته نیز مشاهده

جدول ۳. پارامترهای پروفیل لگاریتمی سرعت طولی متوسط در زمان و مکان براساس روش پیشنهاد شده در مطالعه حاضر.

Rough2	Rough1	Logarithmic profile parameters
۹۷	۷۷	A'
۶۳	۶۱	d (mm)
۶۷	۶۵	k_s' (mm)

Table (3): Double averaged Streamwise velocity profile parameters proposed in present study.

شکل ۶. پروفیل سرعت طولی متوسط در زمان و مکان، بی بعد شده با سرعت برشی در (a) زبری ۱ (b) زبری ۲.

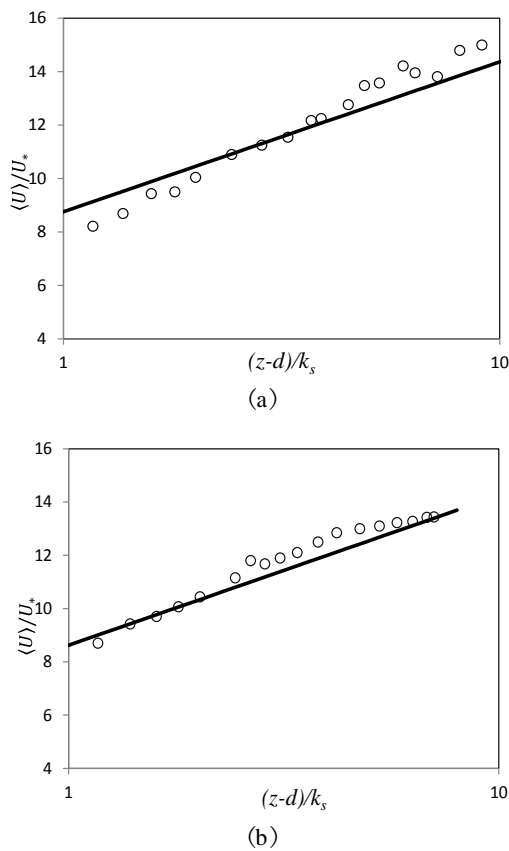


Fig. 6. Double-averaged profiles of streamwise velocity dimensionalized with shear velocity (a) Rough1 (b) Rough2.

۵- مراجع

- [1]Nikora V, Goring D, Mcewan I and Griffiths G, Spatially averaged open-channel flow over rough bed. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2001,127(2): 123-133.
 [2]Nikora V, Hydrodynamicsof aquatic ecosystems: an interface between ecology, biomechanics and environmental fluid mechanics. *River Research and Applications*,2010, 26: 367-384.
 [3]Gray WG, A derivation of the equation for multiphase transport. *Chemical Engineering Science*,1975, 30: 229-

است که معنای فیزیکی خاصی ندارد. این در حالی است که در k_s معادله (۳) ضریب زبری معادل است که نشان دهنده اهمیت زبری بستر در شرایط هیدرودینامیکی سیال است [30].

بنابراین می توان نتیجه گیری نمود که با استفاده از مقادیر سرعت متوسط دوگانه (در زمان و مکان) و براساس روش پیشنهاد شده در این مطالعه می توان پارامترهای معادله لگاریتمی سرعت را بهتر از روش های پیشین به دست آورد. در پایان توصیه می شود که در مطالعات آتی این روش در سایر شرایط هیدرولیکی (اندازه های زبری گوناگون و عمق های متفاوت سیال) به کار برده شود تا کارایی و محدودیت های این روش بهتر مشخص شود.

۴- نتیجه گیری کلی

در این مطالعه به بررسی جریان آشفته در کانال مستقیم با بستر زبر توسط روش متوسط گیری دوگانه پرداخته شد. اندازه گیری ها در مقطع کاملاً توسعه یافته لایه مرزی انجام و مشاهده شد که تمام ویژگی های جریان متشکل از سرعت طولی متوسط زمانی و تنش رینولدز تحت اثر زبری در مکان تغییر می کنند. بنابراین پروفیل سرعت طولی محاسبه شده بر مبنای اطلاعات سرعت متوسط زمانی در مکان های مختلف به ویژه در نزدیکی بستر متفاوت است. به منظور غلبه بر این مشکل پیشنهاد شد که پروفیل سرعت طولی براساس سرعت طولی متوسط دوگانه (در زمان و مکان) محاسبه شود. بدین منظور نخست پیشنهاد شد که سرعت برشی در بستر کانال (که برای تعیین پروفیل سرعت طولی لازم است) توسط پروفیل تنش برشی رینولدز متوسط در مکان محاسبه شود. به علاوه یک روش جدید، بر مبنای روش متوسط گیری دوگانه، برای تعیین پروفیل سرعت طولی پیشنهاد شد. استفاده از این روش در برداشت های آزمایشگاهی الگوی جریان نشان داد که این روش به خوبی قادر به تعیین پارامترهای پروفیل لگاریتمی سرعت طولی جریان است.

- Dopplervelocimeters. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 131(11): 1062–1073.
- [20] Kirkgoz MS, Ardichoglu M, Velocity profiles of developing and developed open channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997, 123(12): 1099-1105.
- [21] Tigrek S and Aras T, Reservoir Sediment Management. Taylor & Francis Floride, United States, 2011.
- [22] Smart G, Turbulent velocity profiles and boundary shear in gravel bed rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999, 125(2): 106-116.
- [23] Nezu I and Nakagawa H, Turbulence in Open-Channel Flows. A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1993.
- [24] Mohajeri, S.H., et al. The structure of gravel-bed flow with intermediate submergence: A laboratory study. *Water Resources Research*, 2015, 51(11): pp. 9232-9255.
- [25] Rodríguez, J.F. and García, M.H. Laboratory measurements of 3-D flow patterns and turbulence in straight open channel with rough bed. *Journal of Hydraulic Research*, 2008, 46(4): pp. 454-465.
- [26] McLean SR and Nikora V, Characteristics of turbulent unidirectional flow over rough beds: Double-averaging perspective with particular focus on sand dunes and gravel beds. *Water Resources Research*, 2006, 42: W10409.
- [27] Hardy RJ, Best JL, Lane SN and Carbonneau PE, Coherent flow structures in a depth-limited flow over a gravel surface: The role of near-bed turbulence and influence of Reynolds number. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(F1): F01003.
- [28] Hoover TM and Ackerman JD, Near-bed hydrodynamic measurements above boulders in shallow torrential streams: Implications for stream biota. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 2004, 3: 365-378.
- [29] Wang J, Dong Z, Chen C and Xia Z, The effects of bed roughness on the distribution of turbulent intensities in open-channel flow. *Journal of Hydraulic Research*, 1993, 31(1): 89-98.
- [30] Nikora V, Koll K, McLean S, Dittrich A and Aberle J, Zero-plane displacement for rough-bed open-channel flows. Pp. 83–92, *In Proceedings of International Conference on Fluvial Hydraulics, River Flow*, 2002, Louvain-la-Neuve, Belgium, Bousmar D & Zech Y, eds., Balkema.
- [31] Nikora V, McLean S, Coleman S, Pokrajac D, Mcewan I, Campbell L, Aberle J, Clunie D and Koll K, Double-averaging concept for rough-bed open-channel and overland flows: applications. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 133(8): 884-895.
- [32] Franca MJ, Ferreira RML and Lemmin U, Parameterization of the logarithmic layer of double-averaged streamwise velocity profiles in gravel-bed river flows. *Advances in Water Resources*, 2008, 31: 915–925.
- [33] Dey S and Das R, Gravel-bed hydrodynamics: double-averaging approach. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 138(8): 707-725.
- 233.
- [4] Whitaker S, The method of volume averaging. Kluwer Academic, Dordrecht, 1999.
- [5] Smith JD and McLean SR, Spatially averaged flow over a wavy surface. *Journal of Geophysical Research*, 1977, 83(12): 1735–1746.
- [6] Gimenez-Curto LA, and Corniero Lera MA, Oscillating turbulent flow over very rough surfaces. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101(9): 20745–20758.
- [7] Nikora V, Mcewan I, McLean S, Coleman S, Pokrajac D and Walters R, Double-averaging concept for rough-bed open-channel and overland flows: theoretical background. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 133(8): 873-883.
- [8] Righetti M, Flow analysis in a channel with flexible vegetation using double-averaging method. *Acta Geophysica*, 2008, 56(3): 801–823.
- [9] Cameron SM, Nikora VI, Albayrak I, Miler O, Stewart S and Siniscalchi F, Interactions between aquatic plants and turbulent flow: a field study using stereoscopic PIV. *Journal of Fluid Mechanics*, 2013, 732: 345-372.
- [10] Manes C, Pokrajac D and Mcewan I, Double-averaged open-channel flows with small relative submergence. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 133(8): 896-904.
- [11] Aberle J, Koll K and Dittrich A, Form induced stresses over rough gravel-beds. *Acta Geophysica*, 2008, 56(3): 584-600.
- [12] McLean SR, Wolfe SR and Nelson JM, Spatially averaged flow over a wavy boundary revisited. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(C7): 15743–15753.
- [13] Fazlollahi, A. Afzalimehr, H. Rousseau, A. Effect of Streamwise Pool Geometry on Shear Stresses. *International Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 3(1): 1-9.
- [14] Franca, M.J., Ferreira, R.M.L., Cardoso, A.H. and Lemmin U. Double-average methodology applied to turbulent gravel-bed river flows. Pp. 59-65, *In Proceedings of International Conference Fluvial Hydraulics, River Flow*, 2010, Lisbon, Portugal, edited by Ferreira R and et al, Taylor & Francis.
- [15] Pokrajac D, Finnigan J, Manes C, Mcewan I and Nikora V, On the definition of the shear velocity in rough bed open channel flows. Pp. 163–171, *In Proceedings of International Conference Fluvial Hydraulics, River Flow*, 2006 Lisbon, Portugal, edited by Ferreira R and et al, Taylor & Francis.
- [16] Mohajeri SH, Investigating effects of bed roughness and shear stress in open-channel, Master thesis in water engineering, Department of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University, 2010.
- [17] Mohajeri H, Salehi Neyshbouri AA and Safarzade A, A three tube pressure instrument for measuring the local bed shear stress in smooth and rough beds. Pp. 100-106, *In Proceeding of the 2nd IAHR European Congress*, 2012, Munich, Germany, Rutschmann P Grünzner M Hötzl S, eds., Balkema.
- [18] Goring D and Nikora V, Despiking acoustic Doppler velocimeter data. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, 128(1): 117-126.
- [19] Garcia CM, Cantero M, Niño Y and Garcia MH, Turbulence measurements using acoustic

Determination of the Longitudinal Velocity Profile of Turbulent Flow over Rough Beds Using Double Averaging Method

S. H. Mohajeri^{1*}, A. Safarzadeh², S. A. A. Salehi Neyshabouri³

1- Assist. Prof., Dept. of Civil Eng., Faculty of Eng., Kharazmi University, Tehran, Iran

2- Assoc. Prof., Dept. of Civil Eng., Faculty of Eng., Univ. of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

3- Prof., Water Engineering Research Institute, Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran

* hossein.mohajeri@khu.ac.ir

Abstract:

Most natural open-channel and overland flows belong to the class of hydraulically rough-bed flows. Although hydrodynamics of such flows has been studied extensively for the last two decades, there are still many unsolved problems awaiting clarification. In general, turbulent flow is modeled and studied through Reynolds averaged Navier-Stokes (RANS) equations. Despite the ability of these equations in modeling of turbulent flows, they have some deficiencies in natural flows (such as atmospheric flow or water flows in rivers and estuaries) where flow characteristics vary in multiple time and length scales. Moreover, RANS equations are locally resolved the flow characteristics, which is in contrast to many hydraulics fundamental concepts such as uniformity, Manning coefficient, water discharge. To resolve this problem, the time averaging of the Navier-Stokes equations should be supplemented by spatial averaging in a plane parallel to the mean bed surface. After such an averaging a new system of equations will be obtained which are known as double averaged, or spatially averaged, Navier-Stokes equations. The double-averaging procedure gives new momentum and continuity equations for fluid, which are averaged in both time and space domains and which explicitly contain important additional terms such as form-induced stresses and, for the flow region below roughness tops, form and viscous drag terms. These type of Reynolds averaged Navier-Stokes equations have various applications in hydraulic studies. One of the main application of these equations is in heterogeneous turbulent flow above rough surfaces such as vegetated or gravel bed flow. The present study demonstrates applications of double averaged equations in study of rough bed flows. To this end, laboratory measurement were conducted in an open-channel laboratory flume. Bottom of the channel is roughened using two series of crushed stone which are spread randomly at the bed and then glued to the bed. Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) is used to measure three components of velocity field. Both velocity profile and Reynolds shear stress are estimated based on the measured velocity time series. Results of these measurements show that velocity field in the near bed region shows strong spatial variation due to the rough bed elements protrusions. To properly take in to account this spatial variation in shear velocity, spatially averaged Reynolds shear stress profile can be reliably used for determination of the bed shear stress. Furthermore, a new method for determination of the vertical logarithmic profile of streamwise velocity is introduced using the bed shear velocity obtained from spatial averaging. This method is an iterative process in which parameters of logarithmic profile, i.e. zero-plane displacement (the bed origin displacement due to the rough elements presence) and constant if integration will be estimated based on the measured velocity profile. Results of experimental data analysis, using the new method, show that the logarithmic profile parameters can be efficiently determined.

Keywords: Rough bed, Velocity profile, Turbulent flow, Acoustic Doppler velocimeter (ADV), Double averaging.