

تخمین سرعت متوسط عمقی و تنش برشی در کانال مثلثی باز

محمد گیوهچی^۲ محمود فغفور مغربی^۱

(دریافت ۸۸/۳/۳ پذیرش ۸۸/۵/۱۸)

چکیده

روش ارائه شده توسط شیونو و نایت (SKM) قادر به تخمین توزیع سرعت متوسط عمقی و تنش برشی در کانال‌های باز است. SKM نیاز به کالیبره شدن دارد. پارامترهایی که باید کالیبره گردند عبارت‌اند از فاکتور اصطکاک f ، لزجت چرخشی عرضی λ و جریان ثانویه Γ . از بین این پارامترها، $\lambda = 0.07$ به عنوان مقدار استاندارد لزجت چرخشی در مسائل کاربردی در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، دقت تخمین توزیع سرعت متوسط عمقی و تنش برشی با SKM به نحوه تعیین f و Γ مرتبط خواهد بود. در این مقاله، الگوهای سلول‌های جریان ثانویه (Γ) و توزیع فاکتور اصطکاک (f) در یک کانال مستقیم منشوری مثلثی با زبری یکنواخت ارائه شد. در تعیین بهترین ساختار توزیع فاکتور اصطکاک از روش سعی و خطا استفاده گردید تا با استفاده از SKM بهترین نتایج حاصل گردد. نتایج به دست آمده از مقایسه توزیع سرعت متوسط عمقی و تنش برشی تخمین زده شده توسط SKM و اطلاعات آزمایشگاهی نشان می‌داد که اگر دو پارامتر f و Γ بر اساس الگوهای صحیحی انتخاب شوند، SKM می‌تواند توزیع سرعت و تنش برشی را به درستی تخمین بزند.

واژه‌های کلیدی: سرعت متوسط عمقی، فاکتور اصطکاک، سلول‌های جریان ثانویه، کانال مثلثی، تنش برشی

Estimation of Depth-Averaged Velocity and Boundary Shear Stress in a Triangular Open Channel

Mahmoud Faghfour Maghrebi¹

Mohammad Givhechi²

(Received May. 24, 2009 Accepted Aug. 9, 2009)

Abstract

The proposed method by Shiono and Knight (SKM) is able to predict the lateral depth-averaged velocity and shear stress distribution in open channels. The SKM is needed to be calibrated. The calibration parameters are friction factor f , lateral eddy viscosity λ , and secondary flow Γ . In practical problems, the assumption of $\lambda = 0.07$ from among these is considered as a standard value for the eddy viscosity. Thus, the accuracy of the depth-averaged and the shear stress distributions using SKM will be subject to the determination of f and Γ . In the present paper, we present the secondary flow cell pattern (Γ) and friction factor distribution (f) in a straight prismatic triangular channel with a uniform roughness. The trial and error approach is used to define the best pattern of friction factor to produce the most appropriate results. The results of predicted depth-averaged velocity as well as shear stress distributions obtained from SKM as compared to measured values indicate that SKM can accurately predict the velocity and shear stress distributions if the two coefficients of f and Γ are chosen based on accurate patterns.

Keywords: Depth-averaged Velocity, Friction Factor, Secondary Flow Cell, Triangular Channel, Shear stress

1. Assoc. Prof., Dept. of Civil Eng., Ferdowsi University, Mashhad
2. Assist. Prof., Dept. of Civil Eng., Sistan and Baluchestan University (Corresponding Author) (+98 541) 8052890
M.givhechi@Eng.usb.ac.ir

۱- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد
۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان (نویسنده مسئول) ۸۰۵۲۸۹۰ (+۹۸ ۵۴۱) (۰۵۴۱)
M.givhechi@Eng.usb.ac.ir

مناسب توانسته است پروفیل سرعت متوسط عمقی و تنش برشی را تخمین بزند.

کانال‌های مثلثی دارای کاربردهای متنوع در شبکه‌های زهکشی هستند. بررسی منابع علمی نشان داد که اطلاعات کافی و مناسب در خصوص ساختار سلول‌های جریان ثانویه و همچنین توزیع فاکتور اصطکاک در این مقاطع وجود ندارد. هدف از این تحقیق، مدل نمودن پروفیل سرعت متوسط عمقی و تنش برشی با SKM در کانال‌های باز منشوری مثلثی با زبری یکنواخت، با تعیین ساختار الگوی سلول‌های جریان ثانویه و تغییرات فاکتور اصطکاک بر روی جداره کانال بود.

۲- سرعت متوسط عمقی

شیونو و نایت با انتگرال گیری از معادله ناویر- استوکس^۷ (جریان یکنواخت در کانال منشوری) بر روی عمق آب H، معادله دو بعدی سرعت متوسط عمقی را به فرم زیر ارائه نمودند [۶]:

(۲)

$$\rho g H S_0 - \frac{1}{8} \rho f U_d^2 \left(1 + \frac{1}{s}\right)^2 + \frac{\partial}{\partial z} \left[\rho \lambda H^2 \left(\frac{f}{8}\right)^{1/2} U_d \frac{\partial U_d}{\partial z} \right] = \frac{\partial}{\partial z} [H(\rho U W)_d]$$

که در آن

ρ جرم مخصوص آب، S_0 شیب کف کانال، U_d سرعت متوسط عمقی، s شیب جداره کانال (افقی: s قائم)، U و W به ترتیب مؤلفه‌های سرعت در راستای جریان x و در راستای عرضی z هستند (شکل ۱). شیونو و نایت براساس اطلاعات آزمایشگاهی نتیجه گرفتند که میزان تغییر عرضی نیروی جریان ثانویه در واحد طول (رابطه ۲) را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت [۶]:

$$\frac{\partial}{\partial z} [H(\rho U W)_d] = \Gamma \quad (3)$$

که در آن

Γ پارامتر جریان ثانویه بوده و دربرگیرنده جریان‌های ثانویه طولی و گردابه‌های موجود در سطح مقطع جریان است [۱۲]. با ترکیب روابط ۲ و ۳ نتیجه می‌گردد:

(۴)

$$\rho g H S_0 - \frac{1}{8} \rho f U_d^2 \left(1 + \frac{1}{s}\right)^2 + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \rho \lambda H^2 \left(\frac{f}{8}\right)^{1/2} U_d \frac{\partial U_d}{\partial z} \right\} = \Gamma$$

توزیع تنش برشی بستر و پروفیل سرعت متوسط عمقی را می‌توان از مشخصه‌های مهم هیدرولیکی در کانال‌های باز برش‌مرد. تنش برشی از پارامترهایی است که در مطالعات هیدرولیکی از جمله آشفتگی، فرسایش و حمل رسوب، نقش عمده‌ای داشته و غالباً مدل سازی آن دشوارتر از سرعت است. سرعت متوسط عمقی نیز به‌عنوان اطلاعات اولیه و پایه در مباحثی همچون تخمین ضریب پراکندگی آلودگی، قلمداد می‌گردد [۱]. معادلات تحلیلی و روشهای عددی در راستای تخمین توزیع تنش برشی ارائه گردیده است و این موضوع به‌صورت آزمایشگاهی در کانال‌های باز و بسته مورد توجه بسیاری از محققان از جمله لای^۱ و نایت^۲، رودس^۳ و یانگ^۴ و لیم^۵ قرار گرفته است [۲-۵]. روش شیونو^۶ و نایت (SKM) که بر پایه متوسط عمقی معادله ممنت بنا شده است، دارای توانایی مناسب در مدل‌سازی ساختارهای پیچیده جریان‌های ثانویه در کانال‌های باز است [۶ و ۷]. SKM مدلی تحلیلی برای تخمین توزیع سرعت متوسط عمقی و تنش برشی بستر است. فاکتور اصطکاک بستر f ، لزجت گردابی عرضی λ و جریان ثانویه Γ سه پارامتر هیدرولیکی هستند که باید در SKM کالیبره گردند. مدل‌سازی نامناسب سلول‌های جریان ثانویه و فاکتور اصطکاک از دلایل مهم در تخمین غیر واقعی تنش برشی با استفاده از این روش است. ساختار و شدت سلول‌های جریان ثانویه متأثر از شکل سطح مقطع کانال و ارتفاع زبری بستر است. غالباً در صورت عدم وجود اطلاعات میدانی فاکتور اصطکاک، محققان با تعیین ضریب زبری مانیگ (n) و استفاده از رابطه زیر به تخمین فاکتور اصطکاک می‌پردازند

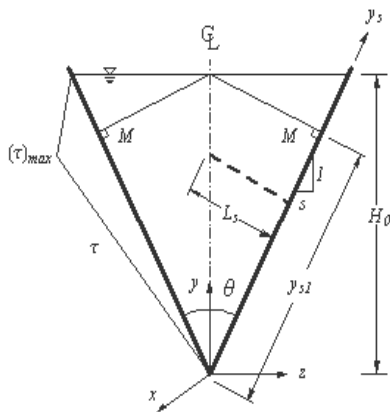
$$f = 8n^2 g R_h^{-1/3} \quad (1)$$

که در آن

g شتاب ثقل و R_h شعاع هیدرولیکی می‌باشد. فاکتور اصطکاک ثابت را می‌توان در آنالیزهای تقریبی استفاده نمود، اما به دلیل حساس بودن تخمین توزیع تنش برشی با استفاده از SKM به فاکتور اصطکاک، لازم است در این روش الگوی صحیحی از تغییرات آن در نظر گرفته شود. روش شیونو و نایت در کانال‌های باز با سطح مقطع مستطیلی، دوزنقه‌ای و مرکب استفاده شده است [۸-۱۱]. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که این روش با دقت

¹ Lai
² Knight
³ Rhodes
⁴ Yang
⁵ Lim
⁶ Shiono

⁷ Navier- Stokes



شکل ۱- توزیع تنش برشی به روش YLM

زبری در پیرامون مقطع، خط جداکننده بر نیمساز زاویه داخلی مقطع مثلی شکل منطبق خواهد بود (شکل ۱). براساس روش YLM مقدار تنش برشی موضعی در هر نقطه از جداره برابر است با

$$\tau = \rho g S_0 L_s \quad (7)$$

که در آن

L_s طول خط عمود بر جداره کانال تا خط تقسیم کننده کانال است. در این روش بیشترین تنش برشی بر روی جداره در نقطه M رخ می دهد. فاصله این نقطه، در امتداد دیواره از محل برخورد دو دیواره مقطع مثلی از رابطه زیر محاسبه می شود

$$y_{sl} = H_0 \cos(\theta/2) \quad (8)$$

که در این رابطه

H_0 ارتفاع آب در راس مثلث و θ زاویه داخلی مثلث است. موقعیت نقطه M بستگی به زاویه داخلی مقطع مثلی θ دارد. با افزایش θ ماکزیمم تنش برشی به سمت زاویه داخلی مثلث میل می کند و با کاهش آن به سمت سطح آزاد سیال حرکت خواهد کرد. هرگاه $\theta = 180^\circ$ باشد، رابطه ۷ به فرم $\rho g H_0 S_0$ خلاصه می گردد که معرف تنش برشی بر روی سطحی افقی در حالت دو بعدی جریان است.

در شکل ۲ نتایج آزمایشگاهی تنش برشی ارائه شده توسط لین^۳ در مقاطع مثلی شکل با شیب جداره مختلف و تنش برشی تخمینی با روش YLM، نشان داده شده است [۲۲]. در این شکل، توزیع تنش برشی به دلیل مقارن بودن مقطع از نظر هندسی و زبری در نیمی از مقطع نشان داده شده است. در چهار سری نتایج نشان داده شده، عمق جریان در میانه مقطع و شیب طولی کانال به ترتیب ۰/۳۳۴ و ۰/۰۰۱ متر است. مقادیر بی بعد تنش برشی τ^* ، از تقسیم تنش برشی موضعی بر تنش برشی متوسط $\tau = \rho g R_h S_0$

سرعت متوسط عمقی U_h و تنش برشی τ ، با رابطه زیر به یکدیگر مرتبط هستند

$$U_h^2 = \frac{8\tau}{\rho f} \quad (5)$$

با ترکیب روابط ۴ و ۵، رابطه زیر برای تخمین توزیع تنش برشی حاصل می گردد

$$\rho g H S_0 - \tau \left(1 + \frac{1}{s^2} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\lambda H^2}{2} \left(\frac{f}{8} \right)^{-\frac{1}{2}} \frac{\partial \tau}{\partial z} \right] = \Gamma \quad (6)$$

با حل عددی و یا تحلیلی روابط ۴ و ۶ می توان پروفیل U_h و τ را محاسبه نمود [۹ و ۱۳]. نایت و ابریل^۱ با انجام آنالیز حساسیت بر روی تخمین سرعت و تنش برشی متوسط در مقطع که نتیجه شده از پروفیل سرعت متوسط عمقی و تنش برشی به روش SKM بود، دریافتند که تغییر پارامتر λ تأثیر کمی بر نتایج دارد [۱۴]. آنان $\lambda = 0.07$ را به عنوان مقدار ثابت و استاندارد برای پارامتر بی بعد لزجت گردابی ارائه نمودند. در نتیجه دو پارامتر f و Γ ، نقش مهم و اساسی در تخمین تنش برشی و سرعت متوسط عمقی را برعهده دارند.

۳- تنش برشی

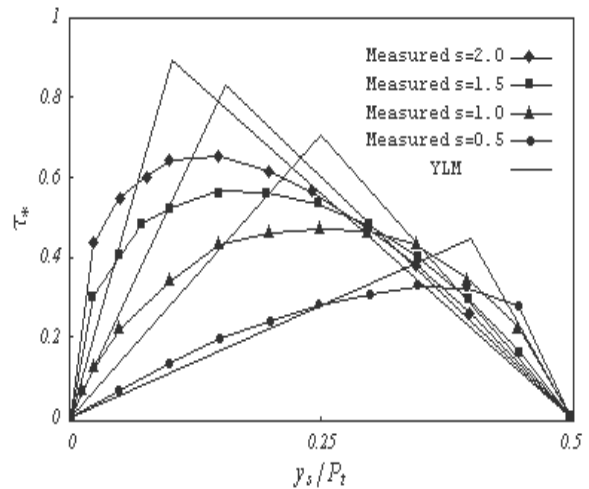
شکل سطح مقطع، توزیع فاکتور اصطکاک در پیرامون مرطوب و جریان های ثانویه از مهم ترین پارامترهای مؤثر در تنش برشی هستند [۱۰، ۱۵، ۱۶]. یانگ و لیم روش ساده YLM را برای تخمین توزیع تنش برشی ارائه نمودند [۵-۱۹]. این روش قادر است که توزیع تنش برشی را در کانال های منشوری با زبری غیر یکنواخت و یکنواخت تخمین بزند. ایشان در روش خود فرض نمودند که جریان دائمی و توسعه یافته است. در این روش اثر جریان های ثانویه در تخمین توزیع تنش برشی را نمی توان در نظر گرفت. YLM که بر اساس ایده انیشتین^۲ بنا شده، قادر به تخمین تنش برشی در مقاطع منشوری با دقتی بیشتر از سایر روشها است [۲۰]. بر اساس این ایده، مقطع مثلی شکل را می توان به دو ناحیه تقسیم نمود (شکل ۱). یانگ و لیم پیشنهاد نمودند که برای کرانه ای زبر، خط جداکننده مقطع به ارتفاع معادل زبری جداره ها (k_s)، بستگی دارد و در کرانه ای صاف، این خط متناسب با طول لزجت یعنی v/u_* است، که در آن v معرف لزجت سینماتیک سیال و u_* سرعت برشی است. با فرض یکنواخت در نظر گرفتن توزیع

³ Lane

¹ Abril

² Einstein

زیر نویس های m و p به ترتیب معرف مقادیر اندازه گیری و تخمین زده شده هستند. هر چه مقدار RMSE کوچک تر باشد، انطباق مقادیر تخمینی بر آزمایشگاهی بهتر خواهد بود. با توجه به مقادیر RMSE درج شده در جدول ۱ برای حالات مختلف شیب کرانه، قابلیت روش YLM در تخمین توزیع تنش برشی در مقطع مثلثی مناسب به نظر می رسد. این روش همچنین به خوبی توانسته است محل وقوع حداکثر تنش برشی را تخمین بزند. به ازای شیب جداره کانال برابر با ۱ و ۱/۵ دقیقاً محل حداکثر تنش برش آزمایشگاهی و تخمینی یکسان است و به ازای s برابر با ۰/۵ و ۲ این اختلاف ناچیز است. بنابراین محل برخورد خط عمود بر جداره که از محل برخورد خط جداکننده فضاها با سطح آزاد آب می گذرد را می توان به عنوان نقطه تنش برشی بیشینه در جداره انتخاب نمود (نقطه M در شکل ۱).



شکل ۲- مقایسه تنش برشی بی بعد اندازه گیری شده توسط لین با مقادیر تخمین زده شده توسط روش YLM [۱۳]

۴- مدل آزمایشگاهی و شرح مشکل

به منظور بررسی الگوی سلول های جریان ثانویه و همچنین نحوه تغییر فاکتور اصطکاک در کانال های مثلثی متقارن با زبری یکنواخت، شش آزمایش در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه فردوسی مشهد انجام گردید. طول کانال مثلثی ۸ متر بود. در شکل ۳، نمایی شماتیک از نصف سطح مقطع عرضی کانال مثلثی و نقاط اندازه گیری سرعت نشان داده شده است. عرض سطح آزاد سیال T در نظر گرفته شده و شیب کف کانال ۰/۰۰۶ بود. در ابتدای فلوام آزمایشگاهی که محل ورود آب به کانال بود، ناحیه آرامش دهنده جریان به طول ۱/۲ متر وجود داشت. در انتهای کانال نیز سرریزی تعبیه شد که با تنظیم آن، جریان دائمی و ارتفاع آب مورد نیاز در کانال تأمین گردید. با چسباندن شن با ابعاد متوسط (d_{50}) برابر با ۳/۵ و ۱۱ میلی متر به صفحات شیشه ای، امکان زبر نمودن جداره کانال با دو زبری متفاوت فراهم گردید. ارتفاع زبری برابر با قطر متوسط دانه های شن در نظر گرفته شد [۲۱]. به منظور ایجاد مقطعی مثلثی و زبر، صفحات شیشه ای پشت سرهم در طول کانال نصب گردید. ضریب زبری مانینگ کانال در حالتی که از شیشه ساخته شده باشد ۰/۰۰۸ و در حالتی که از صفحات زبر شده باشد دانه های شن با اندازه متوسط ۳/۵ و ۱۱ میلی متر ساخته شده باشد به ترتیب ۰/۰۱۷۸ و ۰/۰۲۲۳ است. شیب جانبی جداره کانال (s) ۰/۵ و ارتفاع آب در راس مثلث (H_0)، ۱۵ و ۲۵ سانتی متر در نظر گرفته شد. در کانال جریان یکنواخت و دائمی برقرار بود و در محل اندازه گیری سرعت که به فاصله ۴/۸ متری از شروع کانال واقع شده بود، جریان کاملاً توسعه یافته بود.

به دلیل متقارن بودن هندسه و زبری کانال مثلثی، اندازه گیری نقطه ای سرعت فقط در نیمی از سطح مقطع جریان انجام گرفت. از

به دست آمده اند. محور افقی در شکل ۲ نشان دهنده نسبت y_s/P_t است که معرف فاصله در امتداد محیط مرطوب کانال نسبت به محل برخورد دو جداره کانال و P_t محیط مرطوب کل مقطع است. در شکل ۲ دیده می شود که روش YLM به خوبی توانسته است توزیع تنش برشی را مخصوصاً در نزدیکی محل برخورد سطح آب با جداره کانال و همچنین در رأس کانال تخمین بزند اما در برآورد مقدار حداکثر تنش برشی از دقت خوبی برخوردار نبوده و حداکثر تنش برشی را خیلی بیشتر از مقادیر آزمایشگاهی تخمین زده است.

در جدول ۱ تعداد نقاط اطلاعاتی N ، جذر متوسط توان دوم خطاها (RMSE) بین اطلاعات آزمایشگاهی و تخمینی توسط روش YLM و محل تخمین حداکثر تنش برشی آزمایشگاهی و تخمینی نشان داده شده است. RMSE برای تنش برشی به روش زیر محاسبه می گردد:

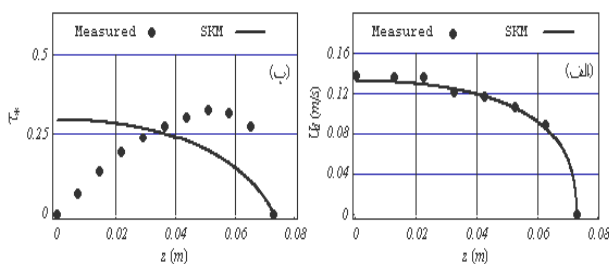
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{(\tau^*)_m - (\tau^*)_p}{(\tau^*)_m} \right)^2} \times 100 \quad (9)$$

جدول ۱- دقت روش YLM در تخمین توزیع تنش برشی و تعیین محل حداکثر تنش برشی

$(y_s/P_t)_{\max-p}$	$(y_s/P_t)_{\max-m}$	RMSE%	N	S
۰/۴	۰/۳۵	۱۷/۰	۲۱	۰/۵
۰/۲۵	۰/۲۵	۳۰/۱	۲۵	۱
۰/۱۵	۰/۱۵	۲۷/۰	۲۵	۱/۵
۰/۱	۰/۱۵	۲۲/۴	۲۳	۲

به وسیله مدل، با در نظر گرفتن $\Gamma = 0$ حاصل گردید (شکل ۴-الف). دبی و سرعت متوسط مقطع تخمین زده شده با SKM به ترتیب برابر با $1/2$ لیتر بر ثانیه و $0/113$ متر بر ثانیه بود. این مقادیر از دبی و سرعت واقعی $3/4$ درصد کمتر بود (جدول ۱-آزمایش ۵). در این آزمایش ارتفاع زبری جداره زیاد بود و از این رو انتظار می رفت که شدت جریان های ثانویه نیز زیاد باشد. به این دلیل انتخاب $\Gamma = 0$ مقداری قابل قبول برای این پارامتر نبود. با افزایش مقدار Γ ، سرعت متوسط مقطع و دبی تخمین زده شده با استفاده از SKM کاهش یافت و اختلاف میان اطلاعات آزمایشگاهی و تخمینی افزایش پیدا کرد.

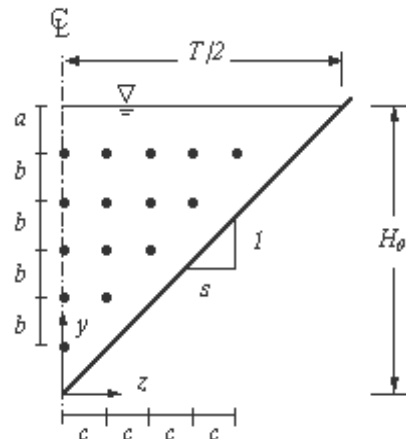
توزیع تنش برشی بی بعد تخمین زده شده توسط SKM با مقادیر آزمایشگاهی در شکل ۴-ب نشان داده شده است [۲۲]. در این شکل τ_* برابر با $\tau/(\rho g S_0 H_0)$ است. تنش برشی آزمایشگاهی در گوشه کانال برابر با صفر است با این وجود SKM حداکثر تنش برشی را در این نقطه یعنی محل برخورد دو کناره مقطع مثلثی تخمین زده است. بنابراین در نظر گرفتن فاکتور اصطکاک ثابت سبب می گردد که SKM نتواند به درستی تنش برشی را مخصوصاً در محل محور تقارن مقطع تخمین بزند. از این رو نتیجه می گردد که به دلیل اینکه الگوی صحیحی از سلول های جریان های ثانویه و تغییرات فاکتور اصطکاک جداره در نظر گرفته نشده است لذا تخمین تنش برشی و شدت جریان های ثانویه (Γ)، تخمینی نادرست است. لذا تحقیق بر روی این دو موضوع در محاسبه مشخصه های هیدرولیکی مرتبط با مقاطع مثلثی در کانال های باز از اهمیت زیادی برخوردار است.



شکل ۴- مقایسه نتایج روش SKM با مقادیر آزمایشگاهی (الف) سرعت متوسط عمقی و (ب) تنش برشی $\Gamma=0$ و $\lambda=0.07$ ، $f=0.122$

۵- الگوی سلول های جریان ثانویه در مقطع مثلثی

محققان زیادی از جمله نایت و پاتل^۲ در خصوص وضعیت سلول های جریان ثانویه در مجاری باز با سطح مقطع دوزنقه ای و



شکل ۳- نیمی از سطح مقطع عرضی مثلثی، $b=1-2\text{cm}$ ، $a=1.0\text{cm}$ و $c=1-2\text{cm}$

سرعت سنج مدل ۴۰۳ با سرعت کم^۱ با دقت ۱ درصد در برداشت سرعت در محدوده ۱۵ تا ۱۵۰ سانتی متر بر ثانیه استفاده شد. سرعت در نزدیکی سطح آب نیز توسط لوله پیتو به قطر ۲ میلی متر، برداشت گردید. در جدول ۲، مشخصات هندسی و هیدرولیکی جریان در آزمایش های انجام شده، ذکر گردیده است. در این جدول Q معرف دبی است.

جدول ۲- مشخصات هندسی و هیدرولیکی مقاطع مثلثی

شماره آزمایش	s	H_0 (cm)	N	U (m/s)	Q (lit/s)
۱	۰/۵	۱۴/۸	۰/۰۰۸۰	۰/۳۲۵	۳/۵۶
۲	۰/۵	۲۵/۰	۰/۰۰۸۰	۰/۴۶۶	۱۴/۵۶
۳	۰/۵	۱۵/۰	۰/۰۱۷۸	۰/۱۵۷	۱/۷۷
۴	۰/۵	۲۴/۷	۰/۰۱۷۸	۰/۲۳۱	۷/۰۵
۵	۰/۵	۱۴/۶	۰/۰۲۲۳	۰/۱۱۷	۱/۲۵
۶	۰/۵	۲۵/۲	۰/۰۲۲۳	۰/۱۷۴	۵/۵۲

از نتایج آزمایشگاهی آزمایش شماره ۵، برای تشریح مشکل در تخمین توزیع سرعت متوسط عمقی و تنش برشی استفاده گردید. اطلاعات آزمایشگاهی سرعت متوسط عمقی در شکل ۴-الف نشان داده شده است. در روش SKM، به صورت متداول λ برابر با $0/07$ در نظر گرفته می شود. فاکتور اصطکاک ثابتی برابر $0/122$ نیز در این آزمایش برای دیواره ها در نظر گرفته شد. این ضریب با در نظر گرفتن $\eta = 0/0223$ ، مشخصات ابعادی مقطع، ارتفاع آب و استفاده از رابطه ۱ به دست آمد. بنابراین Γ تنها پارامتر باقیمانده برای تخمین سرعت متوسط عمقی بود که لازم بود کالیبره شود. بهترین انطباق میان اطلاعات آزمایشگاهی و تخمین زده شده

² Patel

¹ Low Speed Probe 403

مستطیلی تحقیق نموده‌اند [۱۰ و ۲۳]. تامیناگا و همکاران^۱ دریافتند که جریان‌های ثانویه به دلیل غیر همسانگردی آشفتگی، ایجاد می‌گردند [۲۴]. زبری بستر و دیواره‌ها، وجود سطح آزاد آب، هندسه مجرا و ارتفاع آب بر آشفتگی سیال و همچنین جریان‌های ثانویه تاثیر گذارند. آلی و همکاران^۲ با ارائه الگوی سلول‌های جریان ثانویه در مجاری بسته مثلی شکل تأیید نمودند که وجود سطح آزاد سیال مهم‌ترین عامل بر تغییر توزیع سرعت و الگوی جریان‌های ثانویه در مقطع است و از این رو الگوی جریان ثانویه در مجاری مثلی بسته را نمی‌توان برای مجاری مثلی باز در نظر گرفت [۲۵].

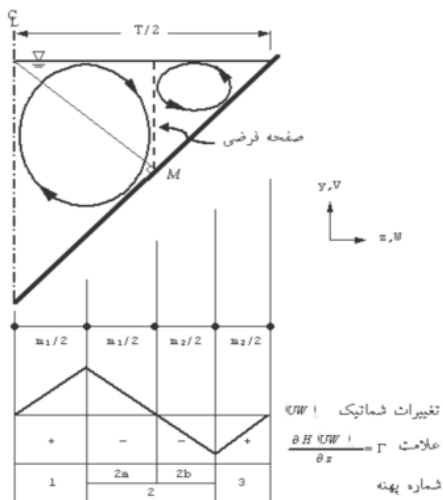
خداشناس و پاکویر^۳ نیز در تحقیقات خود این موضوع را تأیید کردند که محل وقوع حداکثر تنش برشی منطبق بر جداره کانال مثلی در نقطه M است (شکل ۱). این نقطه حاصل از برخورد خطی عمود بر جداره کانال بوده که از محل برخورد خط تقسیم سطح مقطع جریان با سطح آزاد آب نیز می‌گذرد [۲۶]. تامیناگا و همکاران که توزیع تنش برشی و جریان‌های ثانویه در مقاطع دوزنقه‌ای و مستطیلی را در حالات مختلف مورد بررسی قرار داده بودند، نتیجه گرفتند که هرگاه جهت جریان‌های ثانویه به سمت جداره کانال باشد، تنش برشی بر روی جداره افزایش می‌یابد و هرگاه جریان‌های ثانویه به گونه‌ای حرکت کنند که از دیواره کانال دور شوند، این پارامتر روند کاهشی در طول دیواره خواهد داشت [۲۴]. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که سلول‌های اصلی جریان ثانویه در نیمی از سطح مقطعی مثلی، دو عدد بوده و الگویی مطابق شکل ۵ را به خود اختصاص می‌دهند. جهت حرکت این دو سلول به سمت دیواره و نقطه M خواهد بود که تنش برشی در آن نقطه حداکثر است. این دو سلول در امتداد صفحه‌ای فرضی هستند که از نقطه M می‌گذرد (شکل ۵). سلول اول که محدود به خط میانی مقطع و صفحه فرضی گذرنده از نقطه M است، سلول اصلی و دارای تأثیر بیشتر در مشخصه‌های هیدرولیکی جریان است. سلول دوم که سلول کناری نامیده می‌شود، محدود به صفحه فرضی و جداره کانال بوده و از شدت تأثیر کمتری نسبت به سلول اصلی برخوردار است.

علامت تغییرات $(UW)_d$ مشابه با علامت پارامتر جریان ثانویه است (رابطه ۳). سرعت U در راستای طولی جریان و به سمت پایین دست دارای علامت مثبت است. هرگاه W مثبت باشد آنگاه $(UW)_d > 0$ است یعنی جهت چرخش سلول در جهت حرکت عقربه‌های ساعت خواهد بود و هرگاه W منفی باشد آنگاه

$(UW)_d < 0$ یعنی جهت چرخش سلول در خلاف جهت حرکت عقربه‌های ساعت خواهد بود. در شکل ۵ موقعیت سلول‌های جریان‌های ثانویه نشان داده شده است. پهنای هر یک از سلول‌ها m_1 و m_2 ، تابعی از s و H_0 است و $m_1 + m_2 = T/2$ است. چنانچه فاصله وسط سلول اصلی از رأس مثلث برابر با $m_1/2$ و فاصله میانه سلول کناری تا جداره کانال $m_2/2$ باشد، براساس الگوی در نظر گرفته شده برای سلول‌ها، در نیمی از مقطع مثلی سه پهنه برای تعریف پارامتر جریان ثانویه مورد نیاز است. با توجه به شکل ۵ دیده می‌شود که خط میانی کانال بر کناره سلول اصلی جریان ثانویه منطبق است در نتیجه در این موقعیت $W = 0$ بوده و در نتیجه $W = 0$ است. سلول اصلی جریان ثانویه، چرخشی در جهت حرکت عقربه‌های ساعت دارد از این رو در مرکز این سلول، $(UW)_d$ دارای بیشترین مقدار مثبت است. سلول کناری دارای چرخشی خلاف جهت عقربه‌های ساعت است و بنابراین $(UW)_d$ دارای بیشترین مقدار منفی در مرکز این سلول است. علامت و نحوه تغییرات $(UW)_d$ در هر پهنه در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به یکسان بودن الگوی توزیع تنش برشی در مقاطع مثلی و همچنین اصول ذکر شده در ارائه الگوی جریان‌های ثانویه در این نوع مقطع، نتیجه می‌گردد که این الگو با تغییر ابعاد هندسی مقطع و زبری جداره‌ها تغییر نمی‌یابد، اما شدت ضریب آشفتگی متأثر از ارتفاع زبری جداره است.

۶- توزیع فاکتور اصطکاک

شکل ۶- الف مقدار و نحوه تغییرات فاکتور اصطکاک f را در دیواره مقطع مثلی آزمایش شماره ۵ نشان می‌دهد. این اطلاعات با استفاده از رابطه $f = 8\tau / (\rho U_d^2)$ و مقادیر اندازه‌گیری شده U_d و τ



شکل ۵- الگوی سلول‌های جریان ثانویه در مقطع مثلی، تعداد پهنه‌ها و علامت پارامتر جریان ثانویه

¹ Tominaga et al.
² Aly et al.
³ Paquier

$\lambda = 0.07$ در نظر گرفته شد. از این رو به دست آوردن بهترین انطباق بین مقادیر آزمایشگاهی سرعت متوسط عمقی و تخمین زده شده توسط روش SKM، تنها با کالیبراسیون پارامتر جریان ثانویه Γ امکان پذیر بود. مقادیر جریان ثانویه ای که این انطباق را فراهم آورد با استفاده از روش سعی و خطا برای هر سه پهنه محاسبه شد. این مقادیر عبارتند از

$$\Gamma_1=0.368, \quad \Gamma_2=-0.303, \quad \Gamma_3=0.043 \quad (\text{N/m}^2) \quad (11)$$

شکل‌های ۶-ب و ۶-ج به ترتیب پروفیل سرعت متوسط عمقی و تنش برشی بر اساس الگوی CF3P را نشان می‌دهند. پروفیل سرعت متوسط عمقی پیوسته بوده و از انطباق خوبی بر اطلاعات آزمایشگاهی برخوردار است (شکل ۶-الف). با این وجود پروفیل تنش برشی پیوسته نیست و تطابق خوبی با اطلاعات آزمایشگاهی ندارد. در الگوی دوم که CF4P نام‌گذاری گردید، پهنه ۲ به دو قسمت تقسیم شد و تعداد پهنه‌ها از سه پهنه به چهار پهنه افزایش یافت (شکل ۶). فاکتور اصطکاک در این چهار پهنه به صورت زیر ثابت در نظر گرفته شد.

$$f_1=0.05502, \quad f_{2a}=0.17683, \quad f_{2b}=0.26527, \quad f_3=0.31098 \quad (12)$$

پارامتر جریان ثانویه برای الگوی CF4P، در چهار پهنه عبارتند از:

$$\Gamma_1=0.373, \quad \Gamma_{2a}=-0.307, \quad \Gamma_{2b}=-0.281, \quad \Gamma_3=0.017 \quad (\text{N/m}^2) \quad (13)$$

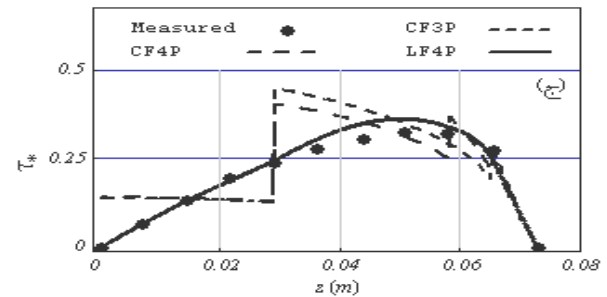
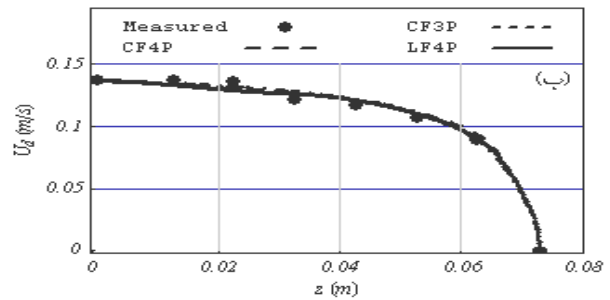
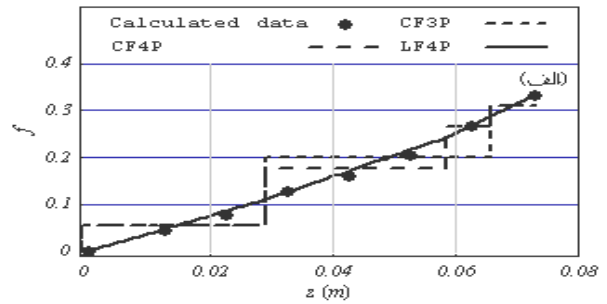
همان‌گونه که در شکل ۶-ج نشان داده شده است، پروفیل تنش برشی تخمین زده شده بر اساس الگوی CF4P در مقایسه با الگوی CF3P، به مقادیر آزمایشگاهی نزدیک‌تر بود اما همچنان عدم پیوستگی در پروفیل تنش برشی تخمینی دیده شد. این موضوع به دلیل تغییر ناگهانی در مقدار فاکتور اصطکاک در پهنه‌ها، موضوعی قابل انتظار بود (رابطه ۳). شکل ۶-الف توزیع خطی در نظر گرفته شده برای فاکتور اصطکاک به عنوان الگوی سوم تغییرات فاکتور اصطکاک (LF4P) را نشان می‌دهد. روابطی که برای بیان فاکتور اصطکاک با استفاده از اطلاعات این فاکتور محاسبه گردیدند، عبارت‌اند از (شکل ۶-الف):

$$f_1=3.80964z, \quad f_{2a}=-0.01993+4.49214z, \\ f_{2b}=-0.12328+6.26178z, \quad f_3=-0.12328+6.26178z \quad (14)$$

پارامتر جریان ثانویه برای الگوی LF4P در چهار پهنه عبارت‌اند از:

$$\Gamma_1=0.590, \quad \Gamma_{2a}=-0.501, \quad \Gamma_{2b}=-0.365, \quad \Gamma_3=0.009 \quad (\text{N/m}^2) \quad (15)$$

شکل ۶-ج نشان می‌دهد که عدم پیوستگی در پروفیل تنش برشی با استفاده از الگوی LF4P، برای بیان تغییرات فاکتور



شکل ۶-الف) تغییرات فاکتور اصطکاک (ب) سرعت متوسط عمقی و (ج) تنش برشی

که به ترتیب در شکل‌های ۶-ب و ۶-ج نشان داده شده‌اند، محاسبه گردید. همان‌گونه که در شکل ۶-الف دیده می‌شود فاکتور اصطکاک در امتداد دیواره کانال دارای مقدار ثابتی نیست. از این رو استفاده از فاکتور اصطکاک ثابت در تخمین سرعت متوسط عمقی و تنش برشی، نتایج نادرستی را ارائه می‌دهد (شکل ۴). در راستای تعیین روشی مناسب برای تعریف فاکتور اصطکاک از روش سعی و خطا استفاده شد. به عنوان اولین الگو، مقدار فاکتور اصطکاک در پهنه‌های ۱، ۲، ۳ ثابت در نظر گرفته شد (شکل‌های ۵ و ۶-الف). این مقادیر عبارت‌اند از

$$f_1=0.05562, \quad f_2=0.19968, \quad f_3=0.31098 \quad (10)$$

این الگوی تغییرات فاکتور اصطکاک CF3P نام‌گذاری گردید. مقادیر فاکتور اصطکاک ارائه شده در رابطه ۱۰ با استفاده از ضرایب زبری محاسبه گردیده بر اساس اطلاعات آزمایشگاهی که در شکل ۶-الف نشان داده شده است، تخمین زده شد. در همه پهنه‌ها

SKM ارائه شده است. RMSE برای سرعت متوسط عمقی را نیز می توان از رابطه ۹ استخراج نمود. ضریب همبستگی R با استفاده از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$R = \sqrt{\frac{(S_t - S_r)}{S_t}} \times 100 \quad (16)$$

که در آن

S_t مجموع توان دوم تفاضل میان اطلاعات اندازه گیری شده از متوسط آنها است و S_r مجموع توان دوم تفاضل میان اطلاعات آزمایشگاهی و تخمینی توسط مدل است. در همه آزمایشها ضریب همبستگی میان سرعت متوسط عمقی آزمایشگاهی با پروفیل سرعت تخمین زده شده توسط SKM بیش از ۹۹ درصد بود و RMSE نیز کمتر از ۳/۷ درصد بود (جدول ۳). ضریب همبستگی محاسبه شده با استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی و تخمینی تنش برشی نیز در محدوده ۹۹/۲ درصد تا ۹۷/۵ درصد واقع شد. RMSE آنها نیز کمتر از ۹/۴ درصد بود (جدول ۳). این نتایج گویای توانایی خوب روش SKM در تخمین پروفیل سرعت متوسط عمقی و تنش برشی است.

نتایج تخمین سرعت متوسط عمقی و تنش برشی به روش SKM (LF4P) در آزمایشهای شماره ۲ و ۴ در شکل ۷ و جدول ۲ نشان داده شده است. مقایسه این نتایج با مقادیر آزمایشگاهی گویای انطباق خوب اطلاعات بر یکدیگر است.

۸- نتیجه گیری

به کارگیری روش SKM با استفاده از فرضیات مرسوم هیدرولیکی نتایج غیر قابل قبولی از تخمین سرعت متوسط عمقی و تنش برشی در کانالهای مثلثی باز را ارائه می دهد. به منظور رفع این مشکل لازم است پارامترهای فاکتور اصطکاک f و جریان ثانویه Γ کالیبره شود. در این راستا الگوهای مختلفی از فاکتور اصطکاک و سلولهای جریان ثانویه ارائه گردید و نتایج استفاده از آنها با

اصطکاک رفع گردیده است. شکل ۶-ب نشان می دهد که پروفیلهای سرعت متوسط عمقی تخمین زده شده با SKM و الگوهای CF4P، CF3P و LF4P همواره پیوسته بوده و از انطباق خوبی با اطلاعات آزمایشگاهی برخوردار است. دبی و سرعت متوسط مقطع که با استفاده از SKM و الگوی LF4P تخمین زده شد نیز به ترتیب برابر با ۱/۲۳ لیتر بر ثانیه و ۰/۱۱۵ متر بر ثانیه بود. این مقادیر ۱/۶ درصد کمتر از مقادیر واقعی دبی و سرعت متوسط می باشند. این امر نشان می دهد که در نظر گرفتن الگوی پیشنهادی جهت سلولهای جریان ثانویه و تغییرات خطی فاکتور اصطکاک بر روی دیوارهها منجر به تخمین دقیق تر دبی و سرعت متوسط می گردد.

تخمین تغییرات فاکتور اصطکاک در پهنه های 2a و 2b که به ترتیب توسط معادلات $f_{2a} = -0.01993 + 4.49214z$ و $f_{2b} = -0.12328 + 6.26178z$ صورت پذیرفته است، دارای کمی عدم تطابق بر اطلاعات محاسباتی بود. این موضوع به دلیل انحراف اندک توزیع تنش برشی تخمینی بر اساس الگوی LF4P از مقادیر آزمایشگاهی در پهنه دوم است (شکل ۶-ج).

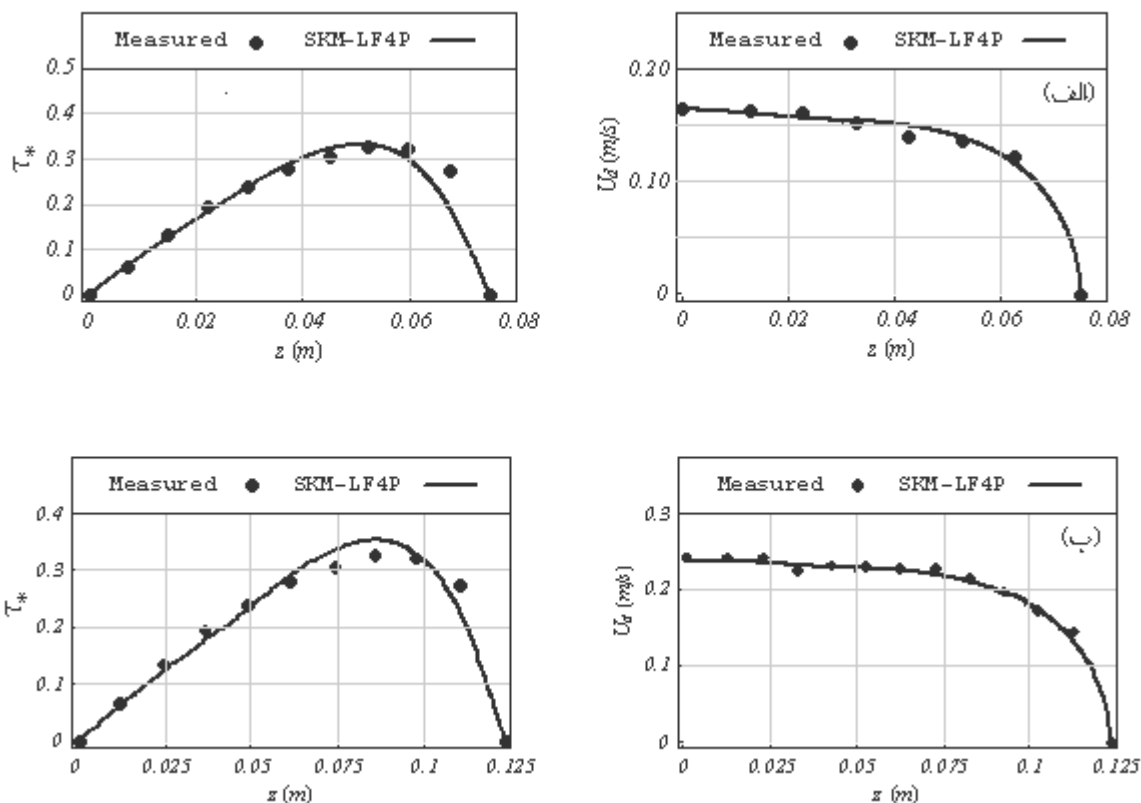
شکل ۶ نشان می دهد که فاکتور اصطکاک دارای اثر بسزایی در تخمین پروفیل تنش برشی است. عدم پیوستگی در این پروفیل با در نظر گرفتن توزیع خطی از فاکتور اصطکاک که منطبق بر واقعیت است، بر طرف می گردد. حساسیت پروفیل سرعت متوسط عمقی به پارامتر Γ نیز در مقایسه با پارامتر f بیشتر است [۲۷]. با در نظر گرفتن تغییرات خطی فاکتور اصطکاک و الگوی جریان ثانویه ارائه شده می توان به تخمین قابل قبولی از سرعت متوسط عمقی و تنش برشی با استفاده از SKM دست یافت (شکل ۵).

۷- نتایج و بحث

در جدول ۳، جذر متوسط توان دوم خطاها (RMSE) و همچنین ضریب همبستگی R بین اطلاعات آزمایشگاهی و تخمینی توسط

جدول ۳- مقایسه نتایج آزمایشگاهی با مقادیر تخمینی به روش SKM

τ^*	U_d (m/s)		Q and U %. Error	Q_p (lit/s)	U_p (m/s)	شماره آزمایش	
	(Measured-SKM)	(Measured-SKM)					
	%. RMSE	%. R					
۷/۵	۹۸/۷۸	۲/۲	۹۹/۸۰	۷/۳	۴۳۳/	۱۳۰/۳	۱
۶/۰	۹۹/۲۳	۲/۸	۹۹/۵۶	۴/۱	۱۳/۹۶	۴۴۷۰/	۲
۸/۱	۹۷/۸۷	۳/۷	۹۹/۵۰	۱۱/۸	۵۶/۱	۱۳۹۰/	۳
۸/۵	۹۸/۱۲	۲/۸	۹۹/۷۵	۹/۵	۶/۳۸	۲۰۹۰/	۴
۶/۵	۹۸/۶۶	۲/۲	۹۹/۷۷	۱/۶	۱/۲۳	۰/۱۱۵	۵
۹/۴	۹۸/۵۴	۲/۹	۹۹/۵۸	۷/۴	۵/۱۱	۱۶۱۰/	۶



شکل ۷- مقایسه مقادیر سرعت متوسط عمقی و تنش برشی آزمایشگاهی با پروفیل تخمین زده شده توسط روش SKM (LF4P) (الف) آزمایش شماره ۲ و (ب) آزمایش شماره ۴

با توجه به موقعیت و جهت چرخش سلول‌های جریان ثانویه تعیین گردید. بر اساس الگوی ارائه شده برای سلول‌های جریان ثانویه، تعداد پهنه‌های مورد نیاز برای مدل نمودن فاکتور اصطکاک در تخمین سرعت متوسط عمقی و تنش برشی، چهار عدد بود. بهترین نتایج تخمین توزیع U_a و τ با استفاده از الگوی ارائه شده جهت سلول‌های جریان ثانویه و تغییرات خطی فاکتور اصطکاک در هر پهنه قابل دستیابی بود.

یکدیگر و همچنین با اطلاعات آزمایشگاهی مقایسه شد. نتایج نشان داد که در صورت در نظر گرفتن مقدار ثابت برای فاکتور اصطکاک در هر پهنه، پروفیل تنش برشی تخمین زده شده دارای غیر یکنواختی بوده و علاوه بر آن از انطباق خوبی بر اطلاعات آزمایشگاهی برخوردار نیست.

تعداد سلول‌های جریان ثانویه در نیمی از کانال باز با مقطع مثلثی، دو عدد بود که یکی از آنها نزدیک به خط میانه مقطع و دیگری نزدیک به جداره کانال بود. علامت پارامتر جریان ثانویه Γ .

۹- مراجع

- 1- Riahi Modvar, H., and Ayyoubzadeh, S. A. (2008). "Estimating longitudinal dispersion coefficient of pollutants using adaptive neuro-fuzzy inference system." *J. of Water and Wastewater*, 67, 34-47 (In Persian).
- 2- Lai, C.J., and Knight, D.W. (1988). "Distribution of streamwise velocity and boundary shear stress in compound ducts." *Proc., 3rd Int. Symp. on Refined Flow Modeling and Turbulence Measurements*, Tokyo, Japan, 527-536.
- 3- Knight, D.W., Yuen, K.W.H., and Al-hamid, A.A.I. (1994). "Chapter 4: Boundary shear stress distributions in open channel flow." *Physical mechanisms of mixing and transport in the environment*, K. Beven, P. Chatwin, J. Millbank, eds. Wiley, New York.

- 4- Rhodes, D.G., and Knight, D.W. (1994). "Distribution of shear force on boundary of smooth rectangular duct." *J. Hydr., Eng.*, 120(7), 787-807.
- 5- Yang, S.Q., and Lim, S.Y. (2005). "Boundary shear stress distributions in trapezoidal channels." *J. Hydr. Res.* 43(1), 98-102.
- 6- Shiono, K., and Knight, D.W. (1988). "Two-dimensional analytical solution for a compound channel." *Proc., 3rd Int. Symp. on Refined Flow Modeling and Turbulence Measurements*, Tokyo, Japan, 503-510.
- 7- Shiono, K., and Knight, D.W. (1991). "Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel." *J. Fluid Mech.*, 222, 617-646.
- 8- Knight, D.W., Shiono, K., and Pirt, J. (1989). "Prediction of depth mean velocity and discharge in natural rivers with overbank flow." *Proc. Int. Conf. on Hydraulic and Environmental Modeling of Coastal, Estuarine and River Waters*, Univ. of Bradford, Gower Technical Press, 38,419-428.
- 9- Knight, D.W., and Shiono, K. (1996). *River channel and floodplain hydraulics*, Wiley, New York.
- 10- Knight, D.W., Omran, M., and Tang, X. (2007). "Modeling depth-averaged velocity and boundary shear in trapezoidal channels with secondary flows." *J. Hydr. Eng.*, 133 (1), 39-47.
- 11- Tang, X., and Knight, D.W. (2008). "Lateral depth-averaged velocity distribution and bed shear in rectangular compound channels." *J. Hydr. Eng.*, 134(9), 1337-1342.
- 12- Tominaga, A., and Knight, D.W. (2004). "Numerical evaluation of secondary flow effects on lateral momentum transfer in overbank flows." *River Flow 2004, Proc., 2nd Int. Conf. on Fluvial Hydraulics*, Napoli, Italy, Vol 1, 353-361.
- 13- Abril, J.B., and Knight, D.W. (2004). "Stage-discharge prediction for rivers in flood applying a depth-averaged model." *J. Hydr. Res.*, 42 (6), 616-629.
- 14- Knight, D.W., and Abril, J.B. (1996). "Refined calibration of a depth averaged model for turbulent flow in a compound channel." *Proc., Institution of Civil Engineers, Water, Maritime and Energy*, London, 151-159.
- 15- Ghosh, S.N., and Roy, N. (1970). "Boundary shear distribution in open channel flow." *J. Hydr. Div.*, 96(4), 967-994.
- 16- Flintham, T.P., and Carling, P.A. (1988). "The prediction of mean bed and wall boundary shear in uniform and compositely rough channels." *Proc. Int. Conf. River Regime*, New York, 267-286.
- 17- Yang, S.Q., and Lim, S.Y. (1997). "Mechanism of energy transportation and turbulent flow in a 3D channel." *J. Hydr. Eng.*, 123(8), 684-692.
- 18- Yang, S. Q., and Lim, S.Y. (1998). "Boundary shear stress distributions in smooth rectangular channels." *Proc. Institution of Civil Engineers Water, Maritime and Energy*, London, 163-173.
- 19- Yang, S. Q., and Lim, S.Y. (2002). "A geometrical method for computing the distribution of boundary shear stress across irregular straight open channels." *J. Hydr. Res.*, 40(3), 535-542.
- 20- Khodashenas, S. R., El Kadi Abderrezzak, K., and Paquier, A. (2008). "Boundary shear stress in open channel flow: A comparison among six methods." *J. Hydr. Res.*, 46(5), 598-609.
- 21- Balachander, R., Hagel, K., and Blakely, D. (2002). "Velocity distribution in decelerating flow over rough surface." *Can. J. Civil Eng.*, 29, 211-220.
- 22- Lane, E.W. (1953). "Progress report on studies on the design of stable channels by the Bureau of Reclamation." *ASCE*, 79, 1-30.
- 23- Knight, D.W., and Patel, H. S. (1985a). "Boundary shear in smooth rectangular ducts." *J. Hydr. Eng.*, 111 (1), 29-47.
- 24- Tominaga, A., Nezu, I., Ezaki, K., and Nakagawa, H. (1989). "Three-dimensional turbulent structure in straight open channel flows." *J. Hydr. Res.*, 27(11), 149-173.
- 25- Aly, A. M. M., Trupp, A.C., and Gerrard, A.D. (1978). "Measurements and prediction of fully developed turbulent flow in an equilateral triangular duct." *J. of Fluid Mech.*, 85 (1), 57-83.
- 26- Khodashenas, S. R., and Paquier, A. (1999). "A geometrical method for computing the distribution of boundary shear stress across irregular straight open channels" *J. Hydr. Res.*, 37 (3), 381-388.
- 27- Liao, H., and Knight, D.W. (2007). "Analytic stage-discharge formulas for flow in straight prismatic channels." *J. Hydr. Eng.*, 133(10), 1111-1122.