

ارائه مدل یک بعدی برای برآورد توزیع سرعت در کانال روباز کم عرض

نگین بینش^۱، حسین بنکداری^{۲*}

۱. دانشجوی دکترای مهندسی محیط زیست - منابع آب، دانشگاه تهران

۲. استاد گروه مهندسی عمران، دانشگاه رازی کرمانشاه

bonakdari@yahoo.com

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۴/۱۰/۲۷]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۴/۲/۱۱]

چکیده - برآورد توزیع سرعت به عنوان یک پارامتر کلیدی در تخمین دیگر پارامترهای هیدرولیکی جریان مانند دبی و تنش برشی از اهمیت زیادی برخوردار است؛ و در دهه‌های اخیر، برآورد پروفیل توزیع سرعت جریان در کانال‌های کم‌عرض با نسبت عرض به عمق کمتر از ۵، توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود معطوف داشته است. در این مقاله یک مدل تحلیلی برای برآورد توزیع سرعت جریان آشفته و کاملاً توسعه یافته، بر مبنای معادلات میانگین‌گیری شده رینولدز ناویر استوکس (RANS) و یک توزیع لزجت گردابی ارائه شده است. مدل پیشنهادی قابلیت کاربرد در هر دو دسته کانال‌های عریض و کم‌عرض را دارد. این مدل با داده‌های اندازه‌گیری شده در کانال‌های آزمایشگاهی مستطیلی و نیز داده‌های حاصل از یک سایت واقعی کانال فاضلاب مقایسه و معتبرسازی شده است. به دلیل وابستگی معادله توزیع سرعت پیشنهادی به پارامتر کولز، تأثیر این پارامتر بر میزان دقت در توصیف پروفیل سرعت و پیش‌بینی محل وقوع سرعت ماکزیمم نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. در مطالعه حاضر، پارامتر کولز از طریق برازش به دست آمده و مقادیری که به ازای آن، مدل پیشنهادی کمترین میزان خطا را در برآورد پروفیل سرعت ارائه می‌دهد، پیشنهاد شده است. نتایج نشان می‌دهد که پروفیل‌های سرعت به دست آمده از مدل پیشنهادی هماهنگی بالایی با داده‌های اندازه‌گیری شده داشته و گرادیان منفی سرعت در نزدیکی سطح آزاد آب را به خوبی نشان می‌دهد. مقدار پارامتر کولز برای کانال فاضلاب کمتر از مقدار این پارامتر برای کانال‌های آزمایشگاهی به دست آمد.

واژگان کلیدی: توزیع سرعت، لزجت گردابی، پارامتر کولز

۱ - مقدمه

جریان است)، بستگی دارد. بر اساس این نسبت ابعادی، یک کانال می‌تواند در دسته کانال‌های کم‌عرض یا عریض طبقه بندی شود. در کانال‌های کم‌عرض، نسبت ابعادی عرض کانال به عمق جریان تقریباً کوچکتر یا مساوی ۵ است. در این کانال‌ها جریان‌های ثانویه ایجاد شده به دلیل آثار دیواره‌های جانبی سبب می‌شود که گرادیان منفی سرعت در نزدیکی سطح آزاد اتفاق بیافتد و سرعت ماکزیمم زیر سطح آزاد آب

توزیع سرعت اساس کلیه معادلات جریان در کانال‌های روباز بوده و محدوده وسیعی از کاربردها مانند برآورد دبی، تنش برشی، ظرفیت انتقال رسوب و فرسایش را شامل می‌شود. نزو و رودی [۱] بر اساس اندازه‌گیری از طریق تکنولوژی لیزر و مطالعه روی جریان‌های ثانویه در مقطع عرضی کانال، نشان دادند که رفتار هیدرولیکی جریان در کانال روباز به شدت به نسبت ابعادی $A_r = \frac{B}{D}$ (که B عرض کانال و D عمق

1 Reynolds Averaged Navier-Stokes

همکاران [۱۶، ۱۷]، بنکداری [۱۸-۲۰]، ابسی [۲۱، ۲۲]، پو و همکاران [۲۳]، معظم نیا و بنکداری [۲۴]، کندو و قوشال [۲۵]، بنکداری و احدی [۲۶]، لاساباتاره و همکاران [۲۷]، کوی و سینق [۲۸]، الفضلی و همکاران [۲۹]. نزو و رودی [۳۰] یک معادله نسبتاً دقیق برای توزیع لزجت گردابی ارائه نمودند و بعدها کندو و قوشال [۲۵] به معرفی معادله‌ای جدید برای آن مبادرت ورزیدند.

قانون لگاریتمی به خوبی توزیع سرعت در ناحیه داخلی نزدیک به جداره ($y < 0.2D$) را بیان می‌کند [۶]، پس مدلی مورد نیاز است که بتواند توزیع سرعت را در ناحیه خارجی جریان را برآورد کرده و ضمن توصیف پدیده دیپ، بیشترین هماهنگی را نیز با داده‌های اندازه‌گیری شده در این ناحیه و نزدیک سطح آب داشته باشد. بر این اساس در این مقاله، با استفاده از معادلات ناویر استوکس متوسط‌گیری شده رینولدز و رابطه لزجت گردابی ارائه شده به وسیله‌ی کندو و قوشال [۲۵]، مدلی کاملاً تحلیلی برای ناحیه خارجی جریان پیشنهاد می‌شود که توانایی توصیف پدیده دیپ را دارا بوده و پروفیل سرعت را در کانال‌های کم‌عرض و عریض به خوبی پیش‌بینی می‌نماید. همچنین به دلیل وابسته بودن مدل به پارامتر کولز (II)، تأثیر این پارامتر بر توزیع لزجت گردابی در مقطع عرضی کانال و همچنین پروفیل سرعت محاسبه شده از مدل بررسی شده است.

۲- معادلات حاکم بر مدل

در این بخش به ارائه معادلات حاکم بر مدل پیشنهادی توزیع سرعت می‌پردازیم. فرضیات در نظر گرفته شده در رسیدن به این مدل به این شرح است که در تشریح مدل نیز به طور دقیق‌تر بررسی خواهند شد: (۱) جریان دائمی و یکنواخت، با سطح آزاد است؛ (۲) از تغییرات سرعت در جهت عرضی مقطع جریان به دلیل ناچیز بودن در مقابل تغییرات در امتداد قائم، چشم‌پوشی می‌شود. (۳) معادله پیشنهادی برای ناحیه خارجی جریان به دست آمده است. و (۴) از اثر لزجت در ناحیه خارجی جریان، به دلیل ناچیز بودن، چشم‌پوشی شده است.

رخ دهد، که پدیده دیپ سرعت^۱ نامیده می‌شود. اما در کانال‌های عریض با نسبت عرض به عمق بیشتر از ۵، شدت جریان‌های ثانویه ناشی از دیواره‌ها، به ویژه در ناحیه میانی عرض کانال، کاهش می‌یابد و سرعت ماکزیمم تقریباً در سطح آب رخ می‌دهد [۲].

در کانال‌های روباز عریض، از دیرباز قانون توان و قانون لگاریتمی برای برآورد توزیع سرعت به کار گرفته می‌شده است [۳]. قانون لگاریتمی نمی‌تواند پروفیل سرعت در ناحیه خارجی ($0.2D \leq y \leq D$) که y فاصله عمودی از بستر کانال و D عمق جریان است) را به خوبی پیش‌بینی نماید. بنابراین کولز [۴] با ایجاد اصلاحاتی در قانون لگاریتمی، مدل جدیدی که به قانون ویک کولز^۲ مشهور است، را پیشنهاد داد. در جریان‌های دو بعدی در کانال‌های باز، می‌توان مدل پیشنهادی کولز را از جمله منطقی‌ترین تعمیم‌ها برای قانون لگاریتمی در نظر گرفت [۵]. اما در کانال‌های کم‌عرض با نسبت ابعادی کمتر از ۵، قانون کولز نمی‌تواند رفتار جریان و پدیده دیپ را توصیف نماید، چرا که تنها قادر به پیش‌بینی توزیع سرعتی است که با افزایش فاصله از بستر کانال، با شیب مثبت تا سطح آب افزایش می‌یابد [۶]. بنابراین پیش‌بینی دقیق پدیده دیپ سرعت، نیازمند مدل‌های آشفتگی غیر ایزوتروپیک بر مبنای تجزیه و تحلیل معادلات ناویر استوکس متوسط‌گیری شده رینولدز است. در این رابطه می‌توان از مدل‌های آشفتگی یا روابط تجربی یا تحلیلی برای پیش‌بینی پدیده دیپ و موقعیت سرعت ماکزیمم در کاربردهای مهندسی استفاده نمود. تاکنون پژوهشگران بسیاری روی اعتبار قوانین یاد شده بررسی‌هایی صورت داده و اصلاحاتی را در رابطه با قانون لگاریتمی و قانون ویک کولز به منظور نمایش پدیده دیپ انجام داده‌اند، و مدل‌هایی را ارائه نموده‌اند که توانایی پیش‌بینی این پدیده و توصیف گرادیان منفی سرعت در نزدیکی سطح آب در کانال‌های روباز کم‌عرض را داشته باشد، از قبیل: سارما و همکاران [۷، ۸]، چپو [۹]، چپو و هسو [۱۰]، کاردوسو و همکاران [۱۱]، کیرونوتو و گرف [۱۲]، ونگ و همکاران [۱۳]، گوئو و ژولین [۱۴]، [۱۵]، یانگ و

1 velocity-dip-phenomenon

2 Coles Wake Law

ترم $(v \frac{dU}{dy})_{(y)}$ در معادله فوق بیانگر اثر لزجت در ناحیه مرکزی است. در ناحیه خارجی جریان و برای مقادیر بزرگ y ، اثر این ترم ناچیز بوده و قابل چشم‌پوشی کردن است $[(v \frac{dU}{dy})_{(y)} \cong 0]$ [۳۸]، در نتیجه رابطه (۴) به صورت زیر در می‌آید:

$$-VU_{(y)} = \overline{(uv)}_{(y)} + g \sin \theta (D - y) \quad (5)$$

از طرفی عبارت دوم سمت راست معادله (۵) نشانگر تنش‌های رینولدز (\overline{uv}) بوده که با توجه به فرضیه بوسینسک [۳۹] مقدار آن برابر است با [۳۷]:

$$-\overline{(uv)} = \nu_t \frac{dU}{dy} \quad (6)$$

که در آن ν_t بیانگر لزجت گردابی است. تاکنون روابط مختلفی برای لزجت گردابی ارائه شده است؛ از جمله این روابط، معادله ارائه شده به وسیله کندو و قوشال [۲۵] به صورت زیر است:

$$\frac{\nu_t}{u_* D} = \kappa (1 - \xi) \left[\frac{1}{\xi} + 12 \Pi \xi (1 - \xi) \right]^{-1} \quad (7)$$

که در آن u_* سرعت برشی و برابر با $\sqrt{\tau_b / \rho}$ ، τ_b تنش برشی موضعی، $\xi = \frac{y}{D}$ ، و Π ثابت و یک کولز است. κ نیز ثابت فون کارمن و برابر با 0.41 فرض شده است. به منظور رسیدن به رابطه‌ای جدید برای توزیع سرعت، با جایگذاری معادله (۷) به جای لزجت گردابی در رابطه (۶) داریم:

$$-\overline{(uv)} = \frac{\kappa u_* D (1 - \xi)}{\left[\frac{1}{\xi} + 12 \Pi \xi (1 - \xi) \right]} \cdot \frac{dU}{dy} \quad (8)$$

با جایگزین نمودن معادله (۸) در معادله (۵) و تقسیم طرفین معادله بر u_*^2 ، معادله زیر به دست می‌آید:

$$\frac{VU_{(y)}}{u_*^2} = \frac{\kappa D (1 - \xi)}{u_* \left[\frac{1}{\xi} + 12 \Pi \xi (1 - \xi) \right]} \cdot \frac{dU}{dy} \quad (9)$$

$$\frac{gD \sin \theta (1 - \xi)}{u_*^2}$$

معادله ناویراستوکس متوسط‌گیری شده رینولدز (RANS) در امتداد مولفه طولی جریان آشفته در کانال روباز به صورت زیر است:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} - \frac{\partial \overline{uv}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{uw}}{\partial z} + g \sin \theta \quad (1)$$

که U ، V و W به ترتیب مولفه‌های سرعت در امتدادهای طولی، قائم و عرضی است. همچنین u ، v و w مولفه‌های نوسانی سرعت در امتدادهای طولی، قائم و عرضی هستند، و ν لزجت سینماتیک سیال، P فشار، θ زاویه بستر کانال نسبت به افق، g شتاب ثقل و ρ چگالی سیال است. با فرض جریان دائمی و یکنواخت $(\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial t} = 0)$ با سطح آزاد $(\frac{\partial P}{\partial x} = 0)$ و نیز با توجه به اینکه در ناحیه مرکزی کانال میزان گرادیان در امتداد قائم بسیار بیشتر از گرادیان در امتداد عرضی $(\frac{\partial}{\partial y} \gg \frac{\partial}{\partial z})$ است و می‌توان از تغییرات سرعت در جهت عرضی مقطع جریان چشم‌پوشی کرد [۳۶، ۳۷]، رابطه (۱) به صورت ساده شده زیر در می‌آید:

$$V \frac{\partial U}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} - \frac{\partial \overline{uv}}{\partial y} + g \sin \theta \quad (2)$$

با توجه به اینکه هدف یافتن معادله توزیع سرعت در ناحیه خارجی جریان است، از طرفین معادله ۲ در بازه مربوط به ناحیه خارجی $(0.2D \leq y \leq D)$ انتگرال می‌گیریم:

$$VU_{(D)} - VU_{(y)} = \left[\left(\nu \frac{dU}{dy} \right)_{(D)} - \left(\nu \frac{dU}{dy} \right)_{(y)} \right] - \left[\overline{(uv)}_{(D)} - \overline{(uv)}_{(y)} \right] + g \sin \theta (D - y) \quad (3)$$

در سطح آزاد آب، مولفه عمودی سرعت (V) و مولفه نوسانی سرعت قائم (v) ، و مقدار سرعت برشی $(\frac{dU}{dy})$ همگی برابر صفر است [۲۲]، بنابراین داریم:

$$-VU_{(y)} = -\left(\nu \frac{dU}{dy} \right)_{(y)} + \overline{(uv)}_{(y)} + g \sin \theta (D - y) \quad (4)$$

دارای معنای فیزیکی بوده که بر اساس مشخصات کانال و شرایط هیدرولیکی جریان به دست می‌آید.

ترم اول معادله (۱۳)، بیانگر قانون لگاریتمی است؛ ترم دوم در ناحیه خارجی نقش مهمی را ایفا می‌کند، اما این ترم در ناحیه داخلی با توجه به اینکه $\ln(1 - \frac{y}{D}) \approx 0$ است، قابل چشم‌پوشی کردن است. ترم سوم معادله، پارامتر کولز را دارد که تأثیر آن بر محاسبه پروفیل سرعت طولی جریان و محل وقوع سرعت ماکزیمم، در این مقاله بررسی می‌شود. اگر ثابت کولز صفر باشد، معادله فوق به مدل یانگ و همکاران [۱۶] تبدیل می‌شود، با این تفاوت که یک ضریب α را نیز در ترم اول دارد. پارامتر β ضریب اصلاحی قانون لگاریتمی برای نمایش پدیده دیپ است و به محل وقوع سرعت ماکزیمم مرتبط است. ابسی [۲۲] رابطه (۱۴) را برای محاسبه این پارامتر پیشنهاد داد:

$$\beta = \frac{1}{\xi_{dip}} - 1 \quad (14)$$

ξ_{dip} فاصله بی‌بعد شده از بستر کانال است که در آنجا سرعت ماکزیمم اتفاق می‌افتد. لازم به گفتن است که برای کانال‌های روباز عریض که $A_r > 5$ است، β به سمت صفر میل می‌کند ($\beta \rightarrow 0$) و مدل پیشنهادی به شکل ساده تری در می‌آید. بنابراین معادله (۱۳) می‌تواند توزیع سرعت طولی جریان برای ناحیه خارجی جریان در کانال‌های روباز کم‌عرض و عریض را به خوبی توصیف نماید.

۳- داده‌های میدانی به کارگیری شده در

پژوهش

۳-۱- داده‌های مربوط به کانال‌های آزمایشگاهی

داده‌های کولمن [۳۱]، لین [۳۲]، ونگ و کیان [۳۳]، و کیرونوتو و گراف [۱۲] به منظور راستی‌آزمایی نتایج به دست آمده از مدل‌های بررسی شده استفاده شده است. در تمام موارد، داده‌های آزمایشگاهی بر اساس شرایط کانال روباز کم‌عرض و جداره‌های صاف به دست آمده‌اند. برخی مشخصات و مقادیر پارامترهای استفاده شده در این اندازه‌گیری‌ها در (جدول ۱) ارائه شده است.

ترم سمت چپ معادله فوق منعکس کننده اثر جریان‌های ثانویه است یانگ و همکاران [۱۶] رابطه (۱۰) را برای برآورد این ترم ارائه دادند:

$$\frac{VU}{u_*^2} = -\beta \frac{y}{D} \quad (10)$$

که در آن β ضریبی مثبت است. با توجه به معادلات (۹) و (۱۰) و جایگذاری و ساده‌سازی، داریم:

$$\frac{1}{u_*} \cdot \frac{dU}{dy} = \frac{-\beta \xi [\frac{1}{\xi} + 12 \Pi \xi (1 - \xi)]}{\kappa D (1 - \xi)} + \frac{g \sin \theta [\frac{1}{\xi} + 12 \Pi \xi (1 - \xi)]}{\kappa u_*^2} \quad (11)$$

معادله فوق را همچین می‌توان به صورت رابطه (۱۲) نیز بیان نمود:

$$\frac{dU}{d\xi} = \frac{-\beta [1 + 12 \Pi \xi^2 (1 - \xi)]}{\kappa (1 - \xi)} + \frac{gD \sin \theta}{\kappa u_*^2 \xi} + \frac{12 \Pi gD \sin(\theta) \xi (1 - \xi)}{\kappa u_*^2} \quad (12)$$

که $U_a = \frac{U}{u_*}$ است. با در نظر گرفتن $\alpha = \frac{gD \sin \theta}{u_*^2}$ ساده‌سازی بیشتر و انتگرال‌گیری، و با در نظر گرفتن اینکه $1 \gg \xi_0$ ، رابطه زیر برای توزیع سرعت در ناحیه خارجی به دست می‌آید $\xi_0 = \frac{y_0}{D}$ ، y_0 فاصله‌ای است که در آن سرعت برابر صفر فرض می‌شود):

$$\frac{U}{u_*} = \frac{\alpha}{\kappa} \ln\left(\frac{\xi}{\xi_0}\right) + \frac{\beta}{\kappa} \ln(1 - \xi) + \frac{2 \Pi}{\kappa} [3\alpha \xi^2 - 2\alpha \xi^3 - 2\beta \xi^3] \quad (13)$$

وجه تمایز ظاهری معادله فوق با مدل کندو و قوشال [۲۵] این است که مدل حاضر، پارامتر $\alpha = \frac{gD \sin \theta}{u_*^2}$ را نیز در خود گنجانده است، که بر این اساس انتظار می‌رود که دقت بیشتری در برآورد پروفیل سرعت و پیش‌بینی گرادیان سرعت در مجاورت سطح آزاد آب دارا باشد. α ضریبی بدون بعد و

جدول (۱) مقادیر پارامترهای مورد استفاده در اندازه‌گیری داده‌های آزمایشگاهی

Π (Coles parameter)	K (Von Karman Constant)	u_* (cm/s)	U_{max} (m/s)	Depth (cm)	RUN	Lab Data
0.2558	0.41	4.1	1.05	17.2	RUN 1	Coleman [31]
0.2780	0.41	3.11	0.7530	6.54	C-1	Lin [32]
-0.03	0.41	0.09	2.098	10	CW2	Wang and Qian [33]
0.105	0.41	3.70	0.572	28.50	UGA3	Kironoto and Graf [12]

Table 1- Values of used parameters for measuring lab data

جدول (۲) برخی از مقادیر متفاوت ثابت کولز، ارائه شده به وسیله‌ی پژوهشگران مختلف برای جریان در کانال روباز

Li et al. [43]	Cardoso et al., [34]	Cardoso et al., [11]	Kirkgoz [42]	Nezu and Rodi [30]	Coleman [41]	Coles [4]	Researchers
0.3	-0.077	0.08	0.1	0-0.2	0.19	0.55	Π

Table 2- Various values for Coles parameter, offered by different researchers for open-channel flow

جدول (۳) مقادیر پارامتر کولز به دست آمده بر اساس مدل پیشنهادی و RMSE محاسبه شده متناظر آن در کانال‌های مختلف بررسی شده

RMSE	Coles parameter(Π)	Type of Data in channels
0.1316	0.24	Data from Cordon Bleu sewer channel (D=0.65 m) [35]
0.5055	0.53	Data of Coleman (RUN 1) [31]
0.311	0.71	Data of Lin (C-1) [32]

Table 3- Values of Coles parameter, obtained based on proposed model and corresponding RMSE calculated in different studied channels

۴- تحلیل نتایج

۴-۱- واسنجی مدل

از جمله پارامترهای موجود در معادله پیشنهادی برای توزیع سرعت (معادله ۱۴)، پارامتر ویک کولز (Π) است که در شکل پروفیل سرعت به دست آمده، اثر قابل توجهی داشته و نقش مهمی را در پیش‌بینی موقعیت پدیده دیپ سرعت ایفا می‌نماید. در واقع به دلیل وابستگی لزجت گردابی به ثابت کولز، توزیع سرعت محاسبه شده از مدل پیشنهادی نیز ناگزیر به پارامتر کولز وابسته می‌شود. برای جریان در کانال‌های روباز، پژوهشگران مختلف، مقادیر متفاوتی را برای ثابت کولز پیشنهاد داده‌اند و به نظر می‌رسد که یک مقدار ثابت برای پارامتر کولز قابل تعریف نباشد. بررسی چگونگی تغییر توزیع لزجت گردابی ارائه شده به وسیله‌ی کندو و قوشال معادله (۷) در مقطع عرضی کانال با مقادیر متفاوت پارامتر کولز (مقادیر به کار گرفته شده به وسیله‌ی پژوهشگران مختلف) نشان داد که با افزایش مقدار پارامتر کولز، لزجت گردابی در عمق کمتری به میزان حداکثر خود می‌رسد، و مقدار لزجت

همچنین داده‌های اندازه‌گیری شده تومیناگا و همکاران [۳۴] در یک کانال آزمایشگاهی برای راستی‌آزمایی نتایج حاصل شده از مدل‌ها استفاده شده، کانال مستطیلی بوده و دارای بستر صاف و شیب دار است. طول، عرض، و ارتفاع کانال به ترتیب برابر با ۱۲/۵ متر، ۴۰ سانتی‌متر، و ۴۰ سانتی‌متر است. جدارها از شیشه ساخته شده و جنس بستر کانال آهن رنگ آمیزی شده، و جریان کاملاً توسعه یافته و یکنواخت در ۷/۵ متری پایین دست ورودی کانال برقرار شده است.

۳-۲- داده‌های اندازه‌گیری شده در کانال فاضلاب

داده‌های اندازه‌گیری شده در سایت میدانی واقعی کردون بلو^۳ مربوط به یک کانال فاضلاب مرکب در فرانسه، برای ارزیابی توزیع سرعت استفاده شده است [۳۵]. مقطع عرضی مطابق با مقطع کم‌عرض شامل کانال بتنی تخم مرغی شکل است. جریان آشفته و زیر بحرانی، با عدد رینولدز بزرگتر از 10^5 و عدد فرود بین ۰/۲ و ۰/۳ برای تمام شرایط هیدرولیکی است. شیب طولی ۰/۰۰۰۴ و ضریب زبری مانینگ ۰/۰۱۴ است [۴۰].

است که مدل پیشنهادی به تمام پارامترهای به کار رفته در آن حساسیت نشان می‌دهد؛ بنابراین به منظور رسیدن به نتایج دقیق، لازم است مقادیر این پارامترها با دقت کافی برآورد شود.

۴-۳- راستی‌آزمایی مدل

مدل تحلیلی پیشنهادی با داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده به وسیله‌ی ونگ و کیان [۳۳] و کیرونوتو و گرف [۲۵]، به علاوه داده‌های تومیناگا و همکاران [۳۴] و نیز داده‌های اندازه‌گیری شده در کانال فاضلاب کردن بلو برای Zهای مختلف (Z فاصله جانبی از دیواره کناری کانال است) در دو تراز آب ۰/۹۱ متر و ۱/۱۹ متر مقایسه و راستی‌آزمایی شده و پروفیل سرعت به دست آمده از آن به ازای مقداری از پارامتر کولز که کمترین میزان خطا را به دست می‌دهد، در کانال‌های مربوطه رسم شده است. تمام داده‌های اندازه‌گیری شده مورد استفاده برای راستی‌آزمایی نتایج به دست آمده از مدل، در شرایط کانال‌های کم‌عرض (نسبت ابعادی کمتر از ۵) به دست آمده‌اند، و وقوع سرعت ماکزیمم زیر سطح آزاد آب که در داده‌های اندازه‌گیری شده مشهود است به همین دلیل است. لازم به گفتن است که با توجه به کالیبراسیون صورت گرفته، مقدار پارامتر کولز در راستی‌آزمایی نتایج مدل، ۰/۱۳ در نظر گرفته شد.

مقایسه توزیع سرعت به دست آمده از مدل پیشنهادی با داده‌های کیرونوتو و گرف [۱۲] و داده‌های ونگ و کیان [۳۳] بیانگر آن است که سرعت‌های محاسبه شده به وسیله‌ی مدل، در سرتاسر مقطع کانال هماهنگی خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده در کانال‌های آزمایشگاهی از خود نشان داده و در نمایش گرادیان منفی سرعت در نزدیکی سطح و برآورد دقیق محل وقوع سرعت ماکزیمم زیر سطح آزاد آب نیز عملکرد مناسبی دارد. هر چند در مقایسه پروفیل به دست آمده از مدل پیشنهادی با داده‌های ونگ و کیان اندکی انحراف نسبت به نتایج آزمایشگاهی در نزدیکی سطح آب مشاهده می‌شود (به منظور عدم افزایش تعداد صفحات مقاله، شکل‌های ترسیم شده در این دو کانال ارائه نشده‌اند).

گردابی نیز- به ویژه در ناحیه میانی عمق کانال- به ازای مقادیر بیشتر ثابت کولز (II)، کمتر است.

در این مطالعه نیز با برازش بهترین منحنی عبوری از میان نقاط نمودار خطای محاسباتی بر اساس معادله توزیع سرعت پیشنهادی معادله (۱۴) به ازای مقادیر مختلف پارامتر کولز، مقادیری از این پارامتر که کمترین خطا را در برآورد پروفیل سرعت طولی جریان به دست می‌دهد، برای دو کانال آزمایشگاهی کولمن [۳۱] و لین [۳۲] و کانال فاضلاب بررسی شده در تراز آب ۰/۶۵ متر پیشنهاد شده است. (۳) مقادیر پارامتر کولز برآورد شده بر اساس مدل پیشنهادی برای هر یک از کانال‌های بررسی شده، و مقدار RMSE مینیمم محاسبه شده به ازای پارامتر کولز مربوطه را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، مقدار پارامتر کولز (II) برای کانال فاضلاب، کمتر از مقدار این پارامتر برای کانال‌های آزمایشگاهی به دست آمد.

میزان خطا (RMSE) مینیمم به دست آمده نیز در کانال فاضلاب کمتر از خطای محاسبه شده برای کانال‌های آزمایشگاهی برآورد شد. پارامترهای کولز پیشنهادی در این جدول، مقادیری هستند که به ازای آنها، پروفیل سرعت به دست آمده از مدل ارائه شده، هماهنگی مطلوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده دارد. در برخی موارد، این مقادیر پیشنهادی با مقادیر ارائه شده به وسیله‌ی پژوهشگران مختلف (جدول ۲) مشابهت داشته، و در بعضی موارد نیز متفاوت است.

۴-۲- آنالیز حساسیت مدل

برای سنجش تأثیر پارامتر کولز بر توصیف دقیق توزیع سرعت و نمایش پدیده دیپ، توزیع سرعت محاسبه شده به وسیله‌ی مدل پیشنهادی (معادله ۱۴) برای مقادیر مختلف ثابت کولز در شرایط کانال آزمایشگاهی کیرونوتو و گرف [۱۲] ترسیم شد. نتایج نشان داد که با افزایش مقدار ثابت کولز، مقدار سرعت به ویژه در ناحیه میانی کانال و در نزدیکی سطح جریان، بیشتر برآورد شده، و محل وقوع سرعت ماکزیمم بیشتر در عمق جریان فرو رفته و پدیده دیپ بهتر نمایان می‌شود. لازم به گفتن است که آنالیز حساسیت در مورد سایر پارامترها نیز صورت گرفت که نتایج بیانگر این

شکل (۱) توزیع سرعت در کانال مستطیلی تومیناگا و همکاران [۳۴]

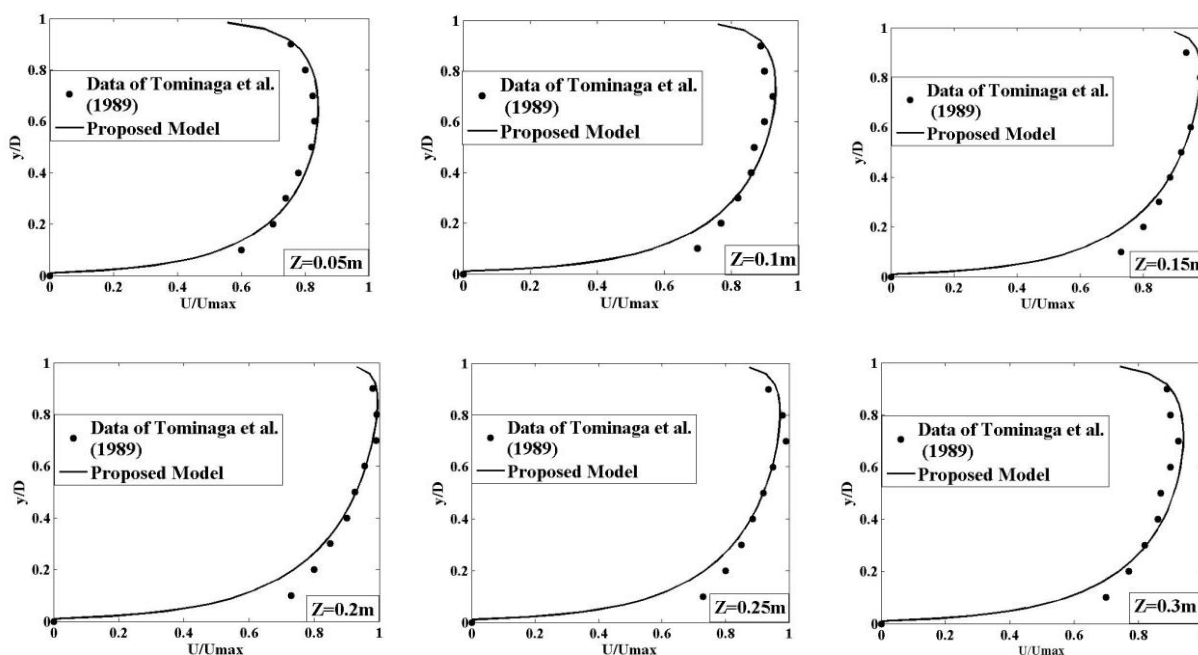


Fig. 1. Velocity distribution in Tominaga et al.'s rectangular channel [34]

جدول (۴) RMSE محاسبه شده برای پروفیل‌های به دست آمده از مدل پیشنهادی در مقایسه با داده‌های جمع‌آوری شده در کانال‌های آزمایشگاهی

Tominaga et al. [34]	Kironoto and Graf [12]	Wang and Qian [33]	Lab Data
0.0509	0.2857	0.3205	RMSE

Table 4- RMSE calculated for the profiles obtained from proposed model compared to data gathered in lab channels

۴-۳- مقایسه پروفیل‌های سرعت پیش‌بینی شده به وسیله مدل پیشنهادی با داده‌های اندازه‌گیری شده در کانال فاضلاب پروفیل‌های توزیع سرعت به دست آمده از مدل پیشنهادی با داده‌های جمع‌آوری شده در سایت واقعی کانال فاضلاب [۳۵] برای دو تراز آب ۰/۹۱ متر و ۱/۱۹ متر مقایسه شده است. در هر مورد، شش فاصله جانبی مختلف از دیواره سمت چپ کانال، از ۰/۵ متر تا ۱/۵ متر، بررسی و مطالعه شده است.

توزیع سرعت برآورد شده برای دو عمق ۰/۹۱ متر و ۱/۱۹ متر در کانال فاضلاب گویای آن است که در شرایط تراز متوسط آب (۰/۹۱ متر) در تمام فواصل جانبی از دیواره

مقایسه توزیع سرعت حاصله شکل (۱) از مدل پیشنهادی را با داده‌های اندازه‌گیری شده در کانال تومیناگا و همکاران [۳۴] نشان می‌دهد. در این مورد نیز مشاهده می‌شود که نتایج به دست آمده از مدل، هماهنگی قابل قبولی با داده‌های اندازه‌گیری شده نشان داده و در نمایش گرادبان منفی سرعت در نزدیکی سطح آب موفق عمل کرده و موقعیت پدیده دیپ را به خوبی پیش‌بینی می‌نماید. البته دقت مدل در ناحیه خارجی جریان بیشتر بوده که این امر، همان‌گونه که اشاره شد، مورد انتظار بوده و دلیل آن، در نظر گرفتن فرضیات مربوط به ناحیه خارجی جریان در ایجاد مدل است.

جدول (۴) مقادیر RMSE محاسبه شده برای پروفیل‌های سرعت به دست آمده از مدل پیشنهادی در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده در کانال‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. با نگاه به (جدول ۴) مشاهده می‌شود که کمترین خطا مربوط به مقایسه نتایج به دست آمده از مدل با داده‌های آزمایشگاهی تومیناگا و همکاران [۳۴] است؛ همچنین در سایر داده‌های استفاده شده نیز میزان خطا کوچک است، که این مسأله نشان می‌دهد در تمام موارد هماهنگی خوبی میان توزیع سرعت به دست آمده از مدل با نتایج اندازه‌گیری شده وجود دارد.

جدول (۵) RMSE محاسبه شده برای پروفیل‌های سرعت به دست آمده از مدل پیشنهادی در کانال کردون بلو برای ترازهای مختلف آب و نسبت‌های ابعادی متفاوت

19/1 m	0.91 m	Water Level
1.47	1.92	Ratio of channel width to water depth
0.0321	0.0343	RMSE

Table 5- RMSE calculated for velocity profiles obtained from proposed model in Cordon Bleu channel, for different water levels and aspect ratios

۵- نتیجه‌گیری

یک معادله تحلیلی یک بعدی برای پیش‌بینی توزیع سرعت طولی در مقطع عرضی جریان آشفتنه و کاملاً توسعه یافته بر مبنای معادلات ناویر استوکس متوسط‌گیری شده رینولدز و یک معادله لزجت گردابی به دست آمده از آنالیز توزیع تنش برشی و یک تابع ویک^۴ اصلاحی ارائه شد که توانایی پدیده دیپ و گرادیان منفی سرعت در مجاورت سطح آزاد آب را داشته و موقعیت سرعت ماکزیمم و پدیده دیپ را نیز به طور مناسب و قابل قبولی پیش‌بینی می‌نماید. این مدل در مقایسه با بسیاری از روابط ارائه شده پیشین، به ویژه مدل‌های نیمه تحلیلی که نیاز به انتگرال‌گیری عددی دارند، ساده‌تر بوده و از دقت بیشتری نیز برخوردار است.

معادله پیشنهادی با پنج سری داده‌های به دست آمده از کانال‌های آزمایشگاهی و نیز داده‌های اندازه‌گیری شده در یک سایت واقعی کانال فاضلاب راستی‌آزمایی شد. نتایج به دست آمده نشان داد که توزیع سرعت به دست آمده از مدل پیشنهادی تقریباً در تمام موارد هماهنگی خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده از خود نشان می‌دهد؛ همچنین پدیده دیپ و گرادیان منفی سرعت در مجاورت سطح آب را نیز به شکل قابل قبولی نشان داده و مکان پدیده دیپ سرعت را نیز به خوبی پیش‌بینی می‌نماید. نکته قابل توجه این است که با وجود اینکه مدل پیشنهادی اساساً برای ناحیه خارجی جریان ارائه شده است، اما در بیشتر موارد در ناحیه داخلی نیز با

کناری، پروفیل سرعت توصیف مناسبی از توزیع سرعت در کانال داشته و با داده‌های اندازه‌گیری شده هماهنگی قابل قبولی دارد. در فواصل نزدیک به دیواره سمت راست کانال ($Z=1.5m$ و $Z=1.3m$)، در ناحیه داخلی جریان مقداری انحراف از داده‌های اندازه‌گیری شده وجود دارد که دلیل آن را می‌توان جریان‌های ثانویه ناشی از افزایش تراز آب و نوسان‌های به دست آمده در اثر تبدیل مقطع به مقطع مرکب عنوان نمود [۴۴]. البته در این تراز (۰/۹۱ متری)، سطح آب در مرز سکوی کناری مقطع کانال قرار داشته و هنوز مقطع به طور کامل به مقطع مرکب تبدیل نشده است. اما در تراز ۱/۱۹ متر مقطع کانال کاملاً به مقطع مرکب تبدیل شده و جریان‌های ثانویه قوی در کناره دیواره‌های کانال وجود دارد. بنابراین در کنار جداره سمت راست مقطع ($Z=1.5m$) و به ویژه در ناحیه داخلی جریان، پروفیل سرعت محاسبه شده مقداری انحراف نسبت به داده‌های اندازه‌گیری شده از خود نشان می‌دهد. علت دیگر این مسأله را می‌توان عدم دقت کافی در اندازه‌گیری سرعت در کانال به دلیل دشواری‌های موجود در اندازه‌گیری در شرایط افزایش تراز آب و وجود جریان‌های ثانویه قوی دانست [۳۵]. نتایج حاکی از آن است که در این شرایط هماهنگی مطلوبی میان توزیع سرعت محاسبه شده از مدل پیشنهادی با نتایج اندازه‌گیری شده وجود دارد و گرادیان منفی سرعت در نزدیکی سطح آب و نیز پدیده دیپ و محل وقوع سرعت ماکزیمم به خوبی به وسیله مدل پیشنهادی پیش‌بینی شده است. همچنین در این حالت، سرعت ماکزیمم نسبت به شرایط ترازهای آب پایین‌تر، در موقعیت عمیق‌تری واقع شده و پدیده دیپ بیشتر نمایان می‌شود. جدول (۵) مقادیر RMSE را برای پروفیل‌های سرعت محاسبه شده به وسیله مدل پیشنهادی در مقایسه با سرعت‌های اندازه‌گیری شده در کانال کردون بلو را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از جدول (۵) پیداست، مقایسه نتایج مدل با داده‌های سرعت اندازه‌گیری شده در هر دو عمق متوسط و زیاد خطای ناچیزی به دست می‌دهد.

آمده از این مدل بتواند به طور دقیق‌تری پروفیل سرعت طولی را در مقطع کانال پیش‌بینی نماید.

References

۶- مراجع

- [1] Nezu I. & Rodi, W. 1985 *Experimental study on secondary currents in open channel flow*, Proc. 21st congress of IAHR, Melbourne, 115-119.
- [2] González J. A., Melching, C. S. & Oberg, K. A. 1996 *Analysis of open-channel velocity measurements collected with an acoustic Doppler current profiler*, the 1st International Conference on New/Emerging Concepts for Rivers, the International Water Resources Association, Chicago, Illinois, USA.
- [3] Nikuradse J. 1950 (Translated from German 1933). *Laws of turbulent research*, NACA Tech. Memorandum 1292 Nov.
- [4] Coles D. 1956 The law of the wake in the turbulent boundary layer, *J. Fluid Mech.*, **1**, 191-226.
- [5] Nezu I. & Nakagawa H. 1993 *Turbulent open-channel flows*, IAHR Monograph, CRC Press, Balkema, Rotterdam.
- [6] Bonakdari H., Larrarte, F., Lassabatere L. & Jonnis C. 2008 Turbulent velocity profile in fully-developed open channel flows, *J. Environ Fluid Mechanics*, **8**(1), 1-17.
- [7] Sarma K. V. N., Lakshminarayana P. & Rao N.S.L. 1983 Velocity distribution in smooth rectangular open channels. *J. Hydraul. Eng.*, **109**(2), 270-289.
- [8] Sarma K.V.N., Prasad B.V.R., & Sarma A.K. 2000 Detailed study of binary law for open channels. *J. Hydraulic Eng.* **126**(3), 210-214.
- [9] Chiu C. L. 1987 Entropy and probability concepts in hydraulics, *J. Hydraul. Eng.*, **113**(5), 583-600.
- [10] Chiu C. L., & Hsu S. M. 2006 Probabilistic approach to modeling of velocity distributions in fluid flows, *J. Hydrol.*, **316**(1-4), 28-42.
- [11] Cardoso A. H., Graf W. H. & Gust, G. 1989 Uniform flow in a smooth open channel. *J. Hydraul. Res.*, **27**(5), 603-616.
- [12] Kironoto B. A., & Graf W. H. 1994 Turbulence characteristics in rough uniform open channel flow. Proc. Inst. Civ. Eng. *Water Marit. Energy*, **106**, 333-334.
- [13] Wang X., Wang Z. Y., Yu M. & Li D. 2001 Velocity profile of sediment suspensions and comparison of log law and wake law. *J. Hydraul. Res.*, **39**(2), 211-217.
- [14] Guo J. & Julien P. Y. 2001 Turbulent Velocity Profiles in Sediment-Laden Flows, *J. Hydraul. Res.*, **39**(1), 11-23.
- [15] Guo J. & Julien P. Y. 2008 Application of the Modified Log-Wake Law in Open-Channels, *J. Appl. Fluid Mech.*, **1**(2), 17-23.
- [16] Yang S.Q., Tan S.K., Lim S.Y. 2004 Velocity distribution and dip-phenomenon in smooth uniform

داده‌های اندازه‌گیری شده در کانال تطبیق خوبی داشته و در سرتاسر عمق کانال توصیف خوبی از توزیع سرعت در مقطع عرضی و پدیده دیپ سرعت ارائه می‌دهد. خطای به دست آمده در هر مورد محاسبه شد که نتایج نشان از دقت بالای مدل در برآورد پروفیل توزیع سرعت در کانال‌های مختلف واقعی و آزمایشگاهی داشت. همچنین پارامتر کولز که در مدل پیشنهادی نقش قابل توجهی بر میزان و چگونگی وقوع پدیده دیپ سرعت در کانال کم‌عرض دارد، مطالعه و بررسی شد، بررسی‌ها نشان داد که با افزایش مقدار پارامتر کولز، مقدار سرعت در ناحیه میانی و در مجاورت سطح آب بیشتر برآورد شده و موقعیت سرعت ماکزیمم بیشتر در عمق آب فرو رفته و پدیده دیپ بهتر نمایش داده می‌شود. مقدار پارامتر کولز بر اساس مدل پیشنهادی، از طریق برازش به دست آمد و مقادیری از این پارامتر که به ازای آنها، کمترین میزان خطا در برآورد پروفیل سرعت از معادله پیشنهادی به دست می‌آید، برای کانال‌های مختلف بررسی ارائه شد. نتایج نشان داد که مقدار پارامتر کولز در شرایط کانال فاضلاب کمتر از مقدار این پارامتر در شرایط کانال‌های آزمایشگاهی برآورد می‌شود. مدل پیشنهادی توزیع سرعت یک رابطه کاملاً تحلیلی بوده که استفاده از آن نسبت به سایر مدل‌های مشابه نیمه تحلیلی، ساده‌تر، و از نظر زمان نیز به صرفه است. در ایجاد این مدل تلاش شده که کمترین تعداد پارامترها به کار گرفته شود، و برآورد این تعداد پارامترها نیز ساده بوده و از پیچیدگی زیادی برخوردار نیست؛ اما با این وجود، تخمین دقیق این پارامترها مشکل بوده و تفاوت اندک در محاسبه این پارامترها می‌تواند به عدم دقت کافی در برآورد توزیع سرعت منجر شود. بنابراین جا دارد که در مدل‌هایی که در آینده در این زمینه توسعه می‌یابد، تعداد پارامترهای کمتری لحاظ شود. در مجموع، مزیت مدل پیشنهادی توزیع سرعت نسبت به سایر مدل‌های مشابه این است که علاوه بر معتبر بودن آن در هر دو دسته کانال‌های عریض و کم‌عرض و توانایی توصیف پدیده دیپ، به دلیل استفاده از رابطه‌ای با دقت بالاتر برای لزجت گردابی نسبت به پروفیل معمول سهموی استفاده شده در بیشتر مدل‌ها، انتظار می‌رود که توزیع سرعت به دست

- [32] Lyn D. A. 1986 *Turbulence and Turbulent Transport in Sediment-Laden Open-Channel Flows*, Ph.D Thesis, California Inst. Technol., Pasadena, CA.
- [33] Wang X. & Qian N. 1989 Turbulence Characteristics of Sediment-Laden flows, *J. Hydraul. Eng.*, **115**(6), 781- 799.
- [34] Tominaga A., Nezu I. Ezaki K. & Nakagawa H. 1989, Three dimensional turbulent structure in straight open channel flows, *J. Hydraulic Research*, **27**(1), 149-173.
- [35] Larrarte F. 2006 Velocity fields within sewers: An experimental study, *Flow Measurement and Instrumentation*, **17**, 282-290.
- [36] Tracy H.J. 1965 Turbulent flow in a three-dimensional channel, *J. Hydraul. Eng.*, **27**(1).
- [37] Rodi W. 1993 *Turbulence Models and Their Application in Hydraulics, a State of the Art Review*. 3rd Edn., A.A. Balkema, Rotterdam.
- [38] Grass A. J. 1971 Structural features of turbulent flow over smooth and rough boundaries, *J. Fluid Mech.*, **50**, 233-255.
- [39] Boussinesq J. 1877 Essai Sur la Theorie des Eaux Courantes (Essay on wave thory), Mem Pres, *International Journal of Academic Science*, **23**, 46-46.
- [40] Jaumouillie P. 2003 *Heterogeneites des vitesses et des concentration dans les colecteurs d'assainissement: application a la mesure des flux polluants (Heterogeneities of velocities and concentration in sanitation collectors: application to the measurement of pollutant fluxes)*. Ph.D. thesis, Bordeaux 1 University, France.
- [41] Coleman, N. L. 1981 Velocity profiles with suspended sediment. *Journal of Hydraulic Research* **19**(3), 211–229.
- [42] Kirkgoz S. 1989 Turbulent velocity profiles for smooth and rough open-channel flow. *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, **115**(11), 1543-1561.
- [43] Li X., Dong Z., Chen C. 1995 Turbulent flows in smooth-wall open channels with different slope *J. Hydraulic Res.* **33**(3), 333-347.
- [44] Kirkgoz M. S. & Ardiclioglu M. 1997 Velocity profiles for smooth and rough channel flow, *J. Hydraul. Eng.*, **123**(12), 1099-1105.
- open channel flows. *J. Hydraulic Eng.* **130**(12), 1179-1186.
- [17] Yang S.Q., Lim S. Y. & McCorquodale J. A. 2005 Investigation of near wall velocity in 3-D smooth channel flows. *J. Hydraul. Res.*, **43**(2), 149-157.
- [18] Bonakdari H. 2006 *Flow modeling in manifold sanitation-application design points quantity monitoring*. Ph.D. Thesis, University of Caen-Basse Normandie, France (In French).
- [19] Bonakdari H. 2007 *Velocity profile in turbulent boundary layers*, 32nd Congress of IAHR, the International Association of Hydraulic Engineering & Research, July 1-6 Venice, Italy.
- [20] Bonakdari H. 2009 Numerical and Experimental study of velocity profiles in sewers, *World Applied Science Journal*, **7**(6), 735-743.
- [21] Absi R. 2008 Comments on “Turbulent velocity profile in fully-developed open channel flows”. *Environ. Fluid Mech.* **8**(4), 389-394.
- [22] Absi R. 2011 An Ordinary Differential Equation for Velocity Distribution and Dip-Phenomenon in Open Channel Flows, *J. Hydraul. Res.*, **49**(1), 82-89.
- [23] Pu J. H., Bonakdari H., Lassabatere L., Joanns C, & Larrarte F. 2010, Profil de vitesses turbulent: une nouvelle loi pour les canaux etroits (Turbulent velocity profile: a new law for narrow channels), *La hoille Blanche (International Water Journal)*, **3**, 65-70.
- [24] Moazzamnia M. & Bonakdari H. 2012 *Using entropy theory in calculating velocity distribution in sewer channels*, national conference on water and sewer, Kashan, Iran.
- [25] Kundu S. & Ghoshal K. 2012 An Analytical Model for Velocity Distribution and Dip-Phenomenon in Uniform Open Channel Flows, *International Journal of Fluid Mech. Research*, **39**(5), 381-395.
- [26] Bonakdari H. & Ahadi, M.S. 2013 Comparison of Different Models for Evaluating the Velocity Profiles in Narrow Sewers, *Journal of Basic and Applied Scientific Research.*, **3**(12), 273–288.
- [27] Lassabatere L., Pu J., Bonakdari H., Joannis C. & Larrarte F. 2013 Velocity Distribution in Open Channel Flows: Analytical Approach for the Outer Region, *J. Hydraulic Engineering, ASCE*, **139**(1), 37–43.
- [28] Cui H. & Singh V. P. 2013 Two-dimensional velocity distribution in open channels using the Tsallis entropy. *J. Hydrologic Engineering, ASCE*, **18**, 331-339.
- [29] Alfadhli I., Yang S. Q. & Sivakumar M. 2013 *Velocity distribution in non-uniform/unsteady flows and the validity of log law*, 13th International Multidisciplinary Scientific Geo-conference, Bulgaria: SGEM, 425-432.
- [30] Nezu I. & Rodi W. 1986 Open channel flow measurements with a Laser Dropper Anemometer., *J. Hydraul. Eng.*, **112**, 335-355.
- [31] Coleman N. L. 1986 Effects of suspended sediment on the open-channel velocity distribution, *Water Resour. Res.*, **22**(10), 1377-1384.

Introducing One-Dimensional Model to Estimate Velocity Distribution in Narrow Open-Channels

N. Binesh¹, H. Bonakdari^{2*}

1. Ph.D. Student, Water Resources Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

2. Professor, Department of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

bonakdari@yahoo.com

Abstract:

Determining the velocity distribution -as a key parameter for estimating other hydraulic parameters- has been always of interest. Velocity distribution in the inner region of the flow ($y < 0.2D$ where y is the vertical distance from the bed and D is the flow depth) is well described by the logarithmic law. However, this law deviates from the experimental data in the outer region ($y > 0.2D$). The log-Wake law is among the most accepted laws for determining the velocity distribution in wide open channels. The law modifies the logarithmic law by adding a Wake function; but in the case of narrow open channels, it deviates from the measured data near the free surface. Distribution profile derived by the log-Wake law depicts the velocity which increases monotonically with increase of the distance from the bed. Thus, it is not capable to show the negative gradient of velocity near the free surface which happens in narrow open channels. In narrow open channels, the three dimensional structure of the flow and the transport momentum from the side walls to the central zone -due to strong secondary currents- will cause the maximum velocity to occur below the water surface. This is called velocity-dip phenomenon which -for the first time- is reported more than a century ago. Since that time, numerous investigations have been conducted by many researchers in order to propose new models; not only for describing the dip phenomenon and negative gradient of velocity near the free surface, but also to predict the position of the maximum velocity accurately and to converge the experimental data throughout the whole flow depth.

This paper introduces an analytical model based on Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) equations and an eddy viscosity distribution, to estimate velocity distribution in turbulent fully-developed flows. The proposed model is suitable for both narrow and wide open channels and is capable of predicting the dip phenomenon. The numerical results are verified with experimental data measured in several rectangular lab channels and data collected from an actual sewer channel. Since the proposed equation for velocity distribution is dependent on Coles Wake parameter (Π), the effect of this parameter has been studied on the level of accuracy and description of velocity profile as well as prediction of dip phenomenon and location of maximum velocity. Many researchers have proposed different values for Coles Wake parameter. Thus, seemingly there is no universal constant value for this parameter. In this study, the value of Coles Wake parameter is proposed using data from different channels, based on the least error calculated in predicting the velocity profiles by the proposed model. The results show that the profiles derived by the model agreeably match with experimental data, and predict the velocity-dip phenomenon. The model also contains few errors in comparison with the data measured in the channels. This shows a high level of accuracy in defining velocity distribution profile of the flow. The value of Coles Wake parameter estimated for channel-sewer is less than that for lab channels.

Keywords: velocity distribution, eddy viscosity, Coles Wake parameter