

مطالعه‌ی آزمایشگاهی اثر رسوبات درشت دانه کف کانال بر ضریب مقاومت جریان

محمد بهرامی یاراحمدی^{۱*} و محمود شفاعی بچستان^۲

تاریخ دریافت: ۸/۵/۸۸

تاریخ پذیرش: ۱۳/۴/۸۹

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی دکترا و استاد، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

*مسئول مکاتبه E-mail: m_Bahrami_1085@yahoo.com

چکیده

در بررسی و تحلیل هیدرولیکی کانال‌های باز، تعیین مقاومت جریان امری ضروری است. مقاومت جریان در کانال‌های با بستر درشت دانه بیشتر از نوع زبری ذره می باشد. تاکنون مطالعات زیادی در رابطه با برآورد مقدار ضریب مقاومت جریان از طریق اندازه ذرات پیشنهاد شده است که در این مطالعات اثر شکل ذرات چندان مشخص نیست. بنابراین هدف از این تحقیق انجام آزمایشاتی برای تعیین اهمیت نوع و اندازه رسوبات درشت دانه می باشد. در این مطالعه برای تعیین ضریب مقاومت جریان از هشت نوع رسوب درشت دانه شامل 4 نوع رسوب طبیعی نسبتاً گرد گوشه و 4 نوع رسوب شکسته تیز گوشه استفاده شد. آزمایش‌ها در فلومی به طول 10 متر و عرض 25 سانتیمتر و ارتفاع 50 سانتیمتر با شیب کف ثابت 0/0005 انجام شد. نتایج نشان می دهد که علاوه بر پارامتر استغراق نسبی (R/K_s) پارامترهای دیگری مانند عدد فرود (F_r) و ضریب شکل مقطع (Y) در برآورد هر چه دقیق تر مقاومت جریان تاثیر بسزائی دارند. همچنین نشان داده شد که در رودخانه‌های با بستر شنی روابط نیمه لگاریتمی و توانی مقاومت جریان را تقریباً با دقت یکسانی تخمین می زنند. در این تحقیق رابطه‌ای برای تعیین ضریب مقاومت جریان ارائه گردید.

واژه‌های کلیدی: رسوبات درشت دانه، ضریب داریسی - ویسباخ، ضریب مقاومت جریان، کانال باز

Experimental Study of the Effects of Channel Bed Coarse Sediments on Flow Resistance Coefficient

M Bahrami Yarahmadi^{1*} and M Shafai Bajestan²

Received : July, 30, 2009 Accepted : 4 July 2010

^{1,2} PhD Student and Prof., Faculty of Water Sci. Engin. Shahid Chamran University, Ahwaz, Iran

*Corresponding author: E-mail: m_Bahrami_1085@yahoo.com

Abstract

Determination of flow resistance is an essential parameter for studying and hydraulic analyzing open channels. Flow resistance in channels with coarse materials on bed is mostly due to grain roughness. Over the past decades several studies have been conducted to correlate the flow resistance to the particle size; however the effects of particle shapes are not clear so far. Therefore, it is the purpose of this work to conduct experimental studies to see how important the type and size of coarse sediments are. In this study eight types of sediments; four rounded and four angular sediments have been tested under different flow conditions in a flume of 10 meter long, 25 cm wide and 50 cm height. Experiments were conducted under constant bed slope of 0.0005. Results show that parameters such as relative roughness, R/K_s , Froude number, F_r , and channel shape factor, y play important roles in accurate estimation of flow resistance. The results have also shown that in gravelbed rivers the flow resistance can be estimated by semi logarithmic and power equations with the same accuracy. In this study an equation was also proposed for prediction of flow resistance coefficient.

Keywords: Coarse sediments, Darcy-Weisbach coefficient, Flow resistance coefficient, Open channel

مقاومت فرم گفته می‌شود، می‌باشد. در رودخانه های با بستر درشت دانه حاوی شن درشت و قلوه سنگ، مقاومت جریان بیشتر به اندازه ذرات بستگی دارد و مقاومت فرم در مقابل آن بسیار ناچیز است (شفاعی بجستان 1387).

مقدمه

مقاومت جریان در رودخانه‌ها در اثر نیروی رانش لزجی و یا فشاری بوجود آمده در محیط خیس شده می‌باشد. در رودخانه های آبرفتی معمولاً مقاومت جریان بیشتر تابع اندازه ذرات، که به آن مقاومت ذره، و فرم بستر، که به آن

هستند و مناسب رودخانه های کوهستانی نیستند (رایس و همکاران 1998):

- مواد بستر رودخانه‌های کوهستانی معمولاً خیلی درشت‌اند در حالیکه رودخانه‌های دشت بسترشان دارای شن و ماسه می‌باشد.
- شیب بستر رودخانه‌های کوهستانی اغلب خیلی بیشتر از شیب رودخانه‌های دشت است.
- زبری نسبی (نسبت اندازه مواد بستر K_n) به عمق جریان (Y) در رودخانه های کوهستانی خیلی بزرگتر می‌باشد.

مشکل اصلی در استفاده از روابط مانینگ، شزی و دارسی - ویسباخ درستی تعیین ضرائب زبری مانینگ (n)، شزی (C) و دارسی - ویسباخ (f) می‌باشد.

به منظور انتخاب مقدار صحیح ضریب مقاومت جریان باید عواملی را که در مقدار آن تاثیر می‌گذارند، مشخص نمود (شفاعی بجستان 1383). این عوامل عبارتند از:

زبری سطح بستر و بدنه، پوشش گیاهی، نامنظم بودن سطح مقطع آبراهه، نامنظمی مسیر آبراهه، رسوب گذاری و آبشستگی، موانع، تراز سطح آب و دبی، بار معلق و بار بستر و غیره ...

بطور کلی انتظار می‌رود، مقدار ضریب مقاومت جریان با افزایش زبری بستر و بدنه، رشد پوشش گیاهی در آبراهه و نامنظمی سطح مقطع و مسیر آبراهه، افزایش می‌یابد (شفاعی بجستان 1383).

جریان در آبراهه های روباز بر اساس عدد رینولدز ممکن است ورقه‌ای، بینابین و متلاطم باشد. جریان ورقه‌ای در مجاری روباز به ندرت اتفاق می‌افتد و از دید عملی می‌توان گفت که به طور کلی در آبراهه ها، جریان متلاطم و به لحاظ هیدرولیکی زبر، است. ضریب زبری دارسی - ویسباخ در جریان‌های متلاطم زبر بر اساس آزمایشات

برای تعیین مقاومت جریان در مجاری روباز از روابط مانینگ، شزی و دارسی - ویسباخ استفاده می‌شود که در این روابط پارامترهایی چون ضریب زبری مانینگ (n)، ضریب زبری شزی (C) و ضریب دارسی - ویسباخ (f) وجود دارد. هر سه این ضرائب به نوعی ضریب مقاومت جریان هستند که در معادلات حاکم بر جریان در رودخانه ها کاربرد فراوانی دارند. در حقیقت تخمین درست این ضرائب می‌تواند به برآورد دقیق تر شرایط جریان کمک کند. در همه مدل های رایانه‌ای که امروزه برای برآورد شرایط جریان نظیر عمق، سرعت، تنش برشی و ... در رودخانه‌ها استفاده می‌شود، دانستن یکی از سه ضریب مذکور ضروری است.

سه رابطه مذکور که ارتباط بین سرعت متوسط جریان (V) و ضرائب مقاومتی، هندسی و هیدرولیکی آبراهه را بیان می‌کنند به فرم زیر می‌باشند (ین 2002).

$$V = \frac{K_n}{n} R^{\frac{2}{3}} S_f^{\frac{1}{2}} \quad (\text{مانینگ}) \quad [1]$$

$$V = \sqrt{\frac{8g}{f}} \sqrt{RS_f} \quad (\text{دارسی-ویسباخ}) \quad [2]$$

$$V = C \sqrt{RS_f} \quad (\text{شزی}) \quad [3]$$

که در آنها، C, f, n به ترتیب ضرائب مانینگ، دارسی - ویسباخ و شزی، V سرعت متوسط جریان $[L/T]$ ، R شعاع هیدرولیکی $[L]$ ، S_f شیب خط انرژی که در جریان یکنواخت برابر شیب بستر کانال است، g شتاب ثقل $[L/T^2]$ و K_n ضریبی است که در سیستم SI مقدار آن یک و در سیستم انگلیسی مقدار آن $1/486$ می‌باشد.

ضرائب مقاومت در روابط 1 تا 3 به صورت زیر با هم ارتباط دارند:

$$\sqrt{\frac{f}{8}} = \frac{n}{R^{1/6} K_n} = \frac{\sqrt{g}}{C} = \frac{\sqrt{gRS_f}}{V} \quad [4]$$

زونبرگر و تورن (1985) به دلایل زیر معتقدند که، روابط 1 تا 3 برای رودخانه‌های واقع در دشت مناسب

صورت زیر پیشنهاد کرد. این رابطه شباهت زیادی به رابطه هی (1979) دارد.

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = 5.62 \operatorname{Log}\left(\frac{Y}{D_{84}}\right) + 4 \quad [9]$$

درصد خطای معادله فوق حدوداً 30 درصد می باشد.

مادرید-آریس (1992) بر اساس داده های رودخانه های کشور شیلی برای 12.5 $\mathbf{p} \frac{R}{D_{84}}$ فرمول زیر را ارائه دادند (سوتو، 1994).

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = 1.317 \operatorname{Ln}\left(\frac{R}{D_{84}}\right) + 5.356 \quad [10]$$

افضلی مهر و انکتیل (1998) مقاومت جریان را در رودخانه های با بستر سنگریزه بررسی کردند. آنها ابتدا میانگین نسبی خطا را برای معادلات نیمه لگاریتمی و توانی مختلف حساب کردند و به این نتیجه رسیدند که معادلات موجود مقاومت جریان را دقیق تخمین نمی زنند. زیرا این معادلات فقط بر اساس استغراق نسبی $\left(\frac{R}{D_{84}}\right)$ مقاومت جریان را تعیین می کنند. آنها ابتدا با استفاده از تحلیل ابعادی پارامترهای بی بعد موثر را بر مقاومت جریان تعیین کردند سپس با استفاده از 280 مجموعه داده ای رودخانه های سنگریزه ای در کانادا، ایرلند شمالی، آمریکا، نیوزلند، بریتانیا و ایتالیا در نهایت معادله زیر را ارائه کردند:

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = 2.03 \operatorname{Log}\left(\frac{Y}{K_s}\right) + 2.96 F_r - 0.18 \frac{t_s}{t_c} - 0.83 \quad [11]$$

میانگین نسبی خطای معادله فوق 8/6 درصد می باشد. آنها اظهار داشتند که برای مجاری باز باید پارامتر درون لگاریتم با ضریب شکل مقطع (Y) اصلاح شود و مقاومت جریان علاوه بر استغراق نسبی $\left(\frac{Y}{K_s}\right)$ تابع پارامترهای حرکت رسوب $\left(\frac{t_s}{t_c}\right)$ و عدد فرود جریان (F_r) نیز

نیکورادزه، از رابطه زیر محاسبه می شود (محمودیان شوشتری 1385).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{C}{\sqrt{8g}} = 2 \operatorname{Log}\left(\frac{12R}{K_s}\right) \quad [5]$$

براساس توصیه انجمن مهندسين عمران آمریکا برای بیشتر مسائل عملی برای تعیین ضریب زبری شزی (C) می توان از رابطه (5) استفاده کرد (محمودیان شوشتری 1385).

معادله توزیع سرعت در جریان متلاطم، خارج از زیر لایه ورقه ای که از تئوری طول اختلاط پرانتل پیروی می کند بر اساس مطالعات نیکورادزه به شکل زیر است:

$$\frac{v}{U_*} = 5.75 \operatorname{Log} \frac{y}{K_s} + 8.5 \quad [6]$$

کیولگان با انتگرال گیری از رابطه فوق، معادله زیر را برای تعیین سرعت متوسط در جریان های متلاطم زبر بدست آورد:

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{V}{U_*} = 5.75 \operatorname{Log} \frac{R}{K_s} + 6.25 \quad [7]$$

هی (1979) برای تخمین مقاومت جریان در رودخانه های کوهستانی رابطه زیر را استخراج کرد:

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = 5.62 \operatorname{Log}\left(\frac{aR}{3.5D_{84}}\right) \quad [8]$$

که در آن، f = ضریب اصطکاک داریسی - ویسباخ و a = عامل بدون بعد شکل کانال که از 11/1 تا 13/46 در تغییر است R = شعاع هیدرولیکی و D_{84} = قطری از مصالح بستر که 84 درصد وزنی ذرات از آن ریزترند.

باتورث (1985) با استفاده از داده های جمع آوری شده از رودخانه های کوهستانی انگلستان با شیب های 0/004 تا 0/04 و $\mathbf{p} \frac{Y}{D_{84}}$ رابطه مقاومت جریان را با استفاده از متغیر ضریب زبری داریسی - ویسباخ (f) به

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = 5.62 \log\left(\frac{5.85R}{3.5D_{84}}\right) + 2.85 \quad [14]$$

با توجه به مطالب ارائه شده مشخص است که تا کنون مطالعات نسبتاً گسترده‌ای در رابطه با برآورد مقاومت جریان ناشی از زبری بستر صورت گرفته است. ولی به دلیل اهمیت ضریب زبری در برآورد پارامترهای هیدرولیکی و وجود تعداد زیادی معادله ضروری است تا مطالعات بیشتری انجام گردد و میزان دقت هر یک از روشها برآورد شود. از این رو هدف اصلی این تحقیق انجام یک سری آزمایش در فلوم آزمایشگاهی با رسوبات درشت دانه طبیعی و شکسته و ارزیابی روابط موجود و نیز ارائه رابطه‌ای برای تعیین ضریب مقاومت جریان می‌باشد.

مواد و روش‌ها

به منظور دستیابی به اهداف این تحقیق، آزمایش‌های متعددی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز و در فلومی به طول 10 متر، عرض 25 سانتیمتر، عمق 50 سانتیمتر و شیب 0/0005 انجام گردید. جریان پس از ورود به فلوم 25 سانتیمتری با طی یک مسافت تقریباً 2/8 متر به ابتدای سطح زبر قرار داده شده در بستر رسید. طول بستر زبر در همه آزمایش‌ها ثابت و برابر 6 متر بود. جریان پس از عبور از روی بستر زبر با طی مسافت 1/2 متر به انتهای فلوم رسید. در شکل 1 نمای جانبی فلوم 25 سانتی‌متری و تجهیزات آن و محل قرارگیری رسوبات بستر نشان داده شده است. در همه آزمایش‌ها از دبی‌های 7، 16، 25 و 33 لیتر بر ثانیه استفاده گردید.

می‌باشد. در رابطه فوق Y ضریب شکل مقطع $(t_s = \frac{YS_0}{(G-1)K_s})$ پارامتر شیلدز $(y = \sqrt{\frac{P}{B}})$ و مقدار بحرانی t_s می‌باشد. همچنین P پیرامون مرطوب، B عرض کانال، Y عمق متوسط جریان، S_0 شیب کف کانال، K_s اندازه متوسط ذرات و G چگالی ذرات هستند.

باتورث (2002) با استفاده از 27 مجموعه داده صحرائی از 7 منبع تحقیقاتی، با فرض جریان یکنواخت و توزیع یکنواخت اندازه ذرات بستر، روابط زیر را استخراج کرد:

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = 3.84 \left(\frac{Y}{D_{84}}\right)^{0.547} S_0 \text{ p } 0.8\% \quad R^2 = 0.986 \quad [12]$$

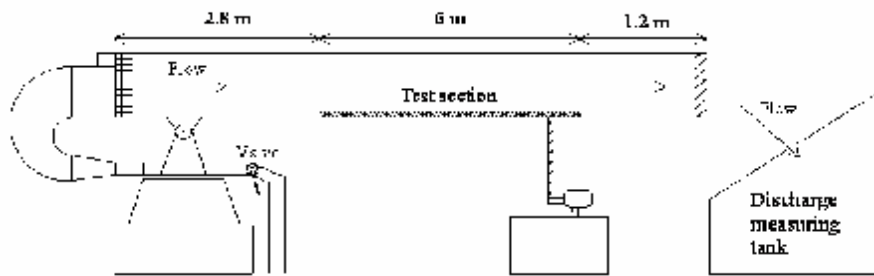
$$\sqrt{\frac{8}{f}} = 3.1 \left(\frac{Y}{D_{84}}\right)^{0.93} S_0 \text{ f } 0.8\% \quad R^2 = 0.959 \quad [13]$$

این روابط بر اساس جریان‌های درون سواحل با $\frac{Y}{D_{84}} \text{ p } 11$ و شیب‌های 0/002 تا 0/04 استخراج شده اند.

باتورث (2002) معتقد است که ارتباط $\sqrt{\frac{8}{f}}$ با $\frac{Y}{D_{84}}$ را قانون توانی با دقت بیشتری نسبت به قانون نیمه لگاریتمی بیان می‌کند.

طبیعی و همکاران (1384) رابطه ضریب زبری و اندازه قطر ذرات در آبراهه‌های با شیب تند را بررسی کردند. آنها آزمایش‌های خود را در یک فلوم به طول تقریبی 25 متر و عرض 130 سانتیمتر انجام دادند. ایشان از 4 تیپ مصالح دانه بندی شده که عمدتاً درشت دانه بوده و خاص آبراهه‌های با شیب تند می‌باشند استفاده کردند. شیب‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها 0/03، 0/04، 0/05، 0/06 و 0/07 بوده است. رابطه آنها برای $\frac{d}{D_{84}} \text{ p } 3$ $0.7 \text{ p } 0.7$

به قرار زیر است:



شکل ۱- فلوم ۲۵ سانتیمتری و محل قرارگیری رسوبات بستر

۱- شیر فلکه تنظیم دبی ورودی، ۲- ورودی فلوم، ۳- صفحات مشبک مستهلک کننده انرژی جنبشی ابتدای فلوم، ۴- مقطع شماره ۱، ۵- مقطع شماره ۲، ۶- مقطع شماره ۳ و ۷- دستگاه مکانیکی تغییر شیب فلوم

جدول ۱- مشخصات دانه بندی مصالح آزمایش

D ₅₀ بر حسب میلیمتر	طبیعی	شکسته
11	A1	B1
16	A2	B2
21	A3	B3
27	A4	B4

روش انجام آزمایش‌ها بدین نحو بود که ابتدا شیب فلوم در حد مورد نظر (0/0005) تنظیم سپس مصالح زبر یکنواخت در بازه 6 متری میانی فلوم قرار گرفته و آنگاه اقدام به روشن کردن پمپ و افزایش دبی ورودی تا حد مورد نظربه فلوم، توسط شیر ورودی می‌گردید. پس از اطمینان از برقرای دبی مورد نظر و ثابت بودن شرایط جریان پارامترهای مختلف جریان، اندازه‌گیری می‌گردید. رقوم سطح آب در طول فلوم بخصوص بر روی بستر زبر در سیزده نقطه توسط رقوم سنج با دقت یک دهم میلیمتر، و سرعت جریان در مقطع وسط بستر زبر (به فاصله 3 متر از ابتدای بستر زبر) و در اعماق مختلف توسط دستگاه میکرومولینه با دقت 0/01 سانتیمتر بر ثانیه اندازه‌گیری شد. در این مطالعه هشت نوع مصالح درشت دانه با دانه بندی یکنواخت ($\sigma < 1/3$) بعنوان مصالح زبر استفاده گردید. مشخصات دانه بندی مصالح بستر در جدول 1 آمده است.

محاسبات

برای محاسبه افت اصطکاکی (f) از رابطه داریسی- ویسباخ (رابطه 2) استفاده می‌شود. مقدار شیب خط انرژی از رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$S_f = S_0 + S_E \quad [15]$$

که در آن، S_0 شیب کف کانال می‌باشد و مقدار آن مشخص است ($S_0 = 0.0005$). مقدار S_E با توجه به رابطه‌ی زیر و مشخص بودن عمق و سرعت متوسط در مقاطع 1 و 3 به ازاء هر دبی معین، قابل محاسبه است.

$$S_E = \frac{(Y_1 + \frac{V_1^2}{2g}) - (Y_3 + \frac{V_3^2}{2g})}{\Delta X} \quad [16]$$

که در آن، Y_1 عمق جریان در مقطع 1 بستر زبر، Y_3 عمق جریان در مقطع 3 بستر زبر، V_1 سرعت متوسط

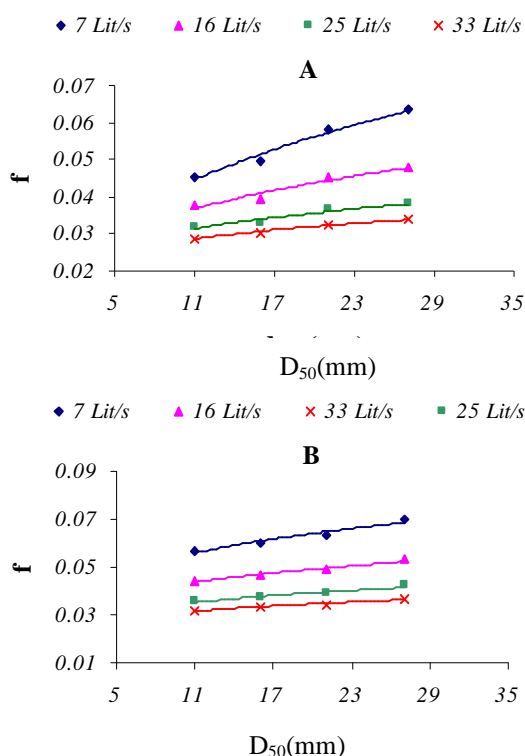
جریان در مقطع 1 بستر زیر، V_3 سرعت متوسط جریان در مقطع 3 بستر زیر و ΔX فاصله‌ی مقطع 1 تا مقطع 3 می‌باشد که مقدار آن در این آزمایش‌ها سه متر بود. مقاطع 1 و 3 به ترتیب به فواصل 1/5 و 4/5 متر از ابتدای بستر زیر قرار دارند. سرعت متوسط جریان در مقاطع 1 و 3 به ازاء هر دبی معلوم، از تقسیم دبی جریان بر سطح مقطع جریان محاسبه گردید. . جدول 2 نتایج این مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول 2- مقادیر متغیرهای استفاده شده در محاسبه f برای هر یک از 32 نوع رسوب کف بستر

f	S_f	S_E	$V_3(ms^{-1})$	$Y_3 (m)$	$V_1(ms^{-1})$	$Y_1 (m)$	نوع رسوب	ردیف
0.043564	0.00319	0.00269	0.456475	0.06134	0.386698	0.072408	A1	1
0.036903	0.003942	0.003442	0.776023	0.082472	0.613591	0.104304	A1	2
0.03191	0.0044	0.0039	0.914423	0.109359	0.734214	0.1362	A1	3
0.028873	0.004558	0.004058	0.945421	0.13962	0.802178	0.164552	A1	4
0.049696	0.003724	0.003224	0.466044	0.06008	0.38144	0.073406	A2	5
0.038851	0.003892	0.003392	0.747003	0.085676	0.606309	0.105557	A2	6
0.032156	0.004216	0.003716	0.871912	0.11469	0.726177	0.137708	A2	7
0.029687	0.004633	0.004133	0.930248	0.141898	0.793814	0.166286	A2	8
0.058004	0.004036	0.003536	0.462583	0.06053	0.373695	0.074927	A3	9
0.04519	0.004432	0.003932	0.7759	0.082485	0.600425	0.106591	A3	10
0.036611	0.004787	0.004287	0.911418	0.109719	0.723301	0.138255	A3	11
0.032542	0.005069	0.004569	0.953668	0.138413	0.793266	0.166401	A3	12
0.063434	0.004132	0.003632	0.495021	0.056563	0.387238	0.072307	A4	13
0.04814	0.004692	0.004192	0.856281	0.074742	0.61193	0.104587	A4	14
0.038157	0.004968	0.004468	0.993626	0.100641	0.730634	0.136868	A4	15
0.033741	0.004974	0.004474	0.958567	0.137706	0.797289	0.165561	A4	16
0.052806	0.003723	0.003223	0.465827	0.060108	0.381348	0.073424	B1	17
0.041879	0.00412	0.00362	0.763272	0.08385	0.605341	0.105726	B1	18
0.034996	0.004496	0.003996	1.106963	0.090337	0.724493	0.138028	B1	19
0.032272	0.004813	0.004313	0.934843	0.1412	0.79165	0.16674	B1	20
0.055695	0.00369	0.00319	0.452727	0.061847	0.374816	0.074703	B2	21
0.044983	0.004289	0.003789	0.754096	0.08487	0.598247	0.106979	B2	22
0.037272	0.004709	0.004209	0.885065	0.112986	0.718107	0.139255	B2	23
0.032936	0.004932	0.004432	0.92798	0.142244	0.785973	0.167945	B2	24
0.063711	0.00405	0.00355	0.461808	0.060631	0.373049	0.075057	B3	25
0.04869	0.00437	0.00387	0.755455	0.084717	0.596605	0.107274	B3	26
0.039177	0.004689	0.004189	0.879716	0.113673	0.716897	0.13949	B3	27
0.035343	0.004972	0.004472	0.928105	0.142225	0.785122	0.168127	B3	28
0.068409	0.004279	0.003779	0.438933	0.063791	0.356882	0.078457	B4	29
0.05076	0.004695	0.004195	0.720013	0.088887	0.576934	0.110931	B4	30
0.040001	0.00503	0.00453	0.847565	0.117985	0.697326	0.143405	B4	31
0.036222	0.005259	0.004759	0.900483	0.146588	0.766236	0.172271	B4	32

نتایج و بحث

زبری‌های بستر بزرگتر باشند به دلیل اینکه سطحی از ذرات که در برابر جریان قرار می‌گیرد بزرگتر می‌شود پس نیروی درگ فشاری بیشتر می‌شود از طرفی هم نیروی درگ اصطکاکی با بزرگتر شدن اندازه ذرات بستر بزرگتر می‌شود در نتیجه نیروی درگ کل وارده از سیال بر بستر بزرگتر می‌شود، پس افت جریان بیشتر می‌شود. به همین دلیل است که با شرایط هیدرولیکی یکسان با بزرگتر شدن اندازه ذرات بستر ضریب اصطکاک داریسی - ویسباخ (f) افزایش می‌یابد.



شکل 2- تغییرات ضریب اصطکاک داریسی - ویسباخ (f)

در مقابل D_{50}

طبق محاسبات صورت گرفته با افزایش دبی، عمق و سرعت جریان افزایش می‌یابد. هر چه سرعت بیشتر شود (پروفیل سرعت ضخیم تر می‌شود) نقاط جدایی³ روی

هدف از انجام آزمایش‌ها تعیین رابطه بین ضریب زبری داریسی و ایسباخ و اندازه متوسط ذرات بستر برای رودخانه‌های با بستر شنی می‌باشد. عوامل متغیر اندازه-گیری شده شامل: عمق جریان آب در 13 مقطع و پروفیل سرعت در یک مقطع است. از طرفی با 1 متغیر شیب، 4 متغیر دبی و 8 متغیر اندازه رسوبات بستر، جمعاً 32 آزمایش انجام شد. با توجه به محاسبات انجام شده، جریان در همه آزمایش‌ها زیر بحرانی و متلاطم زبر بوده است.

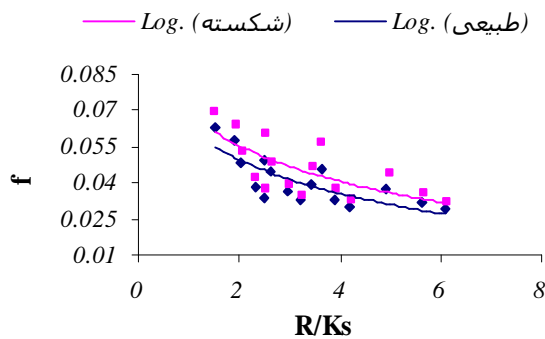
در شکل 2 تغییرات ضریب زبری داریسی - ویسباخ (f) در مقابل اندازه متوسط ذرات بستر (d_{50}) برای ذرات طبیعی نسبتاً گرد گوشه (A) و ذرات شکسته تیز گوشه (B) نشان داده شده است. با دقت در شکل 2 ملاحظه می‌شود که با افزایش عمق جریان ضریب اصطکاک داریسی - ویسباخ (f) کاهش می‌یابد و به ازاء دبی ثابت، ضریب اصطکاک ذرات با $d_{50} = 11 \text{ mm}$ کمترین مقدار و ذرات با $d_{50} = 27 \text{ mm}$ بیشترین مقدار را دارند که این بیانگر رابطه مستقیم ضریب اصطکاک و اندازه ذرات به ازاء دبی ثابت می‌باشد. در ضمن با افزایش دبی جریان روند تغییرات ضریب زبری داریسی - ویسباخ کاهش می‌یابد به گونه‌ای که دبی 7.43 Lit/s بیشترین روند تغییرات و دبی 33 Lit/s کمترین روند تغییرات را نشان می‌دهد.

علت اینکه با بزرگتر شدن اندازه ذرات بستر، ضریب اصطکاک داریسی - ویسباخ (f) بزرگتر می‌شود این است که، در طول یک بستر زبر در جهت جریان، هم نیروی درگ اصطکاکی¹ و هم نیروی درگ فشاری² از سیال بر بستر اثر می‌کنند. با شرایط هیدرولیکی یکسان، هرچقدر اندازه

¹Skin friction drag

²Pressure drag

³Separation point



شکل 3- مقادیر f در مقابل $\frac{R}{K_s}$ برای همه ذرات رسوبی

در شرایط یکسان هیدرولیکی خطوط جریان از سطح ذرات شکسته تیز گوشه نسبت به ذرات طبیعی نسبتاً گرد گوشه زودتر جدا می‌شوند یعنی نقاط جدایی ذرات شکسته تیز گوشه نسبت به ذرات طبیعی نسبتاً گرد گوشه جلوتر اتفاق می‌افتند. پس منطقه جداشدگی پشت هر ذره شکسته تیز گوشه بزرگتر از ذره طبیعی نسبتاً گرد گوشه می‌باشد در نتیجه اختلاف فشار بین جلو و عقب ذره شکسته تیز گوشه بیش از ذره طبیعی نسبتاً گرد گوشه است. پس نیروی درگ فشاری ذرات شکسته تیز گوشه از ذرات طبیعی نسبتاً گرد گوشه بیشتر است در نتیجه نیروی درگ کل سطح پوشیده از ذرات شکسته تیز گوشه بیش از ذرات طبیعی نسبتاً گرد گوشه می‌باشد. یعنی ضریب اصطکاک دارسی - ویسباخ (f) بستر پوشیده از ذرات شکسته تیز گوشه از ذرات طبیعی نسبتاً گرد گوشه بیشتر است.

میانگین نسبی خطا (ADD) میان تابع مقاومت محاسبه شده و اندازه‌گیری شده با استفاده از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$ADD = \frac{1}{m} \sum \left| \frac{q - q^*}{q} \right| \quad [17]$$

سطح ذره دیرتر اتفاق می‌افتند. لذا منطقه جداشدگی¹ کوچکتر شده و در نتیجه نیروی درگ فشاری کاهش می‌یابد. از طرفی با افزایش سرعت و عدد رینولدز نیروی درگ اصطکاکی هم کاهش می‌یابد. پس با افزایش دبی و عمق جریان نیروی درگ کل و در نتیجه ضریب زبری کاهش می‌یابد.

همانگونه که ذکر شد با افزایش دبی (Q)، عمق جریان (Y) سرعت متوسط جریان (V) و شیب خط انرژی (S_f) افزایش می‌یابند در نتیجه سرعت برشی جریان ($U_* = \sqrt{gRS_f}$) نیز افزایش می‌یابد ولی چون روند تغییرات سرعت جریان بیش از سرعت برشی جریان می‌باشد پس $\frac{V}{U_*}$ نیز با افزایش دبی افزایش می‌یابد. با در نظر گرفتن رابطه کیولگان (رابطه 7) به ازاء زبری ثابت با افزایش عمق جریان (Y) و شعاع هیدرولیکی (R)، ضریب زبری دارسی - ویسباخ (f) کاهش می‌یابد و به ازاء یک عمق ثابت با افزایش زبری بستر (K_s) ضریب اصطکاک دارسی - ویسباخ (f) افزایش می‌یابد که این نشان دهنده انطباق کامل نتایج آزمایشگاهی و نتایج تئوری حاصل از رابطه 7 می‌باشد.

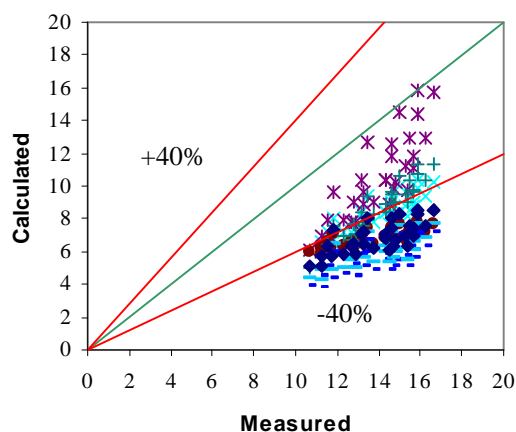
در شکل 3 مقادیر f در مقابل $\frac{R}{K_s}$ برای همه ذرات رسوبی مورد استفاده در آزمایش‌ها نشان داده شده است. شکل 3 نشان می‌دهد که ضریب اصطکاک (f) ذرات شکسته تیز گوشه از ذرات طبیعی نسبتاً گرد گوشه بیشتر است.

¹ Wake

(y) ، پارامتر حرکت رسوب $(\frac{t_s}{t_c})$ روابطی استخراج کردند که میانگین نسبی خطای آنها خیلی کمتر از بقیه روابط بود. هر کدام از این روابط برای شرایط هیدرولیکی (محدوده استغراق نسبی $(\frac{R}{K_s})$ ، شیب بستر (S) و غیره) مشخصی بدست آمده‌اند که استفاده از آنها در شرایطی غیر از آنها باعث خطا خواهد شد.

در رودخانه‌ها غیر یکنواختی جریان، شکل ذرات بستر و بدنه، فرم بستر، توزیع غیر یکنواخت ذرات بستر، اثر سواحل و غیره وجود دارند که همه این موارد بر روی مقاومت جریان موثرند. با توجه به اینکه این روابط با استفاده از داده‌های برداشت شده از رودخانه‌ها بدست آمده‌اند، پس همه شرایطی را که در طبیعت بر مقاومت جریان موثراند را مد نظر قرار می‌دهند و مقدار مقاومت جریان را بیش از مقدار واقعی آن تخمین می‌زنند. در شکل 4 مقادیر تابع مقاومت محاسباتی و اندازه‌گیری نشان داده شده است.

× Bathurst (1985) * Bathurst (2002) = Madrid-Aris
 - Hey (a=11.1) - Hey (a=13.46) + Afzalimehr
 © Motiee et al



شکل ۴- مقایسه مقادیر $\sqrt{\frac{8}{f}}$ اندازه‌گیری و محاسبه شده روابط نیمه لگاریتمی و توانی

که در آن m تعداد مقادیر، q^* متغیر محاسبه شده و q متغیر اندازه‌گیری شده می‌باشد. مقادیر نسبی خطا برای روابط نیمه لگاریتمی و توانی مختلف محاسبه شد که نتایج آن در جدول 3 آورده شده است. نتایج جدول 3 نشان می‌دهد که میانگین نسبی خطای روابط نیمه لگاریتمی و توانی زیاد می‌باشد و این روابط قادر به تعیین دقیق مقاومت جریان در رودخانه‌های با بستر شنی نیستند.

جدول ۳- محاسبه نسبی خطای روابط توانی و نیمه لگاریتمی

نام رابطه	ماکزیمم نسبی خطا (%)	میانگین نسبی خطا (%)
Hey(1979) (a=11.1)	۶۷/۰۷۶	۵۹/۷۵
Hey(1979) (a=13.46)	۶۴/۰۲	۵۶/۳۲
Bathurst(1985)	۴۶/۹۶	۴۰/۴۹
Madrid-Aris (1992)	۵۷/۳۲	۵۰/۲۸
Afzalimehr(1998)	۵۴/۳	۳۹/۵۹
Bathurst(2002)	۴۶/۵۳۸	۲۶/۵۱
مطیعی و همکاران (۱۳۸۴)	۵۸/۷۲	۵۰/۳۶

روابط مذکور به دلایل زیر مقاومت جریان را بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده برآورد می‌کنند:
 - روابط موجود همه متغیرهای تاثیرگذار بر مقاومت جریان را ندارند. همانگونه که قبلاً ذکر شد افزایش مهر و فرانکوئیس (1998) نشان دادند که روابط موجود قادر نیستند مقاومت جریان را در رودخانه‌های کوهستانی دقیق برآورد کنند چون این روابط فقط از یک متغیر تاثیرگذار بر مقاومت جریان استفاده می‌کنند. آنها با در نظر گرفتن پارامترهای دیگر نظیر عدد فرود (F_r) ، ضریب شکل مقطع

پارامترهای عدد فرود (F_r) و ضریب شکل مقطع (y) به تنهایی باعث افزایش r^2 و کاهش میانگین نسبی خطا (ADD) و ماکزیمم نسبی خطا شده اند. با حضور تنها ضریب شکل مقطع (y) تاثیر $\frac{Y}{K_s}$ بهتر از $\frac{R}{K_s}$ ولی با حضور تنها عدد فرود (F_r) تاثیر هر دو تقریباً یکسان است. با وجود عدد فرود (F_r) در روابط، استفاده و عدم استفاده از ضریب شکل مقطع (y) تاثیر تقریباً یکسانی روی r^2 و میانگین نسبی خطا (ADD) خواهد داشت.

در ضمن برخلاف رودخانه های کوهستانی که در آنها روابط توانی ارتباط بین $\sqrt{\frac{8}{f}}$ و استغراق نسبی ($\frac{R}{K_s}$ و $\frac{Y}{K_s}$) را نسبت به روابط نیمه لگاریتمی بهتر نشان می‌دادند (باتورث 2002) در رودخانه‌های با بستر شنی روابط توانی و نیمه لگاریتمی تقریباً با دقتی یکسانی رابطه بین $\sqrt{\frac{8}{f}}$ و استغراق نسبی ($\frac{Y}{K_s}$ و $\frac{R}{K_s}$) را بیان می‌کنند حتی می‌توان گفت دقت روابط نیمه لگاریتمی نسبت به توانی بیشتر است. با توجه به توضیحات داده شده از بین روابط استخراج شده، رابطه شماره 20 مقاومت جریان در رودخانه‌های با بستر شنی را با دقت بیشتری تخمین می‌زند.

در شکل 5 مقادیر $\sqrt{\frac{8}{f}}$ داده‌های اندازه‌گیری و رابطه استخراج شده (رابطه 20) مقایسه شده است.

در شکل 6 نیز رابطه استخراج شده (رابطه 20) با روابط جدول 3 مقایسه شده است که نشان دهنده اختلاف زیاد نتایج حاصل از رابطه استخراج شده و روابط جدول 3 می‌باشد.

همانگونه که شکل 4 نشان می‌دهد روابط نیمه لگاریتمی و توانی مقدار $\sqrt{\frac{8}{f}}$ را کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده برآورد می‌کنند یعنی این روابط مقدار مقاومت جریان را برای رودخانه‌های با بستر شنی از مقدار اندازه‌گیری شده بیشتر تخمین می‌زنند. با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی برداشت شده چندین نوع رابطه برای تعیین مقاومت جریان برای رودخانه‌های شنی استخراج شد که در جدول 4 آورده شده اند. با توجه به r^2 و ADD می‌توان روابط را با هم مقایسه کرد و مناسب‌ترین رابطه را انتخاب کرد.

استخراج رابطه جدید

برای بدست آوردن رابطه‌ی مقاومت جریان و با توجه به توصیه سایر محققان سعی گردید علاوه بر پارامترهای استغراق نسبی ($\frac{Y}{K_s}$) و ($\frac{R}{K_s}$) اثر پارامترهای مهم دیگری مانند عدد فرود (F_r) و ضریب شکل مقطع (y) نیز در استخراج رابطه مقاومت جریان برای مصالح درشت دانه بررسی گردد. برای این منظور با استفاده از داده‌های جدول 2 مقادیر پارامترهای بی بعد تعیین و با استفاده از نرم افزار SPSS افزایش دقت برآورد هر یک از روابط که ترکیبی از پارامترهای بی بعد مختلفی داشتند محاسبه گردید که نتایج نهائی در جدول 4 ارائه شده است.

با مقایسه نتایج جدول 4 می‌توان دریافت که استفاده از پارامتر $\frac{Y}{K_s}$ نسبت به $\frac{R}{K_s}$ ، بدون عدد فرود (F_r) و ضریب شکل مقطع (y)، r^2 بیشتر و میانگین نسبی خطا (ADD) و ماکزیمم نسبی خطای کمتری می‌دهد ولی با حضور هم عدد فرود (F_r) و هم ضریب شکل مقطع (y) تاثیر $\frac{Y}{K_s}$ و $\frac{R}{K_s}$ تقریباً یکسان است. هر کدام از

جدول ۴- مقایسه روابط استخراج شده مقاومت جریان

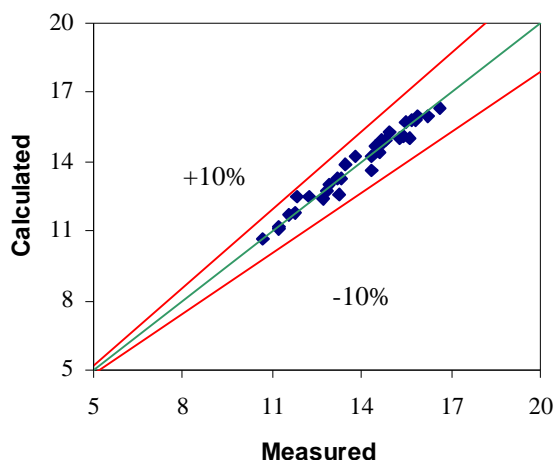
شماره رابطه	فرمول	r^2	ADD	ماکزیم خطای نسبی
18	$\sqrt{\frac{8}{f}} = 2.97 \ln\left(\frac{Y}{d_{50}}\right) + 8.7885$	0/749	4/71	16/27
19	$\sqrt{\frac{8}{f}} = 153.897\left(\frac{Y}{d_{50}}\right)^{0.01885} - 145.171$	0/748	4/703	15/41
20	$\sqrt{\frac{8}{f}} = 0.7523 \ln\left(\frac{Y}{d_{50}}\right) + 23.605 F_r - 3.515$	0/964	1/758	5/257
21	$\sqrt{\frac{8}{f}} = 109.695\left(\frac{R}{d_{50}}\right)^{0.006755} + 23.6323 F_r - 113.217$	0/9637	1/758	5/271
22	$\sqrt{\frac{8}{f}} = 2.8 \ln\left(\frac{yY}{d_{50}}\right) + 8.1365$	0/81	4/097	12/92
23	$\sqrt{\frac{8}{f}} = 0.75 \ln\left(\frac{yY}{d_{50}}\right) + 22.7 F_r - 3.1225$	0/9629	1/765	5/53
24	$\sqrt{\frac{8}{f}} = 81.3736\left(\frac{yY}{d_{50}}\right)^{0.00903} + 22.713 F_r - 84.4894$	0/963	1/76	5/54
25	$\sqrt{\frac{8}{f}} = 3.099 \ln\left(\frac{R}{d_{50}}\right) + 10.37$	0/528	6/773	21/308
26	$\sqrt{\frac{8}{f}} = 0.72023 \ln\left(\frac{R}{d_{50}}\right) + 25.611 F_r - 4.3855$	0/9645	1/767	5/543
27	$\sqrt{\frac{8}{f}} = 124\left(\frac{R}{d_{50}}\right)^{0.005754} + 25.6313 F_r - 128.395$	0/964	1/7673	5/529
28	$\sqrt{\frac{8}{f}} = 0.7414 \ln\left(\frac{yR}{d_{50}}\right) + 24.6 F_r - 3.9467$	0/9643	1/763	5/365
29	$\sqrt{\frac{8}{f}} = 132\left(\frac{yR}{d_{50}}\right)^{28.839} - 5.7662 F_r - 135$	0/9478	2	6/95
30	$\sqrt{\frac{8}{f}} = 3.13078 \ln\left(\frac{yR}{d_{50}}\right) + 9.3742$	0/6577	5/55	18/369

نتیجه گیری

روابط موجود مقدار مقاومت جریان را در رودخانه‌های با بستر شنی که شیب بستر و اندازه ذرات بسترشان از رودخانه‌های کوهستانی کمتر و پارامتر استغراق نسبی آنها از رودخانه‌های کوهستانی بیشتر است دقیق برآورد نمی‌کنند. در این مطالعه پس از یک سری آزمایش روابطی استخراج گردید که نشان می‌دهند علاوه بر پارامتر استغراق نسبی پارامترهای دیگری مانند عدد فرود (F_r) و ضریب شکل مقطع (γ) در برآورد هر چه دقیق تر مقاومت جریان تاثیر بسزائی دارند. همچنین نشان داده شد که در رودخانه‌های با بستر شنی روابط نیمه لگاریتمی و روابط توانی مقاومت جریان را تقریباً با دقت یکسانی تخمین می‌زنند.

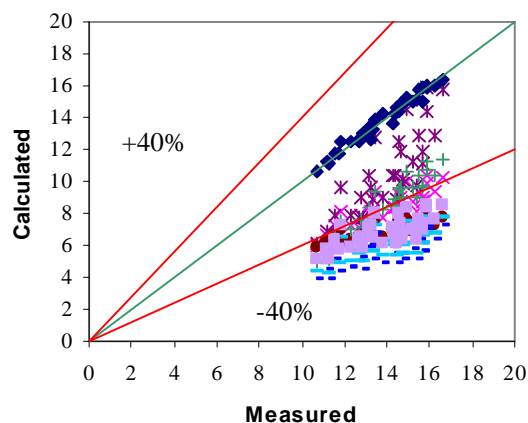
تشکر و قدردانی

این تحقیق با حمایت مالی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز (قطب مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی) انجام شده است که بدینوسیله تشکر و قدردانی می‌شود.



شکل ۵- مقایسه مقدار $\sqrt{\frac{8}{f}}$ داده‌های اندازه‌گیری و رابطه محاسباتی.

× Bathurst (1985) * Bathurst (2002) = Madrid-Aris
 - Hey (a=11.1) - Hey (a=13.46) + Afzalimehr
 © Motiee et al



شکل ۶- مقایسه مقدار $\sqrt{\frac{8}{f}}$ داده‌های اندازه‌گیری و محاسباتی روابط جدول ۳ و رابطه استخراج شده.

منابع مورد استفاده

- شفاعی بجستان م، 1383. جریان در کانالهای باز. اهواز، انتشارات دانشگاه شهید چمران، چاپ اول، 460 صفحه.
- شفاعی بجستان م، 1387. مبانی نظری و عملی هیدرولیک انتقال رسوب. اهواز، انتشارات دانشگاه شهید چمران، چاپ اول، ویرایش دوم، 549 صفحه.
- محمودیان شوشتری م، 1385. اصول جریان در مجاری باز. اهواز، انتشارات دانشگاه شهید چمران، جلد اول، چاپ اول، 486 صفحه.
- مطیعی م، صانعی م و طباطبایی م، 1384. بررسی آزمایشگاهی رابطه ضریب زبری و اندازه قطر ذرات در آبراهه‌های با شیب تند. پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان
- Afzalimehr H and Francois A, 1998. Estimation of Gravel-Bed River Flow Resistance. *Journal of Hydraulic Engineering* 124: 1054-1058.
- Bathurst JC, 1985. Flow Resistance Estimation in Mountain Rivers. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 111: 625-641.
- Bathurst JC, 2002. At-a-Site Variation and Minimum Flow Resistance For Mountain Rivers. *Journal of Hydrology* 269: PP 11-26.
- Hey RD, 1979. Flow Resistance Ingravel Bedrivers. *Proceedings of The American Society of Civil Engineers, Journal of The Hydraulic Division*, 105: 365-379.
- Rice CE, Kadavy KC and Robinson KM, 1998. Roughness of Loose Rock Riprap on Steep Slopes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124: 179-185.
- Soto UA and Madrid Aris M, 1994. Roughness Coefficient in Mountain Rivers. *Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineering, New York, VOL 1.*
- Yen BC, 2002. Open Channel Flow Resistance. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 128: 20-39.