

## بررسی عددی پروفیل‌های سرعت در کانال‌های روباز با بستر زبر

فاطمه جعفری<sup>1\*</sup>، اکرم عباسپور<sup>2</sup>، علی حسین زاده دلیر<sup>3</sup>

تاریخ دریافت: 94/04/29 تاریخ پذیرش: 95/03/04

<sup>1</sup> دانشجوی دکتری گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

<sup>2</sup> استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

<sup>3</sup> استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: [jafari.fj91@gmail.com](mailto:jafari.fj91@gmail.com)

### چکیده

توزیع سرعت جریان به دلیل اینکه برای بررسی سرعت متوسط و بیشینه و برآورد دبی و همین‌طور ارزیابی تنش برشی روی کناره‌ها موردنیاز است، تقریباً مهمترین بحث در تمام مطالعات جریان‌های کانال‌های روباز می‌باشد. توزیع سرعت در مقطع عرضی یک کانال تحت تأثیر شکل هندسی، ناهمواری‌ها و وجود پیچ و خم در کانال‌هاست و قبل از حل انواع مسائل هیدرولیکی در کانال‌های روباز، باید مطالعه و بررسی شود. مشخصه‌های زبری که بیشتر جریان را تحت تأثیر قرار می‌دهد عبارتند از: اندازه، شکل، تراکم و فاصله بین زبری‌ها. در این مطالعه، به بررسی عددی پروفیل‌های سرعت در کانال‌های روباز با بستر زبر پرداخته شد. در این بررسی عددی از نرم‌افزار فلوئنت استفاده شده است. اساس این روش بر مبنای حجم محدود می‌باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در جریان روی بستر زبر سرعت جریان در طول کانال افزایش می‌یابد در نتیجه تنش برشی نیز در طول جریان روند افزایشی داشته است. همچنین در جریان روی بستر زبر شیب سطح آب روند افزایشی داشته و افت انرژی افزایش می‌یابد. ضریب اصطکاک سطحی برای بسترهای مختلف تعیین گردید که مقادیر محاسباتی و مدل عددی تطابق خوبی را دارند. به‌ازای تعداد زبری بیشتر تأثیر آن روی پروفیل سرعت بیشتر بوده است.

واژه‌های کلیدی: توزیع سرعت، تنش برشی، زبری بستر، کانال روباز، مدل عددی

## Numerical Investigation of Velocity Profiles in Open Channels with Rough Bed

F Jafari<sup>1\*</sup>, A Abbaspour<sup>2</sup>, A Hosseinzadeh dalir<sup>3</sup>

Received: 20 July 2015

Accepted: 24 May 2016

<sup>1</sup> PhD. Student, Dept. of Water Engineering, Agric., Univ. of Tabriz, Iran

<sup>2</sup> Assist. Prof., Dept. of Water Engineering, Agric., Univ. of Tabriz, Iran

<sup>3</sup> Prof., Dept. of Water Engineering, Agric., Univ. of Tabriz, Iran

\*Corresponding Author, Email: [jafari.fj91@gmail.com](mailto:jafari.fj91@gmail.com)

### Abstract

The velocity distribution is almost the most important argumentation in all of the open channel flows studies, since it is necessary for study of the mean and maximum velocities, estimation of discharge as well as for evaluation of shear stress on channel sides. The flow velocity distribution in a channel cross section depends on the shape of the section, the roughness of the channel, and the presence of the bends. So, it should be investigated before solving many of hydraulic problems in open channels. Characteristics of the roughness which mostly affect the flow are the size and shape of the roughness elements and spacing between them and also, the roughness concentration. In this study, velocity profiles in open channels with rough bed were investigated. FLUENT CFD package was used to implement the numerical method on the basis of the finite volume method. Results showed that the flow velocity along the canal increased over the rough bed. So, the shear stress, slope of the water surface and energy lose were increased in the flow direction. The skin friction coefficients were determined for different rough beds which were in good agreement with the numerical model values. As the number of roughness elements became more, their effects on velocity profiles were increased.

**Keywords:** Bed roughness, Numerical model, Open channel, Shear stress, Velocity distribution

### مقدمه

سرعت جریان در یک مقطع کانال معمولاً از نقطه‌ای به نقطه دیگر تغییر می‌کند. این امر ناشی از تنش برشی در کف و دیواره‌های کناری کانال و به علت وجود سطح آزاد جریان می‌باشد. توزیع سرعت در مقطع کانال به عواملی مانند دانسیته و لزجت سیال، شکل مقطع، زبری دیواره‌های کانال و وجود انحنا در مسیر کانال بستگی دارد (فغفور مغربی و رحیم پور 1386).

به بستری که سطح آن از ناهمواری‌های منظم و یا نامنظم تشکیل شده است، بستر زبر گفته می‌شود

توزیع سرعت تقریباً مهمترین بحث در تمام مطالعات جریان‌های کانال‌های روباز بوده به دلیل اینکه برای سرعت متوسط و بیشینه و برآورد دبی و ارزیابی تنش برشی روی کناره‌ها مورد نیاز می‌باشد. لذا پروفیل سرعت طولی جریان، درون مقطع عرضی از یک کانال سال‌ها مورد تحقیق پژوهشگران مختلف بوده است (احدی و همکاران 1389). در سال‌های اخیر، این موضوع با حل معادلات هیدرودینامیک ناویر-استوکس که با مدل‌های متلاطم ترکیب شده است، بررسی می‌گردد. (عباسپور و فرسادی زاده 1392).

الکترومغناطیس مدلی جدید برای توزیع سرعت ارائه دادند که در این توزیع سرعت پدیده دیپ به خوبی گنجانده شده بود. کارنی و همکاران (2006) تاثیر بسترهای زبر رودخانه‌های درشت دانه را در دینامیک سیالات محاسباتی نشان دادند. رفتار بستر زبر متخلخل برای بررسی حالت‌های متغیر وسیع شامل بسترهای با نسبت زبری زیاد می‌تواند به‌کار برده شود که در گذشته با توجه به چالش‌هایی در مدل CFD مطالعه نشده است. استون و هاچکس (2007) بر اساس مطالعات خود بر روی رودخانه‌های با بستر قلوه‌سنگی بیان نمودند که توزیع نیمرخ‌های سرعت در قسمت‌های مختلف رودخانه از نظر شکل بستر، به‌صورت لگاریتمی هستند و انحراف نسبی از این قانون در اندازه‌گیری انجام شده به‌دلیل وجود اجزاء زبری بزرگ در بستر، جریان‌های ثانویه و دیواره‌های نامنظم رودخانه می‌باشد.

فغفور مغربی و رحیم‌پور (1386) روشی جدید برای پیش‌بینی خطوط هم‌سرعت بدون بعد در کانال‌های مستطیلی با زبری‌های یکتواخت و غیریکتواخت ارائه کرده‌اند. بر اساس نتایج ارائه شده، مدل بیشینه سرعت برای نسبت عرض کانال مستطیلی بر عمق جریان کوچکتر از 2 در زیر سطح آزاد جریان را می‌توان پیش‌بینی نمود. نتایج حاصل از مدل نشان می‌دهد که با افزایش زبری سطح، بیشینه سرعت به فاصله‌ای دورتر از سطح زبر رانده می‌شود.

علت اصلی این‌که سرعت بیشینه در نزدیکی سطح آزاد پیش می‌آید بیش از آن‌که تحت تأثیر تنش برشی ناشی از مقاومت هوا باشد، تحت تأثیر جریان‌های ثانویه ضعیف می‌باشد. جریان‌های ثانویه جریان‌هایی هستند که در صفحه مقطع جریان و یا حول محوری عمود بر صفحه مقطع جریان به وجود می‌آیند. جریان‌ها در انحناها به جریان‌های ثانویه قوی موسوم می‌باشند. در کانال‌های بدون انحنا، به جهت تأثیر زبری دیواره و نامنظمی مقطع، جریان‌های ثانویه ضعیف ایجاد می‌گردند (حسینی و ابریشمی 1389).

(نژند علی و همکاران 1390). زبری سطوح به‌صورت موضعی به افزایش تلاطم در نزدیکی دیواره و در نتیجه افزایش تنش برشی دیواره منتهی می‌شود. میزان سرعت عمق میانگین با افزایش در مقدار زبری دیواره‌ها کاهش می‌یابد. در مورد نحوه تغییرات سرعت و تنش برشی مرزی می‌توان گفت که تنش برشی مرزی و سرعت عمق میانگین با یکدیگر نسبت معکوس دارند. به گونه‌ای که افزایش یکی از این دو پارامتر منجر به کاهش پارامتر دیگر می‌شود (اژدری مقدم و تاج نسایی 1389).

چیو و لین (1983) و چیو و چیو (1986) در خصوص اثر متقابل بین جریان‌های اولیه و ثانویه، توزیع تنش برشی، خصوصیات کانال (از جمله زبری، شیب و مشخصات هندسی) و دیگر پارامترهای وابسته در مجاری روباز تحقیقاتی انجام دادند. بر اساس نتایج مطالعات ایشان محاسبه تنش برشی نیازمند اندازه‌گیری دقیق پروفیل سرعت است.

نیکولاس (2001) مدل دینامیک سیالات محاسباتی را بر روی زبری در رودخانه‌های با بستر شنی بررسی کرده است. داده‌های به‌دست آمده برای رودخانه رابطه‌ای لگاریتمی بین سرعت و فاصله از بستر را نشان می‌دهد. بلاچندر و همکاران (2002) روی سرعت برشی و قانون توانی پروفیل سرعت در جریان روی کانال‌های روباز کم عمق صاف و زبر تحقیق کردند و نشان دادند که قانون توانی در توسعه و امتحان روش‌های محاسباتی برای حل جریان نزدیک دیوار در هندسه پیچیده مفید است.

جریان در کانال‌های روباز عموماً متلاطم است. برای کانال‌های عریض جریان می‌تواند دوبعدی فرض شود و برای کانال‌های باریک جریان ممکن است سه بعدی فرض شود. در کانال‌های با مومنت کم جریان‌های ثانویه از کناره‌ها به طرف مرکز و در مومنت زیاد از سطح آزاد به طرف بستر حرکت می‌کند که این باعث ایجاد پدیده دیپ می‌شود (یالیو و همکاران 2003).

مغربی و رحیم‌پور (2005) با استفاده از مشابهت مفهوم توزیع سرعت و استفاده از مفاهیم

کانال بوده است. به طوری تأثیر زبری روی پروفیل‌های سرعت به‌ازای زبری‌ها و دبی‌های مختلف به‌دست آمده و روی منحنی توزیع سرعت بررسی‌هایی انجام گردیده است و از نتایج توزیع سرعت، منحنی تنش برشی، شیب سطح آب، افت انرژی، ضریب اصطکاک سطحی به‌دست آمده است و بررسی‌هایی در ارتباط این منحنی‌ها با توزیع سرعت انجام شده است.

### مواد و روش‌ها

#### دینامیک سیالات محاسباتی

مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی به طور وسیع در ریاضیات کاربردی و مکانیک سیالات برای شبیه‌سازی جریان سه بعدی در کانال‌ها با هندسه ساده استفاده می‌شود (نیکولاس 2001). دلایل گسترش استفاده از مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی را می‌توان در ارائه حل تقریبی برای معادلات ناویر-استوکس، کاهش بازه زمانی برای تغییر پارامترها، طراحی و توسعه ابزارها، ارزان‌تر بودن نسبت به مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی و نیز قابلیت اعتماد بالای آن برای شبیه‌سازی شرایط جریانی که انجام آن در آزمایشگاه امکان‌پذیر نیست، دانست. حل مسائل در دینامیک سیالات محاسباتی به کمک روش‌های عددی در قالب الگوریتم‌هایی صورت می‌پذیرد (ژدردی مقدم و تاج نسایی 1389).

جریان سیال توسط سه معادله ناویر-استوکس بیان می‌شود. این معادلات با استفاده از سه روش اصلی دینامیک سیالات محاسباتی شامل شبیه‌سازی ناویر-استوکس متوسط رینولدزی (RANS)، گرداب‌های بزرگ (LES) و عددی مستقیم (DNS) حل می‌شود (بمینایونی 2010). مطالعات اخیر کاربرد CFD در رودخانه‌های بستر شنی توانایی چنین مدل‌هایی را برای پیش‌بینی تغییرات هیدرولیکی در ناحیه نزدیک بستر را به اثبات رسانده است (نیکولاس 2001).

افضلی مهر و همکاران (2011) بیان کردند پیروی یا عدم پیروی از توزیع لگاریتمی برای نیم‌رخ-های سرعت جریان به‌دلیل تأثیر متقابل زبری عناصر و شکل آنها بر دینامیک جریان متلاطم و چگونگی توسعه لایه مرزی متلاطم در عمق جریان است و بر اساس غالب و مغلوب بودن هر یک از این عوامل روند توزیع این نیم‌رخ‌ها متفاوت خواهد بود. پیو (2012) قانون توزیع سرعت لگاریتمی را برای جریان کانال‌های روباز صاف و زبر پیشنهاد داده است. در قانون پیشنهاد شده که با استفاده از فرضیات جریان متلاطم کامل توسعه یافته است تأثیر جریان‌های ثانویه ناچیز فرض نشده است.

عباسپور و فرسادی زاده (1392) تأثیر انواع مختلف بستر زبر بر روی لایه مرزی جریان متلاطم با بررسی سرعت جریان یک بعدی را مطالعه نمودند. بسترهای زبر شامل نوارهای نیم استوانه و دوزنقه‌ای با فواصل  $p$  در امتداد جریان و ارتفاع زبری  $k$  بودند. بررسی‌ها نشان داد که سرعت بی‌بعد  $U^+$  نسبت به بستر بدون زبری کاهش زیادی داشته است. مقدار متوسط ضریب دراگ  $C_f$  و اصطکاک  $F_i$  در بسترهای زبر با افزایش فواصل زبری کاهش می‌یابد. توسعه جریان در مجاری روباز با بستر زبر با استفاده نرم افزار FLUENT که یک مدل دینامیک سیالات است بررسی گردید. در این تحقیق مدل‌های آشفتگی  $k-\varepsilon$  استاندارد و RNG  $k-\varepsilon$  در شرایط جریان زیر بحرانی استفاده گردید و سطح آزاد جریان با روش عددی جزء حجم سیال VOF تعیین شد. توزیع سرعت روی بسترهای زبر در ناحیه لگاریتمی در این تحقیق مطالعه گردید و تابع زبری سرعت  $DU^+$  در مقایسه با بستر صاف ارزیابی شد.

در این تحقیق سعی شده است تا به بررسی عددی توزیع سرعت با استفاده از داده‌های هندسی و هیدرولیکی مشو (2006) پرداخته شود. هدف اصلی در این تحقیق رسم توزیع سرعت با استفاده از داده‌های حاصل از نرم‌افزار FLUENT به‌ازای زبری‌های مختلف نیم‌کره، با فواصل مختلف و مقاطع متفاوت در طول

## مدل عددی

$$C_{1e} = 1.44, C_{2e} = 1.92, C_{3e} = -1, a_e = 1.2,$$

$$a_k = 1$$

که در آن  $a_e$  و  $a_k$  به ترتیب عکس اعداد آشفتگی پرانتل برای  $\varepsilon$  و  $k$  و  $m_{eff}$ ، ویسکوزیته مؤثر می‌باشند.

شیب سطح آب با استفاده از شیب نمودار برای پروفیل سطح آب رسم شده به دست آمده است.

$$h_f = S_w \cdot L$$

تعیین می‌شود و برای محاسبه ضریب دارسی -

$$f = \frac{h_f}{L} \cdot \frac{8gR}{u^2}$$

در این روابط  $L$ : طول کانال،  $R$ : شعاع هیدرولیکی و  $S_w$ : شیب سطح آب،  $h_f$ : افت انرژی،  $f$ : ضریب اصطکاک،  $g$ : شتاب گرانش،  $u$ : سرعت جریان می‌باشند.

برای محاسبه ضریب اصطکاک سطحی از دو معادله تجربی 3 و 4 استفاده شده است (اکسیان‌یی (2010).

$$C_{f1} = 0.37(\text{LogRe})^{-2.5} \quad [3]$$

$$C_{f2} = 0.427(\text{LogRe} - 0.407)^{-2.4} \quad [4]$$

در این رابطه  $Re$ : عدد رینولدز است.

در حالت کلی برای مقایسه تأثیر زبری روی پروفیل‌های سرعت از رابطه لگاریتمی زیر استفاده شده است:

$$\frac{u}{u_*} = 5.75 \log\left(\frac{y}{k_s}\right) + A - DU^+ \quad [5]$$

که در این رابطه  $y$  عمق جریان و  $k_s$  ارتفاع زبری بسترها می‌باشند. ضریب ثابت  $A$  برای بستر صاف برابر 5/5 می‌باشد و  $DU^+$  برای زبری‌های مختلف متفاوت است. مقادیر  $DU^+$  با استفاده از نرم افزار SPSS محاسبه شده است.

$$\log \frac{u}{u_*} = \frac{y}{k_s} \quad \text{در برابر}$$

به‌ازای زبری‌ها و دی‌های مختلف داده شده و سپس با استفاده از رگرسیون خطی به دست آمده، مقدار  $DU^+$  محاسبه شده است.

در این تحقیق از نرم افزار FLUENT برای شبیه‌سازی توزیع سرعت جریان استفاده شده است. برای شبیه‌سازی جریان چند فاز از مدل حجم سیال و برای شبیه‌سازی جریان متلاطم از مدل  $k-\varepsilon$  و مدل RNG استفاده شد. الگوریتم پیزو<sup>1</sup> برای کوپل سرعت و فشار، روش نیروی وزنی جسم<sup>2</sup> برای گسسته سازی معادله فشار، طرح Quick برای انفصال جابه جایی معادلات مومنتم، طرح Upwind مرتبه دوم برای انفصال جابه جایی معادلات متلاطم منظور شده است. معادلات  $k$  و  $\varepsilon$  در مدل  $k-\varepsilon$  RNG به صورت زیر می‌باشد (بی‌نام (2006):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad [1]$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1e} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3e} G_b) - C_{2e} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - \rho \varepsilon \quad [2]$$

که در این روابط  $k$ : انرژی جنبشی متلاطم،  $\varepsilon$ : نرخ اتلاف انرژی جنبشی و  $G_k$ : تولید انرژی جنبشی آشفتگی می‌باشند و وابسته به گرادیان سرعت متوسط هستند.

$t$ : جرم مخصوص سیال،  $t$ : زمان،  $x_i$ : مؤلفه‌های طول به‌ازای  $i=1,2,3$ ;  $u_i$ : مؤلفه‌های سرعت جریان به‌ازای  $i=1,2,3$  و  $x_j$ : مؤلفه‌های طول به‌ازای  $j=1,2,3$ .

$G_b$ : تولید انرژی جنبشی آشفتگی می‌باشد، که وابسته به نیروی ارشمیدس است.

$Y_M$ : توزیع نوسانات آشفتگی در جریان‌های تراکم‌پذیر است.

ضرایب ثابت معادلات فوق به صورت زیر هستند:

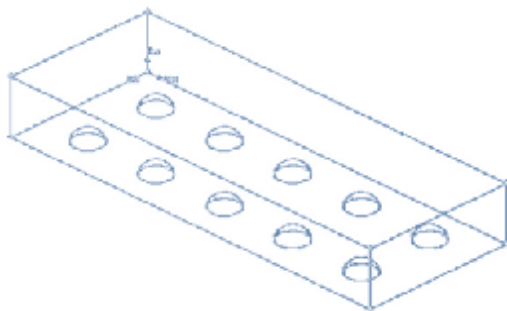
<sup>1</sup> PISO

<sup>2</sup> Body force weighted

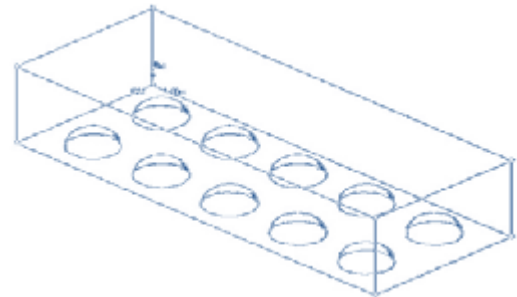
مرزی مختلف می‌باشد. برای تمام حالت‌ها جریان زیر-بحرانی است.

در شکل 1 هندسه مدل‌های شبیه‌سازی نشان داده شده است. برای حالت A در شکل 1- الف نیمکره-هایی با قطر 112 و فواصل 190 میلی‌متر، برای حالت B1 در شکل 1- ب نیمکره‌هایی با قطر 72 و فواصل 190 میلی‌متر و برای حالت B2 در شکل 1- ج نیمکره‌هایی با قطر 72 و فواصل 77 میلی‌متر به صورت موازی قرار گرفته‌اند. برای مش‌بندی صفحات نیز از اجزاء مثلثی از نوع Pave و مش‌بندی حجم از اجزاء چهارضلعی استفاده گردید.

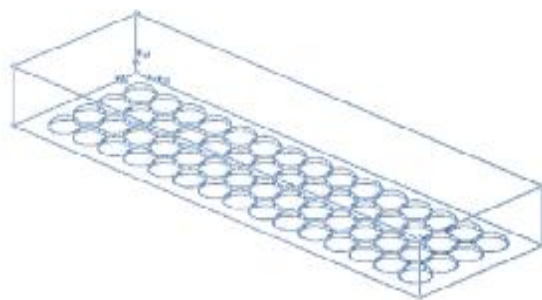
به‌منظور شبیه‌سازی در فلوئنت مطابق با مدل هندسی مشو (2006) کانالی به طول 1 متر، عرض 0/38 متر و ارتفاع متناسب با عمق آب در نظر گرفته شده است. شیب کانال نیز 0/0047 می‌باشد. برای جریان، دوفاز آب و هوا در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی در یک کانال روباز مستطیلی با زبری‌های یکنواخت نیمکره با قطرهای 112 و 72 میلی‌متری و فواصل مرکز به مرکز 190 و 77 میلی‌متری انجام شده است. تعداد نیمکره‌ها در هر متر طول کانال 10 و 60 می‌باشد. برای این منظور برای هر حالت 5 عمق مختلف فرض شده است که در کل تعداد شبیه‌سازی‌ها 15 مورد با شرایط



(ب)



(الف)



(ج)

شکل 1- هندسه کانال با بستر زیر مختلف (الف) نیمکره‌هایی با قطر 112 و فواصل 190 میلی‌متر (ب) نیمکره‌هایی با قطر 72 و فواصل 190 میلی‌متر (ج) نیمکره‌هایی با قطر 72 و فواصل 77 میلی‌متر.

## نتایج و بحث

از داده‌های آزمایشات انجام شده توسط مشو (2006) برای شبیه‌سازی در فلوئنت استفاده شده است. جدول 1 نتایج شبیه‌سازی فلوئنت و مدل فیزیکی مشو (2006) را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول 1

مشاهده می‌شود نسبت خطای سرعت متوسط نیز بین 1-20 درصد است. برای محاسبه درصد خطای سرعت متوسط از قسـمـدر مـطـلـبـق رابـطـه  

$$\left( \frac{V_{\text{محاسباتی}} - V_{\text{مشاهداتی}}}{V_{\text{مشاهداتی}}} \right) \times 100$$
 استفاده شده است.

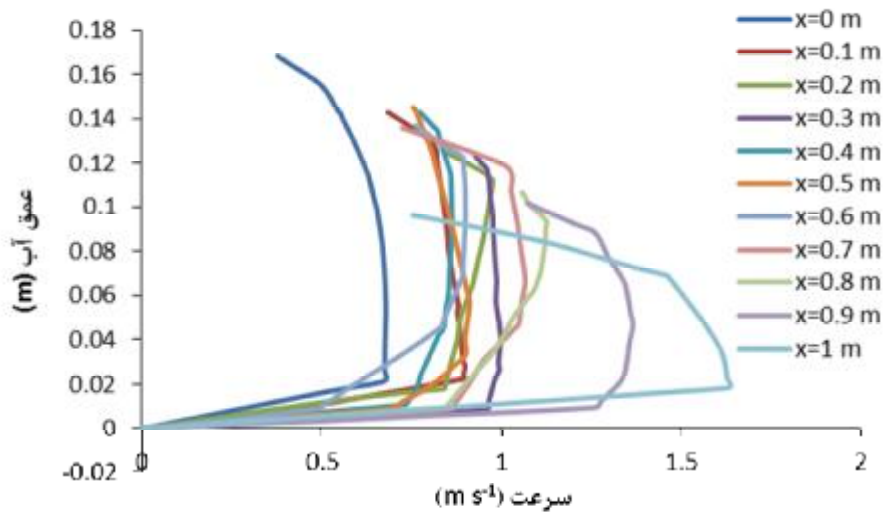
یافته و ارتفاع معادل سرعت نیز افزایش می‌یابد و در نتیجه فاصله سطح آب در این مقطع تا خط انرژی از فاصله سطح آب در قبل از برآمدگی تا خط انرژی بیشتر بوده و سطح آب مقداری پایین می‌افتد. شکل 2 توزیع سرعت برای حالت A4 در مقطعی طولی کانال به فواصل 10 سانتی‌متری را نشان می‌دهد. با توجه به افت انرژی در طول جریان، سطح آب در طول جریان کاهش داشته و ارتفاع معادل سرعت افزایش یافته و در نتیجه سرعت در طول کانال افزایش می‌یابد. به طوری که بیشترین سرعت و کمترین عمق در انتهای کانال بوده است. همچنین سرعت بیشینه نیز پایین‌تر از سطح آب قرار گرفته است.

با توجه با اینکه جهت مقایسه سرعت‌ها از سرعت متوسط جریان استفاده شده است در برخی موارد خطا زیاد و در مواردی کم است چنین به نظر می‌رسد که برای مقایسه دقیق باید داده‌های مشاهداتی سرعت داشته باشیم که متأسفانه داده‌های مشو (2006) اندازه‌گیری سرعت انجام نداده است.

در این تحقیق جریان زیر بحرانی در نظر گرفته شده است. در صورتی که وضعیت جریان قبل از برآمدگی زیر بحرانی باشد کاهش عمق پیش خواهد آمد. برای تحلیل می‌توان گفت که چون دبی ثابت بوده و عمق آب قبل از برآمدگی بیشتر از عمق آب روی برآمدگی می‌باشد لذا سرعت روی برآمدگی افزایش

جدول 1- داده‌های هیدرولیکی شبیه‌سازی شده با فلوئنت.

مدل‌ها	شماره مدل	سرعت (m s <sup>-1</sup> ) مشو (2006)	سرعت (m s <sup>-1</sup> ) فلوئنت	درصد خطای سرعت
A	A1	0/1384	0/148	6/44
	A2	0/2624	0/265	1/09
	A3	0/4455	0/483	7/69
	A4	0/5048	0/61	17/22
	A5	0/5701	0/677	15/77
B1	B1-1	0/2014	0/194	3/64
	B1-2	0/3346	0/378	11/54
	B1-3	0/5709	0/501	13/86
	B1-4	0/6372	0/608	4/82
	B1-5	0/692	0/686	0/86
B2	B2-1	0/2239	0/251	10/73
	B2-2	0/3189	0/396	19/39
	B2-3	0/4447	0/532	16/34
	B2-4	0/5466	0/669	18/31
	B2-5	0/5651	0/671	15/76



شکل 2- توزیع سرعت طولی برای حالت A4.

زبری مانند مانع عمل می‌کند و چون کاهش فشار جریان در بین زبری‌ها دیده می‌شود سرعت بیشینه در نزدیک سطح زبری‌ها ایجاد می‌شود. در نتیجه افت انرژی در نزدیک بستر زبربالا بوده و سرعت‌ها به طرف سطح آب کاهش می‌یابد.

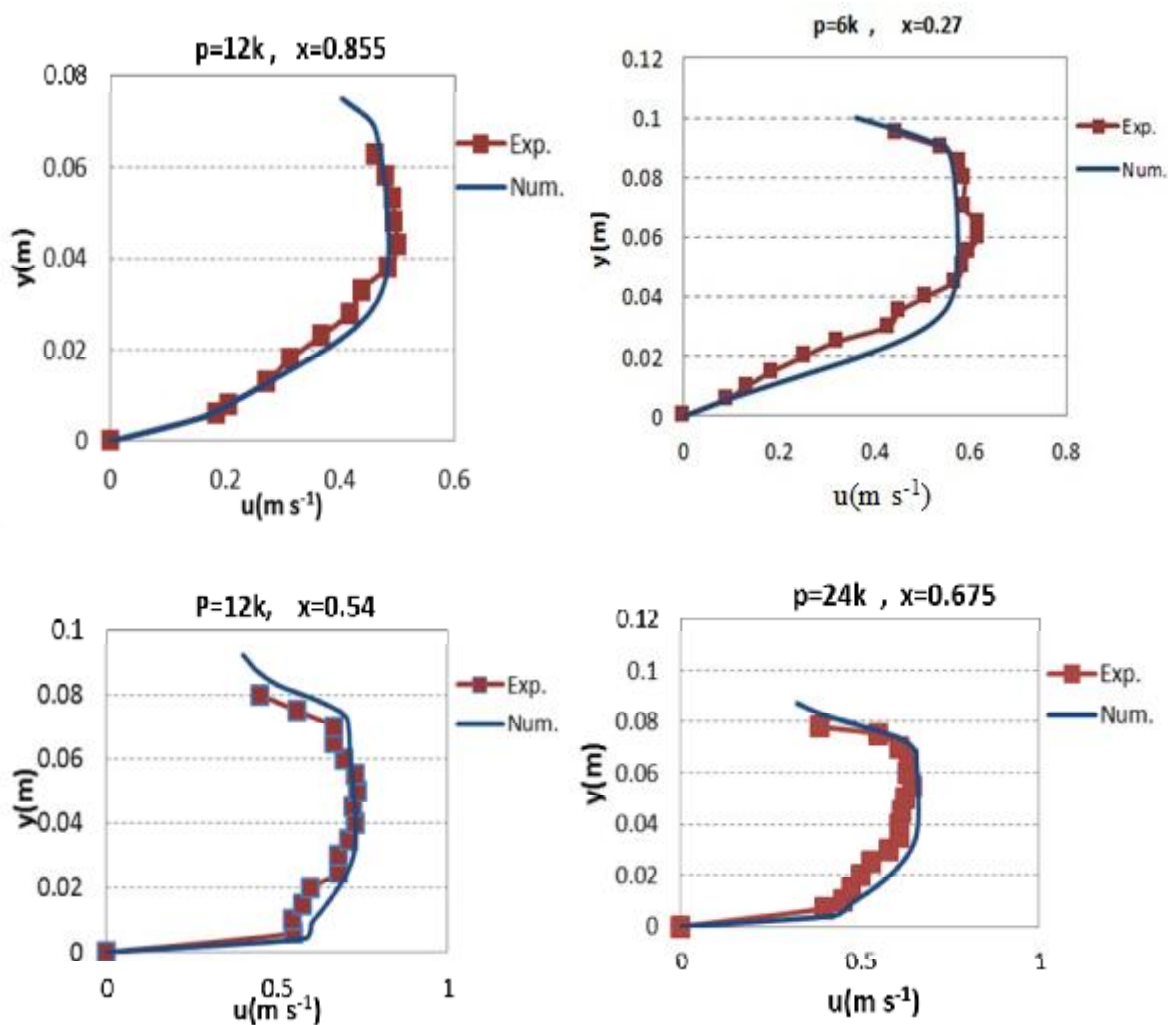
شکل 5 توزیع تنش برشی را در خط مرکزی کانال برای حالت B1 نشان می‌دهد. داده‌های مشاهداتی تنش برشی مشو (2006) وجود ندارد تا مقایسه دقیق انجام شود به‌طور کلی تنش برشی در طول کانال روی زبری‌ها افزایش می‌یابد زیرا در رابطه  $t = gRS$  شیب انرژی S به دلیل افت زیاد انرژی جریان افزایش داشته در نتیجه تنش برشی بستر افزایش می‌یابد. از طرف دیگر سرعت جریان روی بستر زبر (ارتفاع زبری در مقایسه با عمق جریان زیر بحرانی قابل توجه است) به طرف پایین دست افزایش می‌یابد بنابراین در رابطه تنش  $t = 0.5 C_f \rho U^2$  مقدار تنش برشی بستر افزایش دارد. در فاصله  $x=0$  چون زبری وجود ندارد تنش برشی کم است این نتایج در تحقیق عباسپور و فرسادی زاده (2015) و سایر محققان نیز دیده شده است.

شکل 4 توزیع سرعت برای حالت B1-4 را تا سطح آب نشان می‌دهد. در این حالت نیز بیشترین سرعت در انتهای کانال بوده و در طول کانال سرعت روند افزایشی داشته است. سرعت بیشینه نیز پایین‌تر از سطح آب قرار گرفته است.

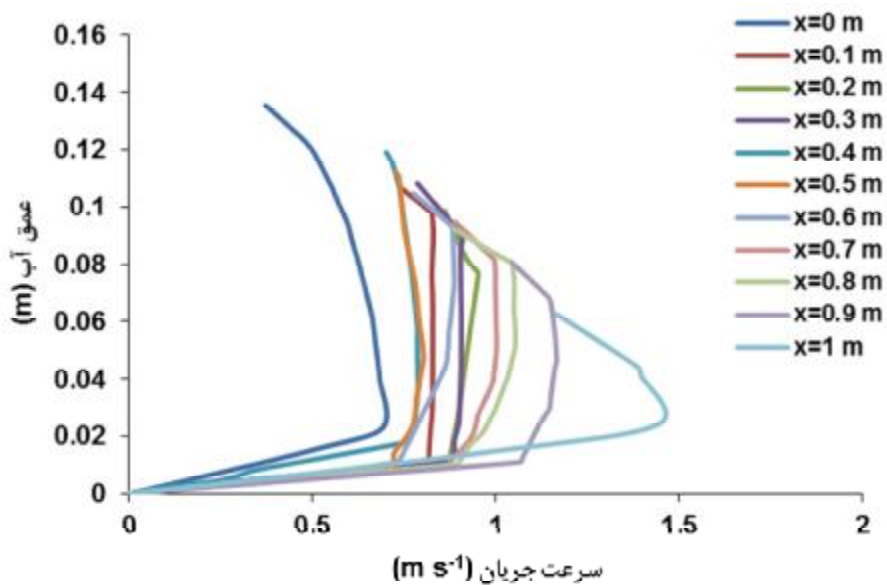
برای بررسی سرعت، مقدار سرعت متوسط در ابتدای کانال را از توزیع سرعت (عددی) به‌دست آورده و با مقدار سرعت متوسط آزمایشگاهی داده‌های مشو صحت‌سنجی شده است و مقادیر آن در جدول 1 ارائه شده است. با توجه به اینکه داده‌های پروفیل سرعت در تحقیق مشو (2006) وجود نداشته مقایسه‌ای صورت نگرفته ولی داده‌های مشاهداتی عباسپور و فرسادی زاده (2015) برای زبری نیم‌استوانه ای و مکعبی در شکل 3 با مدل فلونتت مقایسه شده و مدل صحت‌سنجی شده است که نتایج مشابه به این تحقیق به‌دست آمده است.

در شکل 4 سرعت در روی بستر صفر بوده و در بستر زبر بیشترین گرادیان سرعت مربوط به تلاطم جریان در نزدیک بستر اتفاق می‌افتد. ارتفاع زبری در مقایسه با عمق جریان (زیر بحرانی) قابل توجه است و

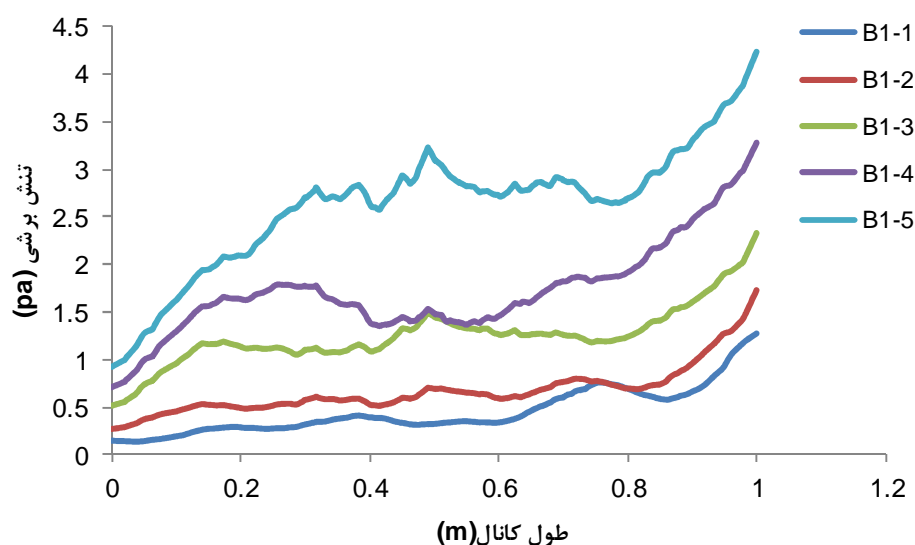




شکل 3- مقایسه مقادیر عددی پروفیل‌های سرعت با داده‌های آزمایشگاهی عباسپور و فرسادی زاده (2015).



شکل 4- توزیع سرعت طولی برای حالت B1-4.



شکل 5- توزیع تنش برشی برای حالت B1.

از دو معادله مختلف 3 و 4 را نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن مقادیر سرعت جریان محاسبه می‌شوند.

جدول 2 مقادیر محاسباتی افت انرژی، ضریب دارسی-ویسباخ و ضریب اصطکاک سطحی با استفاده

جدول 2- مقادیر محاسباتی سرعت جریان برای داده‌های مشو (2006).

سری مدل	شماره مدل	شیب سطح آب	f دارسی ویسباخ	افت انرژی hf	Cf <sub>1</sub> (محاسباتی)	Cf <sub>2</sub> (محاسباتی)	Cf <sub>1</sub> (فلوئنت)	Cf <sub>2</sub> (فلوئنت)	درصد خطای Cf1	درصد خطای Cf2
A	A1	0/034	5/36	0/034	0/0092	0/0156	0/0091	0/0153	1/66	1/75
	A2	0/036	2/12	0/036	0/0075	0/0126	0/0075	0/0126	0/25	0/26
	A3	0/047	1/15	0/047	0/0063	0/0104	0/0062	0/0102	1/71	1/78
	A4	0/053	0/99	0/053	0/0058	0/0096	0/0056	0/0093	3/95	4/11
	A5	0/081	1/41	0/081	0/0056	0/0092	0/0054	0/0088	3/51	3/65
B1	B1-1	0/014	0/79	0/014	0/0095	0/016	0/0095	0/0162	0/89	0/95
	B1-2	0/026	0/66	0/026	0/0073	0/0122	0/0071	0/0119	2/80	2/94
	B1-3	0/035	0/74	0/035	0/006	0/0099	0/0062	0/0103	2/69	2/81
	B1-4	0/050	0/86	0/050	0/0057	0/0094	0/0057	0/0095	0/96	1/00
	B1-5	0/066	1/04	0/066	0/0054	0/0089	0/0054	0/009	0/17	0/18
B2	B2-1	0/028	1/83	0/035	0/0078	0/013	0/0076	0/0128	2/66	2/79
	B2-2	0/045	1/58	0/056	0/0068	0/0113	0/0065	0/0107	4/79	5/01
	B2-3	0/065	1/63	0/081	0/0059	0/0099	0/0058	0/0095	3/76	3/92
	B2-4	0/082	1/47	0/102	0/0056	0/0092	0/0054	0/0088	4/15	4/32
	B2-5	0/087	1/65	0/109	0/0055	0/009	0/0053	0/0087	3/49	3/63

افزایش تعداد زبری روند افزایشی داشته است و با سرعت جریان رابطه مستقیم دارد.

جدول 3 مقادیر تغییرات سرعت  $DU^+$  (رابطه 5) را برای مدل‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای حالت B2 بیشترین مقدار  $DU^+$  به دست آمده است زیرا در این حالت تعداد زبری بیشتر بوده و تأثیر زبری روی کاهش سرعت زیاد است. مقادیر  $DU^+$  برای حالت B1 کمتر بوده که ناشی از ارتفاع زبری کمتر بوده است.

در مدل‌های شبیه‌سازی شده برای هر یک از حالت‌های مدل با توجه به اینکه سرعت جریان افزایش یافته افت انرژی نیز افزایش داشته است. ضریب دارسی - ویسباخ نیز مقادیر مختلفی دارد که در تحقیق ملک‌نژاد یزدی و همکاران (1392) مقادیر ضرایب دارسی - ویسباخ در محیط متخلخل پاره‌سنگی بالای 10 است. مقادیر ضریب دارسی ویسباخ در حالت A بیشترین مقدار را دارند. همچنین خطای نسبی ضریب اصطکاک سطحی کمتر از 5 درصد بوده و مقدار آن با سرعت جریان نسبت معکوس دارد. شیب سطح آب با

جدول 3- محاسبه مقادیر  $DU^+$  برای هر مدل شبیه‌سازی.

مدل‌ها	شماره مدل‌ها	U/U*	Y/ks	log y/ks	$DU^+$
A	A1	1/22	1/01	0	5/02
	A2	1/94	1/31	0/12	
	A3	2/64	2/07	0/32	
	A4	2/85	3	0/48	
	A5	2/38	3/85	0/59	
B1	B1-1	3/19	0/87	-0/06	4/58
	B1-2	3/47	1/73	0/24	
	B1-3	3/29	2/89	0/46	
	B1-4	3/06	3/88	0/59	
	B1-5	2/78	5/14	0/71	
B2	B2-1	2/09	2/03	0/31	6/88
	B2-2	2/25	3/11	0/49	
	B2-3	2/22	4/83	0/68	
	B2-4	2/33	6/22	0/79	
	B2-5	2/2	7/05	0/85	

### نتیجه‌گیری کلی

سرعت از کمیت‌های اصلی جهت اندازه‌گیری جریان در تحقیقات هیدرولیکی است. برای تعیین توزیع سرعت در کانال‌های روباز کارهای نظری کمی صورت گرفته و بیشتر از روابط تجربی استفاده شده است. با توجه به تأثیر لزجت آب، وجود دیواره‌ها و زبری آن‌ها، وجود سطح آزاد آب و همچنین نامنظمی مقاطع، توزیع سرعت در کانال‌ها پیچیده و سه‌بعدی بوده و به‌دست

آوردن یک رابطه کلی که بیانگر توزیع سرعت در کانال‌هایی با خصوصیات متفاوت باشد به سادگی میسر نمی‌باشد. در روابط اساسی که برای تعیین توزیع سرعت بکار گرفته می‌شود، وابستگی زیادی بین سرعت و تنش برشی نه تنها در داخل جریان بلکه در مجاورت دیواره وجود دارد. بررسی‌ها نشان داد که در جریان روی بستر زبر سرعت جریان در طول کانال افزایش می‌یابد در نتیجه تنش برشی نیز در طول کانال نیز

چنانچه برای حالت B2 بیشترین مقدار  $DU^+$  به دست آمده که تعداد زبری بیشتری دارد. نسبت سرعت‌های ماکزیمم به سرعت‌های متوسط جریان بین  $2/73 - 1/1$  می‌باشد. سرعت‌های بیشینه در فاصله  $0/032$  تا  $0/967$  عمق جریان از کف بستر زبر تشکیل می‌شوند.

روند افزایشی داشته است. همچنین در جریان روی بستر زبر شیب سطح آب روند افزایشی داشته و افت انرژی افزایش می‌یابد. ضریب اصطکاک سطحی برای بسترهای مختلف تعیین گردید که مقادیر محاسباتی و مدل عددی تطابق خوبی را دارند. به‌ازای تعداد زبری بیشتر تأثیر آن روی پروفیل سرعت بیشتر بوده است

#### منابع مورد استفاده

- احدی م‌س، بنکداری ح و طاهر شمسی ا، 1389. برآورد پروفیل سرعت در کانال‌های روباز با جریان آشفته. پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، 14 تا 16 اردیبهشت، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
- اژدری مقدم م و تاج نسایی م، 1389. مدل‌سازی عددی سلول‌های جریان ثانویه در کانال‌های نوزنقه‌ای با زبری یکنواخت. مجله مدل‌سازی در مهندسی، سال 8، شماره 20، صفحه‌های 57 تا 71.
- حسینی س‌م و ابریشمی ج، 1389. هیدرولیک کانال‌های باز. دانشگاه امام رضا (ع). مشهد، چاپ بیست و سوم.
- عباسپور ا و فرسادی‌زاده د، 1392. بررسی جریان متلاطم در کانال‌های روباز با بستر زبر با استفاده از مدل‌های فیزیکی و شبیه‌سازی عددی. گزارش نهایی طرح تحقیقاتی، دانشگاه تبریز.
- فغفور مغربی م و رحیم‌پور م، 1386. روشی برای ترسیم خطوط هم سرعت و تخمین دبی در کانال‌های روباز. مجله دانشکده فنی، جلد 34، شماره 3، صفحه‌های 33 تا 43.
- ملک‌نژاد یزدی م، دهقانی ا و شهابی م، 1392. بررسی ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ درون محیط متخلخل پاره سنگی در جریان حاوی رسوب. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد 20، شماره 4، صفحه‌های 99 تا 122.
- نژند علی ع، اسماعیلی ک، فرهودی ج و زینب ر، 1390. تأثیر زبری‌های یکپارچه مثلثی بر مشخصات پرش هیدرولیکی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، جلد 5، شماره 2، صفحه‌های 234 تا 241.

- Abbaspour A and Farsadizadeh D, 2015. Velocity measurements of a free-Surface turbulent flow oversmooth and rough beds. Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, Online 38: 354-362.
- Afzalimehr H, Gallichand J, Sui J and Bagheri E, 2011. Field investigation on friction factor in mountainous cobble bed and boulder bed rivers. International Journal of Sediment Research 26(2): 210-221.
- Anonymous, 2006. Fluent 6.3 User's Guide. Fluent Incorporated, Lebanon, N.H.
- Balachandar R, Blakely D and Bugg J, 2002. Friction velocity and power law velocity profile in smooth and rough shallow open channel flows. Canadian Journal of Civil Engineering 29: 256-266.
- Bomminayuni SK, 2010. Large eddy simulation of turbulent flow over a rough bed using the immersed boundary method. In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science., The School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, US.
- Carney ShK, Bledsoe BP and Gessler D, 2006. Representing the bed roughness of coarse-grained streams in computational fluid dynamics. Earth Surface Processes and Landforms 31: 736-749.
- Chiu CL and Lin GF, 1983. Computation of 3-D flow and shear in open channels. Journal of Hydraulic Engineering ASCE 109(11):1424-1440.
- Chiu CL and Chiou JD, 1986. Structure of 3-D flow in rectangular open channels. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE 112(11):1050-1068.
- Mashau MS, 2006. Flow resistance in open channels with intermediate scale roughness. MSc Thesis, Faculty of Engineering and the Built Environment, University of Witwatersrand, England.
- Maghrebi MF and Rahimpour M, 2005. Streamwise velocity distribution in irregular shaped channels having composite bed roughness. Flow Measurement and Instrumentation 17: 237-245.
- Nicholas AP, 2001. Computational fluid dynamics modeling of boundary roughness in gravel bed rivers: An investigation of the effects of random variability in bed elevation. Earth Surface Processes and Landforms 26:

345-362.

- Pu JH, 2012. Universal velocity distribution for smooth and rough open channel flows. *Journal of Applied Fluid Mechanics* 6(3): 413-423.
- Stone MC and Hotchkiss R, 2007. Turbulence description in two cobble bed river reaches. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 133: 1367-1378.
- Xian Ye W, 2010. Experimental and numerical studies of open channel turbulent flow over rough bed., in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy, Submitted to Department of Building and Construction, City University of Hong Kong, China.
- Yau Lu J, Hao Hong J Yi, Wang Ch, Zheng Lee K and Chung Yang H, 2003. Measurement and simulation of turbulent flow in a steep open channel with smooth boundary. *Journal of the Chinese Institute of Engineers* 26(2): 201-210.