مجله علمی – پژوهشی مهندسی عمران مدرس دوره شانزدهم، شماره ۵، ویژه نامه سال ۱۳۹۵



# ارائه مدل یک بعدی برای برآورد توزیع سرعت درکانال روباز کمعرض

نگین بینش<sup>۱</sup>، حسین بنکداری<sup>\*۲</sup>

۱. دانشجوی دکترای مهندسی محیط زیست- منابع آب، دانشگاه تهران ۲. استاد گروه مهندسی عمران، دانشگاه رازی کرمانشاه

bonakdari@yahoo.com

تاريخ پذيرش: [١٣٩٤/١٠/٢٧]

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 کاملا توسعه یافته، بر مبنای معادلات میانگین گیری 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 اندازه گیری 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 ته پارامتر کولز، تأثیر این پارامتر بر میزان دقت در توصیف پروفیل سرعت و پیش بینی محل وقوع سرعت ماکزیمم نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. در سرعت ارائه می دهد، پیشنهاد شده است. نوی یا سرعت و پیش بینی محل وقوع سرعت ماکزیمم نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. در سرعت ارائه می دهد، پیشنهاد شده است. نوی به دست آمده و مقادیری که به ازای آن، مدل پیشنهادی کمترین میزان خطا را در برآورد پروفیل سرعت ارائه می دهد، پیشنهاد شده است. نتایج نشان می دهد که پروفیل هرعت به دست آمده از مدل پیشنهادی هماهنگی بالایی با دادههای اندازه گیری شده داشته و گرادیان منفی سرعت در نزدیکی سطح آزاد آب را به خوبی نشان می دهد. مقدار پارامتر کولز برای کانال فاضلاب کمتر از مقدار این پارامتر برای کانالهای آزمایشگاهی به دست آمد.

**واژگان كليدى:** توزيع سرعت، لزجت گردابى، پارامتر كولز

تاریخ دریافت: [۱۳۹٤/۲/۱۱]

۱- مقدمه

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 اندازه گیری 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  $\frac{B}{D} = {}_{A_r}$  (که B عرض کانال و D عمق

جریان است)، بستگی دارد. بر اساس این نسبت ابعادی، یک کانال می تواند در دسته کانالهای کم عرض یا عریض طبقه بندی شود. در کانالهای کم عرض، نسبت ابعادی عرض کانال به عمق جریان تقریباً کوچکتر یا مساوی ٥ است. در این کانالها جریانهای ثانویه ایجاد شده به دلیل آثار دیوارههای جانبی سبب می شود که گرادیان منفی سرعت در نزدیکی سطح آزاد اتفاق بیافتد و سرعت ماکزیمم زیر سطح آزاد آب

<sup>1</sup> Reynolds Averaged Navier-Stokes

رخ دهد، که پدیده دیپ سرعت' نامیده می شود. 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 می دهد [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 خارجي ( y ≤ D ) که y فاصله عمودي از بستر کانال و D عمق جریان است) را به خوبی پیش بینی نماید. بنابراین کولز [٤] با ایجاد اصلاحاتی در قانون لگاریتمی، مدل جدیدی که به قانون ویک کولز ٔ مشهور است، را پیشنهاد داد. در جریانهای دو بعدی در کانالهای باز، می توان مدل پیشنهادی کولز را از جمله منطقی ترین تعمیمها برای قانون لگاریتمی در نظر گرفت [٥]. اما در کانالهای کمعرض با نسبت ابعادی کمتر از ٥، قانون کولز نمی تواند رفتار جریان و پديده ديپ راتوصيف نمايد، چرا كه تنها قادر به پيشبيني توزيع سرعتي است كه با افزايش فاصله از بستر كانال، با شیب مثبت تا سطح آب افزایش می یابد [٦]. بنابراین پیش بینی دقیق پدیده دیپ سرعت، نیازمند مدلهای آشفتگی غیر ایزوتروپیک بر مبنای تجزیه و تحلیل معادلات ناویر استوکس متوسط گیری شده رینولدز است. در این رابطه میتوان از مدلهای آشفتگی یا روابط تجربی یا تحلیلی برای پیش بینی پديده ديپ و موقعيت سرعت ماكزيمم در كاربردهاي مهندسی استفاده نمود. تاکنون پژوهشگران بسیاری روی اعتبار قوانین یاد شده بررسی هایی صورت داده و اصلاحاتی را در رابطه با قانون لگاریتمی و قانون ویک کولز به منظور نمایش پديده ديپ انجام دادهاند، و مدلهايي را ارائه نمودهاند كه توانایی پیش بینی این پدیده و توصیف گرادیان منفی سرعت در نزدیکی سطح آب در کانالهای روباز کمعرض را داشته باشد، از قبيل: سارما و همكاران [٧، ٨]، چيو [٩]، چيو و هسو [۱۰]، کاردوسو و همکاران [۱۱]، کیرونوتو و گرف[۱۲]، ونگ و همکاران[۱۳]، گوئو و ژولین [۱٤]، [۱۵]، یانگ و

34

نگین بینش و حسین بنکداری

همکاران [۲۱، ۱۲]، بنکداری [۱۸–۲۰]، ابسی [۲۱، ۲۲]، پو و همکاران [۲۳]، معظم نیا و بنکداری [۲٤]، کندو و قوشال [۲۵]، بنکداری و احدی [۲٦]، لاساباتاره و همکاران [۲۷]، کوی و سینق [۲۸]، الفضلی و همکاران [۲۹]. نزو و رودی کوی و سینق [۲۸]، الفضلی و همکاران [۲۹]. نزو و رودی نود و سینق المای و قوشال [۲۵] به معرفی معادلهای جدید برای آن مبادرت ورزیدند.

قانون لگاریتمی به خوبی توزیع سرعت در ناحیه داخلی نزدیک به جداره ( (2 - 0.2 D) ) را بیان می کند [ $\Gamma$ ]، 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 اندازه گیری شده در این ناحیه و نزدیک سطح آب داشته باشد. بر این اساس در این مقاله، با استفاده از معادلات ناویر استوکس متوسط گیری شده رینولدز و رابطه لزجت گردابی ارائه شده به وسیلهی کندو و قوشال و رابطه لزجت گردابی ارائه شده به وسیلهی کندو و قوشال میشود که توانایی توصیف پدیده دیپ را دارا بوده و پروفیل سرعت را در کانالهای کمعرض و عریض به خوبی پیش بینی میناید. همچنین به دلیل وابسته بودن مدل به پارامتر کولز ( $\Pi$ )، 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 می پردازیم. فرضیات در نظر گرفته شده در رسیدن به این مدل به این شرح است که در تشریح مدل نیز به طور دقیق تر 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، چشم پوشی می شود. ۳) معادله پیشنهادی برای ناحیه خارجی جریان به دست آمده است. و ٤) از اثر لزجت در ناحیه خارجی جریان، به دلیل ناچیز بودن، چشم پوشی شده است.

<sup>1</sup> velocity-dip-phenomenon

<sup>2</sup> Coles Wake Law

### مجله علمی – پژوهشی مهندسی عمران مدرس

دوره شانزدهم / شماره ٥ / ویژه نامه سال ۱۳۹۵

ترم  $(v \frac{dU}{dy})_{(v)}$  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 y، اثر این  $(v \frac{dU}{dy})_{(v)}$ ، اثر این ترم ناچیز بوده و قابل مقاد (x) به صورت زیر در  $(0 \ge v_{(v)})_{(v)}$ 

$$-VU_{(y)} = (uv)_{(y)} + g \sin \theta (D - y)$$
 (0)

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

$$-(\overline{uv}) = v_{t} \frac{dU}{dy}$$
(7)

که در آن ، ۷ بیانگر لزجت گردابی است. تاکنون روابط مختلفی برای لزجت گردابی ارائه شده است؛ از جمله این روابط، معادله ارائه شده به وسیلهی کندو و قوشال [۲۵] به صورت زیر است:

$$\frac{v_{t}}{u_{*}D} = \kappa (1 - \xi) \left[ \frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi (1 - \xi) \right]^{-1}$$
(V)  

$$\tau_{b} \quad (u_{*} = \sqrt{\tau_{b} / \rho} \quad u_{!} \quad u_{!} \quad u_{!} = \sqrt{\tau_{b} / \rho} \quad z_{!} \quad z_{!}$$

منظور رسیدن به رابطهای جدید برای توزیع سرعت، باجایگذاری معادله (۷) به جای لزجت گردابی در رابطه (٦) داریم:

(A)  

$$\frac{dU}{dy} = \frac{\kappa u \cdot D (1 - \xi)}{\left[\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi)\right]} \cdot \frac{dU}{dy} = (\Lambda)$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi(1 - \xi) \cdot \frac{1}{\xi}$$

$$\frac{1}{\xi} + 12 \prod$$

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

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

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

$$\frac{\partial U}{\partial t} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} =$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + v \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + v \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} - \frac{\partial \overline{uv}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{uw}}{\partial z} + g \sin \theta$$
(1)

که U، V و W به ترتیب مولفه های سرعت در امتدادهای طولی، قائم و عرضی است. همچنین u، V، و W مولفه های نوسانی سرعت در امتدادهای طولی، قائم و عرضی هستند، و v لنوسانی سرعت در امتدادهای طولی، قائم و عرضی هستند، و v لنرجت سینماتیک سیال، P فشار،  $\theta$  زاویه بستر کانال نسبت به افق، g شتاب ثقل و q چگالی سیال است. با فرض جریان دائمی و یکنواخت ( $0 = \frac{6}{\delta t} = \frac{6}{t}$ ) با سطح آزاد ( $0 = \frac{A}{\delta t}$ )، و نیز با توجه به اینکه در ناحیه مرکزی کانال میزان گرادیان در امتداد قائم بسیار بیشتر از گرادیان در امتداد عرضی ( $\frac{6}{\delta t} < \frac{6}{t}$ ) است و میتوان از تغییرات سرعت در میتا جهت عرضی مقطع جریان چشم پوشی کرد [T, T]، رابطه جهت عرضی مقطع جریان چشم پوشی کرد [T, T]، رابطه (1) به صورت ساده شده زیر در میآید:

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

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

$$VU_{(D)} - VU_{(y)} = [(v \frac{dU}{dy})_{(D)} - (v \frac{dU}{dy})_{(y)}]$$
  
-  $[(\overline{uv})_{(D)} - (\overline{uv})_{(y)}] + g \sin \theta (D - y)$  (r)

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

$$-VU_{(y)} = -(v \frac{dU}{dy})_{(y)} + (uv)_{(y)} + g \sin \theta (D - y) \quad (\xi)$$

ترم سمت چپ معادله فوق منعکس کننده اثر جریانهای ثانویه است یانگ و همکاران [۱٦] رابطه (۱۰) را برای برآورد این ترم ارائه دادند:

$$\frac{VU_{(y)}}{u_*^2} = -\beta \frac{y}{D}$$
(1.)

$$\frac{1}{u_{*}} \cdot \frac{dU}{dy} = \frac{-\beta\xi \left[\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi (1 - \xi)\right]}{\kappa D (1 - \xi)}$$

$$+ \frac{g \sin \theta \left[\frac{1}{\xi} + 12 \prod \xi (1 - \xi)\right]}{\kappa u_{*}^{2}}$$
(11)

معادله فوق را همچنین می توان به صورت رابطه (۱۲) نیز بیان نمود:

$$\frac{dU_{a}}{d\xi} = \frac{-\beta \left[1 + 12 \prod \xi^{2} (1 - \xi)\right]}{\kappa (1 - \xi)} + \frac{gD \sin \theta}{\kappa u_{*}^{2} \xi} \qquad (17)$$
$$+ \frac{12 \prod gD \sin(\theta) \xi (1 - \xi)}{\kappa u_{*}^{2}}$$

$$\begin{split} & \sum_{a} \frac{g D \sin \theta}{u_{*}^{2}} = \frac{g D \sin \theta}{u_{*}^{2}} + c \quad \text{if } \alpha \in \frac{1}{2} \quad \alpha \in \mathbb{R} \\ & u_{*} = \frac{1}{2} \\ & u_{*} =$$

$$\frac{U}{u_*} = \frac{\alpha}{\kappa} \ln(\frac{\xi}{\xi_0}) + \frac{\beta}{\kappa} \ln(1-\xi)$$
(17)  
+  $\frac{2\Pi}{\kappa} [3\alpha\xi^2 - 2\alpha\xi^3 - 2\beta\xi^3]$   
[ $\epsilon + \frac{2}{\kappa} [3\alpha\xi^2 - 2\alpha\xi^2 - 2\alpha\xi^2 - 2\beta\xi^3]$   
[ $\epsilon + \frac{2}{\kappa} [3\alpha\xi^2 - 2\alpha\xi^2 - 2\alpha\xi^2 - 2\beta\xi^3]$   
[ $\epsilon + \frac{2}{\kappa} [3\alpha\xi^2 - 2\alpha\xi^2 - 2\beta\xi^3]$ ]  
[ $\epsilon + \frac{2}{\kappa} [3\alpha\xi^2 - 2\alpha\xi^2 - 2\beta\xi^3]$   
[ $\epsilon + \frac{2}{\kappa} [3\alpha\xi^2 - 2\beta\xi^3]$ ]  
[ $\epsilon + \frac{2}{\kappa} [3\alpha\xi^3 - 2\beta\xi^3]$ ]  
[ $\epsilon + \frac{2}{\kappa} [3\alpha\xi$ 

نگین بینش و حسین بنکداری

دارای معنای فیزیکی بوده که بر اساس مشخصات کانال و شرایط هیدرولیکی جریان به دست می آید. ترم اول معادله (۱۳)، بیانگر قانون لگاریتمی است؛ ترم دوم در ناحیه خارجی نقش مهمی را ایفا می کند، اما این ترم در ناحیه داخلی با توجه به اینکه  $0 \approx (\frac{y}{D} - 1)$  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 می شود. اگر ثابت کولز صفر باشد، معادله فوق به مدل یانگ و همکاران [17] اول دارد. پارامتر  $\beta$  ضریب اصلاحی قانون لگاریتمی برای نمایش پدیده دیپ است و به محل وقوع سرعت ماکزیمم پرای مربط است. ایسی [27] رابطه (۱۶) را برای محاسبه این

$$\beta = \frac{1}{\xi_{dip}} - 1 \tag{12}$$

 $_{\rm dip}$  فاصله بی بعد شده از بستر کانال است که در آنجا سرعت ماکزیمم اتفاق می افتد. لازم به گفتن است که برای کانال های روباز عریض که 5 < A است،  $\beta$  به سمت صفر میل می کند ( 0  $\leftarrow \beta$ ) و مدل پیشنهادی به شکل ساده تری در می آید. بنابراین معادله (۱۳) می تواند توزیع سرعت طولی جریان برای ناحیه خارجی جریان در کانال های روباز کم عرض و عریض را به خوبی توصیف نماید.

## ۳- دادههای میدانی به کارگیری شده در پژوهش

## ۳-۱- داده های مربوط به کانال های آزمایشگاهی

داده های کولمن [۳۱]، لین [۳۲]، ونگ و کیان [۳۳]، و کیرونو تو و گرف [۱۲] به منظور راستی آزمایی نتایج به دست آمده از مدل های بررسی شده استفاده شده است. در تمام موارد، داده های آزمایشگاهی بر اساس شرایط کانال روباز کم عرض و جداره های صاف به دست آمده اند. برخی مشخصات و مقادیر پارامتر های استفاده شده در این اندازه گیری ها در (جدول ۱) ارائه شده است.

جدول(۱) مقادیر پارامترهای مورد استفاده در اندازهگیری دادههای آزمایشگاهی								
П (Coles parameter)	K (Von Karman Constant)	<i>u</i> <sub>*</sub> (cm/s)	U <sub>max</sub> (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]		

دوره شانزدهم / شماره ٥ / ویژه نامه سال ۱۳۹۵

مجله علمي – پژوهشي مهندسي عمران مدرس

Table 1- Values of used parameters for measuring lab data

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

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	П

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

# ٤- تحليل نتايج ٤- واسنجى مدل

از جمله پارامترهای موجود در معادله پیشنهادی برای توزیع سرعت (معادله ۱٤)، 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 پارامتر کولز قابل معادف مقادیر متفاوتی را برای ثابت رای (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 نشان داد که با افزایش مقدار پارامتر کولز، لزجت گردابی در همچنین دادههای اندازه گیری شده تومیناگا و همکاران [۳۲] در یک کانال آزمایشگاهی برای راستی آزمایی 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، ٤۰ سانتی متر، و ٤٠ سانتی متر است. جدارهها از شیشه ساخته شده و جنس بستر کانال آهن رنگ آمیزی شده، و جریان کاملا توسعه یافته و یکنواخت در ۷/۷ متری پایین دست ورودی کانال برقرار شده است.

۲-۳- داده های اندازه گیری شده در کانال فاضلاب

دادههای اندازه گیری شده در سایت میدانی واقعی کردون بلو<sup>۳</sup> 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 <sup>2</sup>01 و عدد فرود بین ۲/۰ و ۳/۰ برای تمام شرایط هیدرولیکی است. شیب طولی ۲۰۰۰۶ و ضریب زبری مانینگ ۲۰۱۶ است

37

<sup>3</sup> Cordon Bleu

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

در این مطالعه نیز با برازش بهترین منحنی عبوری از میان نقاط نمودار خطای محاسباتی بر اساس معادله توزیع سرعت پیشنهادی معادله (۱٤) 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 ۲۵/۰ 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 می شود، مقدار پارامتر کولز (Π) 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.

۲-۴- 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 ۱٤) 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 می شود. لازم به گفتن است که آنالیز حساسیت در مورد سایر پارامترها نیز صورت گرفت که نتایج بیانگر این

نگین بینش و حسین بنکداری

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

## ۴–۳– راستی آزمایی 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 [۳٤] و نیز دادههای اندازه گیری شده در کانال فاضلاب کردون بلو برای Zهای مختلف (z فاصله جانبی از دیواره کناری کانال است) در دو تراز آب ۹۱/۰۱ 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 راستی آزمایی نتایج به دست آمده از مدل، در شرایط کانال های کمعرض (نسبت ابعادی کمتر از ٥) 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).



شکل (۱) توزیع سرعت در کانال مستطیلی تومیناگا و همکاران [۳٤]

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

جدول (٤) RMSE محاسبه شده برای پروفیل های به دست آمده از مدل پیشنهادی در مقایسه با دادههای جمع آوری شده در کانال های

گاهی	مايشاً	آزه
-		

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 پروفیل های سرعت پیش بینی شده به وسیله ی مدل پیشنهادی با داده های اندازه گیری شده در کانال فاضلاب پروفیل های توزیع سرعت به دست آمده از مدل پیشنهادی با داده های جمع آوری شده در سایت واقعی کانال فاضلاب [۳۵] برای دو تراز آب ۰/۹۱ متر و ۱/۱ متر مقایسه شده است. در هر مورد، شش فاصله جانبی مختلف از دیواره سمت چپ کانال، از ۰/۰ متر تا ۰/۱ 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 اندازه گیری شده در کانال تومیناگا و همکاران [۳٤] نشان میدهد. در این مورد نیز مشاهده می شود که نتایج به دست آمده از مدل، هماهنگی قابل قبولی با دادههای اندازه گیری شده نشان داده و در نمایش گرادیان منفی سرعت در نزدیکی سطح آب موفق عمل کرده و موقعیت پدیده دیپ را به خوبی پیشبینی می نماید. البته دقت مدل در ناحیه خارجی جریان بیشتر بوده که این امر، همان گونه که اشاره شد، مورد انتظار بوده و دلیل آن، در نظر گرفتن فرضیات مربوط به ناحیه خارجی جریان در ایجاد مدل است.

جدول (٤) مقادیر RMSE محاسبه شده برای پروفیلهای سرعت به دست آمده از مدل پیشنهادی در مقایسه با دادههای اندازه گیری شده در کانالهای آزمایشگاهی را نشان میدهد. با نگاه به (جدول ٤) مشاهده می شود که کمترین خطا مربوط به مقایسه نتایج به دست آمده از مدل با دادههای آزمایشگاهی به مقایسه نتایج به دست آمده از مدل با دادههای آزمایشگاهی استفاده شده نیز میزان (۳2] است؛ همچنین در سایر دادههای استفاده شده نیز میزان خطا کوچک است، که این مسأله نشان می دهد در تمام موارد هماهنگی خوبی میان توزیع سرعت به دست آمده ازمدل با نتایج اندازگیری شده وجود دارد.

کناری، پروفیل سرعت توصیف مناسبی از توزیع سرعت در کانال داشته و با داده ای اندازه گیری شده هماهنگی قابل قبولی دارد. در فواصل نزدیک به دیواره سمت راست کانال (Z=1.3m) و Z=1.5m)، در ناحیه داخلی جریان مقداری انحراف از دادههای اندازه گیری شده وجود دارد که دلیل آن را می توان جریان های ثانویه ناشی از افزایش تراز آب و نوسانهای به دست آمده در اثر تبدیل مقطع به مقطع مرکب عنوان نمود [28]. 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 کاملا 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 سرعتِ محاسبه شده مقداری انحراف نسبت به دادههای اندازه گیری شده از خود نشان میدهد. علت دیگر این مسأله را می توان عدم دقت کافی در اندازهگیری سرعت در کانال به دلیل دشواریهای موجود در اندازه گیری در شرایط افزایش تراز آب و وجود جریان های 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 اندازه گیری شده وجود دارد و گرادیان منفی سرعت در نزدیکی سطح آب و نیز پدیده دیپ و محل وقوع سرعت ماکزیمم به خوبی به وسیلهی مدل پیشنهادی پیش بینی شده است. همچنین در این حالت، سرعت ماکزیمم نسبت به شرایط ترازهای آب پایینتر، در موقعیت عمیقتری واقع شده و پديده ديپ بيشتر نمايان مى شود. جدول (٥) مقادیر RMSE را برای پروفیل های سرعت محاسبه شده به وسیلهی مدل پیشنهادی در مقایسه با سرعتهای اندازهگیری شده در کانال کردون بلو را نشان میدهد. همانگونه که از جدول (٥) پیداست، مقایسه نتایج مدل با دادههای سرعت اندازه گیری شده در هر دو عمق متوسط و زیاد خطای ناچیزی به دست می دهد.

بنكدارى	حسين	و	بينش	نگين	

جدول (۵) RMSE محاسبه شده برای پروفیل های سرعت به دست آمده از مدل پیشنهادی در کانال کردون بلو برای ترازهای مختلف آب و نسبت های 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

٥- نتيجه گيري

یک معادله تحلیلی یک بعدی برای پیشبینی توزیع سرعت طولی در مقطع عرضی جریان آشفته و کاملا 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<sup>3</sup> 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 انتگرال گیری 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 راستی آزمایی 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 می دهد؛ 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 می نماید. 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

4 Wake Function

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

### References

٦- مراجع

[1] Nezu I. & Rodi, W. 1985 *Experimental study on secondary currents in open channel flow*, Proc. 21<sup>st</sup> 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 1<sup>st</sup> 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 openchannel 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 comparision of log law and wake law. *J. Hydral. 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 توصيف خوبي از توزيع سرعت در مقطع عرضی و پدیده دیپ سرعت ارائه می دهد. 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 ییشنهادی نقش قابل توجهی بر میزان و چگونگی وقوع یدیده دیپ سرعت در کانال کمعرض دارد، مطالعه و بررسی شد. بررسی ها 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 يديده ديپ بهتر نمايش داده مي شود. مقدار يارامتر كولز 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 یارامتر کولز در شرایط کانال فاضلاب کمتر از مقدار این پارامتر در شرایط کانالهای آزمایشگاهی بر آورد می شود. مدل پیشنهادی توزیع سرعت یک رابطه کاملا تحلیلی بوده که استفاده از آن نسبت به سایر مدل های مشابه نیمه تحلیلی، سادهتر، و از نظر زمان نیز به صرفه است. در ایجاد این مدل تلاش شده که کمترین تعداد یارامترها به کار گرفته شود، و بر آورد این تعداد یارامترها نیز ساده بوده و از پیچیدگی زیادی برخوردار نيست؛ اما با اين وجود، تخمين دقيق اين يارامترها مشکل بوده و تفاوت اندک در محاسبه این پارامترها می تواند به عدم دقت کافی در برآورد توزیع سرعت منجر شود. بنابراین جا دارد که در مدلهایی که در آینده در این زمینه توسعه می یابد، تعداد یارامتر های 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

بنكدارى	حسين	و	بينش	نگين
---------	------	---	------	------

[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 threedimensional channel, J. Hydraul. Eng., 27,(1).

[37] Rodi W. 1993 *Turbulence Models and Their Application in Hydraulics, a State of the Art Review.* 3<sup>rd</sup> 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, 32<sup>nd</sup> Congress of IAHR, the International Association of Hydraulic Enginnering & 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, 13<sup>th</sup> 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. Binesh<sup>1</sup>, H. Bonakdari<sup>2\*</sup>

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 ( $\Pi$ ), 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