

# مطالعه‌ی اثر شکل ذرات رسوب بستر آبراهه‌های باز بر ضریب اصطکاک

محمد بهرامی یاراحمدی<sup>۱\*</sup> و محمود شفاعی بجمستان<sup>۲</sup>

\* نویسنده مسئول: دانشجوی دکتری سازه‌های آبی دانشکده‌ی مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

m\_bahrami\_1085@yahoo.com

۲- استاد دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ پذیرش: ۸۸/۱۲/۲۵

تاریخ دریافت: ۸۸/۱۰/۱۹

## چکیده

محاسبات هیدرولیکی جریان در آبراهه‌ها و دشت‌های سیلابی نیازمند تخمین خصوصیات زبری است. برای توصیف مقاومت جریان یا زبری نسبی آبراهه‌ها و دشت‌های سیلابی از ضرایب زبری مانینگ ( $n$ )، شزی ( $C$ )، و دارسی ویسباخ ( $f$ ) استفاده می‌شود. تاکنون مطالعات زیادی در رابطه با تعیین مقدار ضریب اصطکاک ( $f$ ) از طریق اندازه‌ی ذرات انجام شده است اما در این بررسی‌ها اثر شکل ذرات رسوبی مشخص نیست. در این تحقیق برای تعیین ضریب اصطکاک ( $f$ ) از ۱۱ نوع دانه‌بندی رسوب شامل ۴ نوع ذرات طبیعی نسبتاً گردگوشه، ۴ نوع ذرات شکسته‌ی تیزگوشه و ۳ نوع ذرات مصنوعی کاملاً کروی استفاده شد. آزمایش‌ها در فلومی به طول ۱۰ متر، عرض ۲۵ سانتیمتر و ارتفاع ۵۰ سانتیمتر با شیب کف ثابت ۰/۰۰۰۵ انجام شد. نتایج نشان می‌دهند که در رسوبات با اندازه‌های ۱۱ میلیمتر اختلاف قابل توجهی بین ضریب اصطکاک ( $f$ ) ذرات شکسته‌ی تیزگوشه و ذرات طبیعی نسبتاً گردگوشه وجود دارد ولی در رسوبات با اندازه‌های ۲۷ میلیمتر ضریب اصطکاک ( $f$ ) ذرات طبیعی نسبتاً گردگوشه و ذرات مصنوعی کاملاً کروی تقریباً برابرند و ضریب اصطکاک ( $f$ ) ذرات شکسته‌ی تیزگوشه کم‌ترین اختلاف را با ذرات مذکور دارد. در انتها نیز رابطه‌ای برای تعیین ضریب اصطکاک ( $f$ ) ارائه شده است.

کلید واژه‌ها: آبراهه‌ی باز، ذرات رسوبی، زبری نسبی، ضریب اصطکاک، مقاومت جریان.

## مقدمه

در رودخانه‌های آبرفتی معمولاً مقاومت جریان بیش‌تر تابع اندازه‌ی ذرات، که به آن مقاومت ذره، و فرم بستر، که به آن مقاومت فرم گفته می‌شود، می‌باشد. در رودخانه‌های با بستر درشت دانه حاوی شن درشت و قلوه سنگ، مقاومت جریان بیش‌تر به اندازه‌ی ذرات بستگی دارد و مقاومت فرم در مقابل آن بسیار ناچیز است [۲].

روابط شزی<sup>۱</sup>، دارسی-ویسباخ<sup>۲</sup> و مانینگ<sup>۳</sup> از مشهورترین فرمول‌های مقاومت جریان در کانال‌های باز می‌باشند که ارتباط بین سرعت متوسط جریان و پارامترهای هندسی-هیدرولیکی و

مقاومتی آبراهه را تبیین می‌نمایند. مهم‌ترین مسأله در به‌کارگیری این روابط برآورد صحیح ضرایب آن-ها، که به ترتیب ضریب زبری شزی ( $C$ )، ضریب اصطکاک دارسی-ویسباخ ( $f$ ) و ضریب زبری مانینگ ( $n$ ) نامیده می‌شوند، می‌باشد. در تمام مدل‌های 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 رابطه‌ی مذکور، که ارتباط بین سرعت متوسط جریان ( $V$ ) و ضرایب مقاومتی، هندسی و هیدرولیکی آبراهه را بیان می‌کنند، به فرم زیر می‌باشند:

1- Chezy

2- Darcy-Weisbach

3- Manning

بدنه، رشد پوشش گیاهی در آبراهه و نامنظمی سطح مقطع و مسیر آبراهه، افزایش یابد [۱].

به طور کلی در آبراهه‌ها، جریان متلاطم و به لحاظ هیدرولیکی زبر است. معادله‌ی توزیع سرعت در جریان متلاطم خارج از زیر لایه‌ی ورقه‌ای<sup>۱</sup>، که از تئوری طول اختلاط پراتل پیروی می‌کند، بر اساس مطالعات نیکورادزه<sup>۲</sup> به شکل زیر است [۳]:

$$\frac{v}{U_*} = 5.75 \log \frac{y}{k_s} + 8.5 \quad (5)$$

که در آن  $v$  = سرعت جریان در عمق  $y$ ،  $U_*$  = سرعت برشی جریان و  $y/k_s$  = استغراق نسبی می‌باشد.

کیولگان با انتگرال‌گیری از رابطه‌ی فوق، معادله‌ی زیر را برای تعیین سرعت متوسط در جریان‌های متلاطم زبر به دست آورد [۳].

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{V}{U_*} = 5.75 \log \frac{R}{k_s} + 6.25 \quad (6)$$

که در آن  $V$  = سرعت متوسط جریان و  $R/k_s$  = استغراق نسبی می‌باشد.

برای تعیین ضریب اصطکاک دارسی - ویسباخ در جریان‌های متلاطم زبر بر اساس آزمایش‌های نیکورادزه، از رابطه‌ی زیر استفاده می‌شود [۳]:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{C}{\sqrt{8g}} = 2 \log \left( \frac{12R}{k_s} \right) \quad (7)$$

که در آن  $R$  = شعاع هیدرولیکی جریان و  $k_s$  = ارتفاع متوسط ذرات بستر می‌باشد.

بر اساس توصیه‌ی انجمن مهندسان عمران آمریکا<sup>۳</sup> برای بیش‌تر مسائل عملی برای تعیین

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

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

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

که در آن‌ها  $C, f, n$  به ترتیب ضرایب مانینگ، دارسی - ویسباخ و شزی هستند.

$V$  = سرعت متوسط جریان  $[L/T]$ ،  $R$  = شعاع هیدرولیکی  $[L]$ ،  $S_f$  = شیب اصطکاک،  $g$  = شتاب ثقل،  $[L/T^2]$ ،  $K_n$  ضریبی است که در سیستم  $SI$  مقدار آن ۱ و در سیستم انگلیسی مقدار آن ۱/۴۸۶ می‌باشد.

ضرایب مقاومت در معادله‌های ۱ تا ۳ به صورت زیر با هم ارتباط دارند:

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

بنابراین با دانستن یکی از ضرایب مقاومت جریان طبق رابطه‌ی فوق می‌توان دیگر ضرایب زبری را تعیین کرد [۱۶].

مشکل اصلی در استفاده از معادلات مانینگ، شزی و دارسی - ویسباخ درستی تعیین ضرایب 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 تأثیر می‌گذارند، مشخص نمود. این عوامل عبارتند از [۱]:

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

به‌طور کلی انتظار می‌رود، مقدار ضریب اصطکاک دارسی - ویسباخ با افزایش زبری بستر و

1- Laminar Sub Layer

2- Johann Nikuradse

3- ASCE

دارند باعث افزایش مقاومت جریان و برخی هم برآند که بسته به شرایط جریان و غلظت بار معلق، افزایش یا کاهش ضریب اصطکاکی هر دو ممکن می‌باشد. ونونی و نومیکوز<sup>۸</sup> (۱۹۶۰) اثر بار معلق در بسترهای موج دار را با استفاده از آزمایش‌ها بررسی کردند. لین (۱۹۹۱) در تحقیقی اثر بار معلق روی مقاومت جریان در کانال روباز با بستر صاف یکنواخت و جریان‌های با بستر ماسه‌ای و بدون بستر ماسه‌ای در حال تعادل، را مورد مطالعه قرار داد.

در رابطه با اثر پوشش گیاهی بر ضریب زبری تحقیقات زیادی هم در خارج و هم داخل کشور صورت گرفته است. یکی از مدل‌های جدید برای محاسبه ضریب زبری پوشش‌های گیاهی غیر مستغرق مدل ارائه شده توسط فتحی مقدم (۱۹۹۶) و (۱۹۹۷) می‌باشد. برای ساخت این مدل ابتدا پارامترهای مهم انتخاب و با استفاده از آنالیز ابعادی مجموعه‌های بدون بعد تشکیل و نسبت عددی آن-ها با آزمایش و رگرسیون تعیین شده است. برای پوشش‌های گیاهان مستغرق در آب، کاون<sup>۹</sup> (۱۹۹۲) با مدل‌سازی زبری نسبی، روشی برای تخمین ضریب زبری ( $f$ ) پوشش‌های گیاهی مستغرق در کانالها و مجاری طبیعی ارائه نمود.

تحقیقات زیادی به منظور ایجاد روابطی برای نشان دادن تأثیر شکل سطح مقطع بر ضریب زبری انجام گرفت اما نتایج آن‌ها غیر قطعی بوده و هنوز روش کلی قابل قبولی در دست نیست.

همان‌گونه که ذکر شد در رابطه با اثر عوامل مختلف بر ضریب اصطکاک تحقیقات زیادی صورت گرفته ولی در مورد اثر شکل ذرات رسوبی بر آن مطالعه‌ای صورت نگرفته است؛ از این‌رو هدف اصلی این تحقیق انجام یک‌سری آزمایش در فلوم آزمایشگاهی با ذرات درشت دانه‌ی طبیعی و شکسته

ضریب زبری شزی (C) می‌توان از رابطه‌ی (۷) استفاده کرد [۳].

تاکنون مطالعات زیادی در مورد اثر عوامل مختلف از جمله، اندازه‌های ذرات رسوبی بستر و بدنه‌ی آبراهه بر ضریب زبری صورت گرفته است که می‌توان به استریکلر (۱۹۲۳)، میر پیتر مولر (۱۹۴۸)، کیولگان (۱۹۳۸)، هندرسن (۱۹۶۶)، هاگر (۱۹۹۹) اشاره نمود. اندرسون و همکاران<sup>۱</sup> (۱۹۷۰) با استفاده از داده‌های فلوم‌های آزمایشگاهی و رودخانه‌های طبیعی با سنگ‌های گردگوشه و زاویه-دار، جارت<sup>۲</sup> (۱۹۸۴) با استفاده از داده‌های رودخانه‌ی کلرادو برای تعیین ضریب زبری مانینگ روابطی ارائه کردند. افضل‌ی مهر و آنکتیل<sup>۳</sup> (۱۹۹۸) مقاومت جریان را در رودخانه‌های با بستر سنگریزه مورد مطالعه قرار دادند. مطیعی و همکاران (۱۳۸۴) رابطه‌ی ضریب زبری و اندازه‌ی قطر ذرات در آبراهه‌های با شیب تند را بررسی کردند.

در رابطه با اثر شیب بر ضریب زبری در سال ۲۰۰۳ هسل و جتن و گوانقو<sup>۴</sup> آزمایش‌هایی جهت تخمین ضریب زبری در شیب‌های تند انجام دادند [۵].

در مورد اثر بار معلق بر ضریب زبری جریان تحقیقات زیادی صورت گرفته است که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به تحقیقات ایتاکورا و کیشی<sup>۵</sup> (۱۹۸۰)، لین<sup>۶</sup> (۱۹۹۱)، خولار و همکاران<sup>۷</sup> (۲۰۰۲) اشاره نمود. طبق تحقیقات صورت گرفته اتفاق نظر قابل قبولی بین محققان در مورد اثر بار معلق بر مقاومت جریان وجود ندارد. بعضی از آنان معتقدند که حضور بار معلق باعث کاهش مقاومت جریان، بعضی‌ها باور

1- Anderson et al

2- Jarret

3- Afzalimehr and Anctil

4- Rudi Hessel and Victor Jetten and Zhang Guanghui

5- Itakura and Kishi

6- Lyn

7- Khullar and Kothari and Ranga Raju

8- Vanoni and Nomicos

9- Kouwen

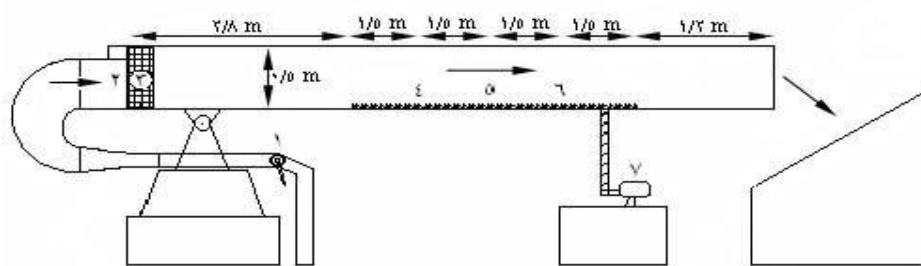
و مصنوعی کاملاً کرووی و مقایسه‌ی آنها با یک-دیگر می‌باشد.

**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 ۱۰ متر، عرض ۲۵ سانتیمتر، ارتفاع ۵۰ سانتیمتر و شیب ۰/۰۰۰۵ انجام گردید. در ابتدای فلوم ۲۵ سانتیمتری سه صفحه‌ی مشبک جهت مستهلک کردن انرژی جنبشی آب و کاستن شتاب جریان، قرار داده شد. جریان پس از عبور از این صفحات با طی یک مسافت تقریباً ۲/۸ متر به ابتدای سطح زبر قرار داده شده در بستر می‌رسید. طول بستر زبر در تمام آزمایش‌ها ثابت و برابر ۶ متر بود. جریان پس از عبور از روی بستر زبر پس از طی مسافت ۱/۲ متر به انتهای فلوم می‌رسید. جنس دیواره‌ی فلوم از شیشه بود و در همه‌ی آزمایش‌ها فقط بستر فلوم زبر گردید. در شکل ۱ نمای جانبی فلوم ۲۵ سانتیمتری و تجهیزات آن و محل قرارگیری رسوبات بستر نشان داده شده است.

برای انجام آزمایش ابتدا شیب فلوم در حد مورد نظر تنظیم سپس مصالح زبر یکنواخت در بازه-ی ۶ متری میانی فلوم قرار گرفته و تثبیت می‌شد؛ به گونه‌ای که با عبور جریان ذرات حرکتی نداشته باشند. آن‌گاه با روشن کردن پمپ دبی ورودی به فلوم توسط شیر ورودی به میزان دلخواه تنظیم می-گردید. پس از اطمینان از برقراری دبی مورد نظر و ثابت بودن شرایط جریان پارامترهای مختلف جریان، اندازه‌گیری شد. رقوم سطح آب در طول فلوم به خصوص بر روی بستر زبر در سیزده نقطه توسط رقوم سنج با دقت یک دهم میلی‌متر و سرعت جریان در مقطع وسط (فاصله‌ی ۳ متری از ابتدای بستر زبر) و در اعماق مختلف توسط دستگاه میکرومولینه با دقت ۰/۰۱ سانتیمتر بر ثانیه اندازه‌گیری شد. در همه‌ی آزمایش‌ها از دبی های ۷، ۱۶، ۲۵ و ۳۳ لیتر بر ثانیه استفاده شده است.

در این مطالعه از یازده نوع مصالح درشت دانه با دانه‌بندی یکنواخت ( $\sigma < 1/3$ ) به عنوان مصالح زبر استفاده گردید. مشخصات دانه‌بندی مصالح بستر در جدول ۱ آمده است. در شکل ۲ نمونه‌ای از رسوبات قرار گرفته در بستر فلوم ۲۵ سانتیمتری نشان داده شده است.

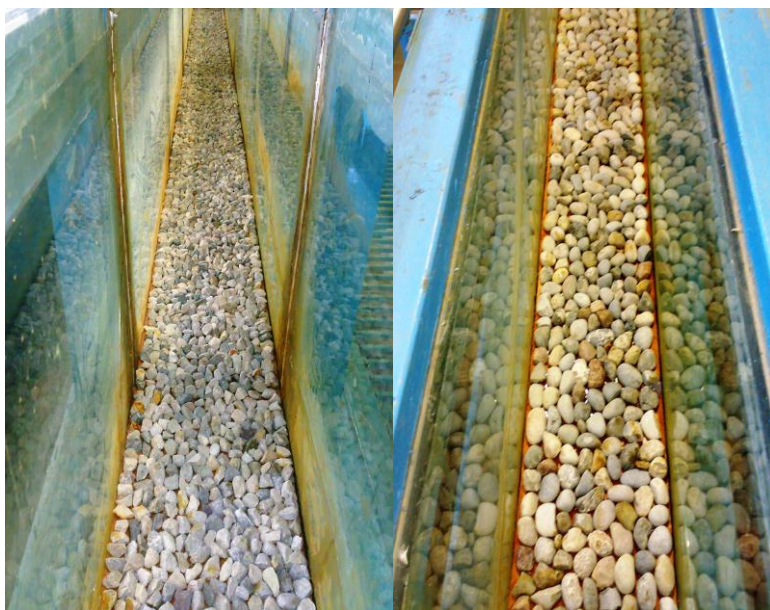


شکل ۱- فلوم ۲۵ سانتیمتری و محل قرارگیری رسوبات بستر

- ۱- شیر فلکه‌ی تنظیم دبی ورودی، ۲- ورودی فلوم، ۳- صفحات مشبک ابتدای فلوم، ۴- مقطع شماره ۱، ۵- مقطع شماره ۲، ۶- مقطع شماره ۱، ۳، ۷- دستگاه مکانیکی تغییر شیب فلوم

جدول ۱- مشخصات دانه بندی مصالح آزمایش

D <sub>50</sub> بر حسب میلیمتر	طبیعی	شکسته	کروی
27	A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>
21	A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>
16	A <sub>3</sub>	B <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>
11	A <sub>4</sub>	B <sub>4</sub>	-



شکل ۲- نمونه‌ای از رسوبات آزمایشی قرار گرفته در بستر فلوم

### محاسبات

برای محاسبه‌ی ضریب اصطکاک ( $f$ ) از رابطه‌ی دارسی- ویسباخ (رابطه‌ی ۲) استفاده می‌شود. مقدار شیب خط انرژی از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$S_f = S_0 + S_E \quad (8)$$

که در آن  $S_0$  شیب کف کانال می‌باشد و مقدار آن مشخص ( $S_0 = 0.0005$ ) است. مقدار  $S_E$  با توجه به رابطه‌ی زیر و مشخص بودن عمق و سرعت متوسط در مقاطع ۱ و ۳ به ازای هر دبی معین، قابل محاسبه است.

$$S_E = \frac{(Y_1 + \frac{V_1^2}{2g}) - (Y_3 + \frac{V_3^2}{2g})}{\Delta X} \quad (9)$$

که در آن  $Y_1 =$  عمق جریان در مقطع ۱،  $Y_3 =$  عمق جریان در مقطع ۳،  $V_1 =$  سرعت متوسط جریان در مقطع ۱،  $V_3 =$  سرعت متوسط جریان در مقطع ۳ و  $\Delta X =$  فاصله‌ی مقطع ۱ تا مقطع ۳ می‌باشد. مقدار  $\Delta X$  در این آزمایش‌ها سه متر بود. سرعت متوسط جریان در مقاطع ۱ و ۳ به ازای هر دبی معلوم، از تقسیم دبی جریان بر سطح مقطع جریان محاسبه می‌شود. در جدول ۲ نتایج محاسبه‌ی پارامترهای هیدرولیکی جریان آورده شده است.

جدول ۲- نتایج محاسبه‌ی پارامترهای هیدرولیکی جریان

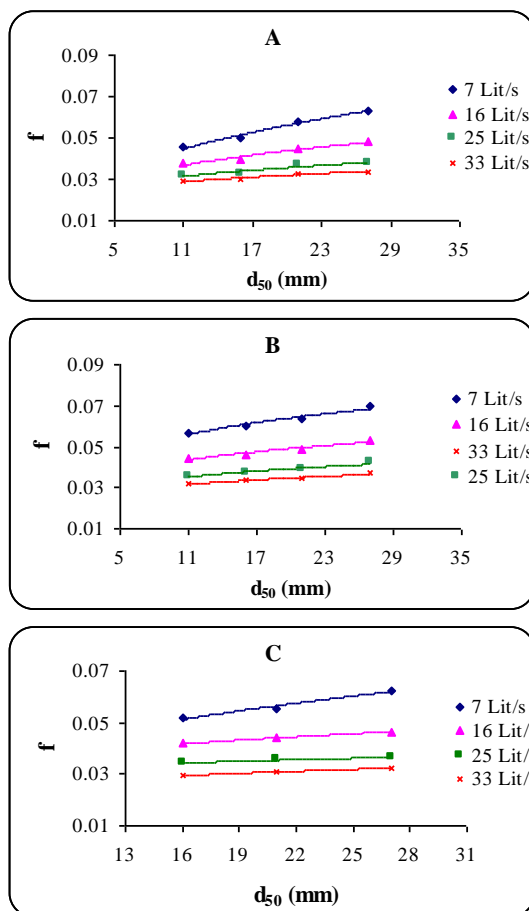
$f$	$S_f$	$S_E$	$V_3 (m/s)$	$Y_3 (m)$	$V_1 (m/s)$	$Y_1 (m)$	نوع رسوب	ردیف
0.045462	0.003294	0.002794	0.45653	0.06133	0.38464	0.07279	A1	1
0.037549	0.003957	0.003457	0.77211	0.08289	0.61216	0.10454	A1	2
0.031925	0.004364	0.003864	0.90845	0.11007	0.73369	0.13629	A1	3
0.028848	0.00451	0.00401	0.94303	0.13997	0.80233	0.16452	A1	4
0.049595	0.003666	0.003166	0.46458	0.06027	0.38179	0.07333	A2	5
0.039149	0.003882	0.003382	0.74453	0.08596	0.60574	0.10565	A2	6
0.032723	0.004245	0.003745	0.87019	0.11491	0.72477	0.13797	A2	7
0.030387	0.004693	0.004193	0.92891	0.14210	0.79182	0.16670	A2	8
0.058004	0.004036	0.003536	0.46258	0.06053	0.37369	0.07492	A3	9
0.04519	0.004432	0.003932	0.7759	0.08248	0.60042	0.10659	A3	10
0.036611	0.004787	0.004287	0.91141	0.10972	0.72330	0.13825	A3	11
0.032542	0.005069	0.004569	0.95366	0.13841	0.79326	0.16640	A3	12
0.063434	0.004132	0.003632	0.49502	0.05656	0.38724	0.07230	A4	13
0.04814	0.004692	0.004192	0.85628	0.07474	0.61193	0.10458	A4	14
0.038157	0.004968	0.004468	0.99362	0.10064	0.73063	0.13686	A4	15
0.033741	0.004974	0.004474	0.95856	0.13770	0.79728	0.16556	A4	16
0.056952	0.004072	0.003572	0.47084	0.05946	0.37720	0.07423	B1	17
0.044166	0.004374	0.003874	0.78002	0.08205	0.60289	0.10615	B1	18
0.035723	0.004623	0.004123	1.09529	0.0913	0.72421	0.13808	B1	19
0.031863	0.004799	0.004299	0.93723	0.14084	0.79299	0.16645	B1	20
0.059924	0.004052	0.003552	0.45764	0.06118	0.37083	0.07550	B2	21
0.046266	0.004452	0.003952	0.75777	0.08446	0.59521	0.10752	B2	22
0.037314	0.004794	0.004294	0.88708	0.11273	0.71661	0.13954	B2	23
0.033307	0.005048	0.004548	0.93339	0.14142	0.78568	0.16800	B2	24
0.063567	0.004129	0.003629	0.46317	0.06045	0.3723	0.07520	B3	25
0.04878	0.004482	0.003982	0.76646	0.0835	0.59683	0.10723	B3	26
0.038959	0.004757	0.004257	0.88899	0.11248	0.71809	0.13925	B3	27
0.034398	0.004937	0.004437	0.93062	0.14184	0.78700	0.16772	B3	28
0.069866	0.004313	0.003813	0.43613	0.0642	0.3548	0.07891	B4	29
0.0532	0.00489	0.00439	1.00344	0.06378	0.57415	0.11147	B4	30
0.042136	0.00523	0.00473	0.85134	0.11746	0.69434	0.1440	B4	31
0.037002	0.005333	0.004833	0.89732	0.14710	0.76320	0.17295	B4	32
0.051667	0.003627	0.003127	0.45513	0.06152	0.37734	0.07420	C1	33
0.041805	0.004248	0.003748	0.77375	0.08271	0.60472	0.10583	C1	34
0.034203	0.004516	0.004016	1.09330	0.09146	0.72745	0.13746	C1	35
0.029343	0.004458	0.003958	0.92860	0.14214	0.79718	0.16558	C1	36
0.055462	0.003782	0.003282	0.45583	0.06142	0.37481	0.07470	C2	37
0.043873	0.004182	0.003682	0.75696	0.08454	0.60186	0.10633	C2	38
0.035646	0.004478	0.003978	0.88778	0.11264	0.72479	0.13797	C2	39
0.031155	0.004654	0.004154	0.93348	0.14140	0.79475	0.16608	C2	40
0.0626	0.003936	0.003436	0.44714	0.06262	0.36725	0.07624	C3	41
0.046573	0.004355	0.003855	0.74707	0.08566	0.59441	0.10767	C3	42
0.036384	0.004615	0.004115	0.88029	0.11359	0.71893	0.13909	C3	43
0.032226	0.004713	0.004213	0.92651	0.14247	0.79028	0.16703	C3	44

### نتایج و بحث

عوامل متغیر اندازه‌گیری شده شامل: عمق جریان آب در ۱۳ مقطع و پروفیل سرعت در یک مقطع است. از طرفی با ۱ متغیر شیب، ۴ متغیر دبی و ۱۱ متغیر اندازه‌ی رسوبات بستر، جمعاً ۴۴ آزمایش انجام شد.

با توجه به محاسبات انجام شده، جریان در تمامی آزمایش‌ها زیر بحرانی بوده است و مقدار عدد رینولدز ( $Re_e$ ) بیش از ۱۸۰۰۰ و مقدار عدد رینولدز مرزی ( $Re_*$ ) محاسبه شده برای  $k_s = d_{50}$  و ضریب گرانروی سینماتیکی  $\nu = 1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  در محدوده‌ی ۱۵۵۰-۳۹۰ می‌باشد؛ پس جریان متلاطم زبر می‌باشد. در شکل ۳ تغییرات ضریب اصطکاک در مقابل اندازه‌ی متوسط ذرات بستر

( $d_{50}$ ) برای ذرات طبیعی نسبتاً گرد گوشه (A)، شکسته‌ی تیز گوشه (B) و ذرات مصنوعی کاملاً کروی (C) ترسیم شده است. با توجه به این شکل‌ها ملاحظه می‌شود که، به ازای یک دبی ثابت با بزرگ شدن اندازه‌ی ذرات مقدار ضریب اصطکاک ( $f$ ) نیز افزایش می‌یابد. همچنین به ازاء یک اندازه‌ی ثابت با افزایش دبی جریان مقدار ضریب اصطکاک ( $f$ ) کاهش می‌یابد. با دقت در شکل ۳ می‌توان دریافت که با افزایش دبی جریان روند تغییرات ضریب اصطکاک ( $f$ ) کاهش می‌یابد به گونه‌ای که در دبی  $7.43 \text{ L/s}$  بیش‌ترین روند تغییرات و در دبی  $33 \text{ L/s}$  کم‌ترین روند تغییرات را نشان می‌دهد.



شکل ۳- تغییرات ضریب اصطکاک داری- و سیبک در مقابل  $d_{50}$   
 A- ذرات طبیعی نسبتاً گرد گوشه B- ذرات شکسته‌ی تیز گوشه C- ذرات مصنوعی کاملاً کروی

به منظور بررسی اثر شکل ذرات رسوبی بستر بر روی ضریب اصطکاک ( $f$ ) نمودارهای  $f$  در مقابل  $k_s/Y$  به ازای دبی‌های مختلف برای رسوبات بستر با اندازه‌های یکسان در شکل ۴ نمایش داده شده است. همان‌گونه که نمودارها نشان می‌دهند، برای اندازه‌های یکسان، ضریب اصطکاک ( $f$ ) ذرات شن شکسته‌ی تیز گوشه بیش‌ترین مقدار را دارند. با شرایط یکسان هیدرولیکی خطوط جریان از سطح ذرات شکسته‌ی تیز گوشه نسبت به ذرات طبیعی نسبتاً گرد گوشه و ذرات مصنوعی کاملاً کرووی، زودتر جدا می‌شوند؛ یعنی نقاط جدایی<sup>۵</sup> در ذرات شکسته‌ی تیز گوشه نسبت به ذرات دیگر جلوتر اتفاق می‌افتند پس منطقه‌ی جداسازی ایجاد شده پشت هر ذره‌ی شکسته‌ی تیز گوشه بزرگ‌تر از ذرات دیگر می‌باشد. در نتیجه اختلاف فشار بین جلو و عقب ذره شکسته‌ی تیز گوشه بیش از ذرات دیگر است که باعث می‌شود نیروی درگ فشاری ذرات شکسته‌ی تیز گوشه از ذرات دیگر بیش‌تر باشد. در نتیجه نیروی درگ کل، برای بستر پوشیده از ذرات شکسته‌ی تیز گوشه بیش از ذرات طبیعی نسبتاً گرد گوشه و ذرات مصنوعی کاملاً کرووی می‌باشد و یا به عبارتی افت اصطکاک ذرات شکسته‌ی تیز گوشه از ذرات دیگر بیش‌تر است. نتایج هم چنین نشان می‌دهند که برای ذرات با اندازه‌های ۲۱ و ۲۷ میلی‌متر مقدار ضریب اصطکاک ( $f$ ) ذرات شن طبیعی نسبتاً گرد گوشه و ذرات مصنوعی کاملاً کرووی تقریباً برابر است. در اندازه‌ی ۱۶ میلی‌متر، مقدار ضریب اصطکاک ( $f$ ) ذرات شن طبیعی نسبتاً گرد گوشه کم‌تر از ذرات مصنوعی کاملاً کرووی می‌باشد؛ چون در اندازه‌ی ۱۶ میلی‌متر رسوبات طبیعی نسبت به ذرات کاملاً کرووی کشیده‌تر و پهن‌تر هستند و سطح عمود بر جریان این ذرات، نسبت به ذرات کاملاً کرووی کم‌تر است که باعث می‌شود تا

در طول یک بستر زبر در جهت جریان، هم نیروی درگ اصطکاک<sup>۱</sup> و هم نیروی درگ فشاری<sup>۲</sup> از سیال بر بستر اثر می‌کنند. با شرایط هیدرولیکی یکسان، هر چقدر اندازه‌ی 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 اصطکاک<sup>۱</sup> با بزرگ‌تر شدن اندازه‌ی ذرات بستر بزرگ‌تر می‌شود؛ در نتیجه نیروی کل درگ وارده از سیال بر بستر بزرگ‌تر می‌شود. پس افت جریان بیش‌تر می‌شود و به همین دلیل است که با شرایط هیدرولیکی یکسان با بزرگ‌تر شدن اندازه‌ی ذرات بستر، ضریب اصطکاک ( $f$ ) افزایش می‌یابد.

طبق محاسبات صورت گرفته با افزایش دبی، عمق و سرعت جریان افزایش می‌یابد. هر چه سرعت بیش‌تر شود (پروفیل سرعت ضخیم‌تر می‌شود) نقاط جدایی<sup>۳</sup> روی سطح ذره دیرتر اتفاق می‌افتند پس منطقه‌ی جداسازی<sup>۴</sup> تشکیل شده کوچک‌تر شده و در نتیجه نیروی درگ فشاری کاهش می‌یابد؛ از طرفی با افزایش سرعت و عدد رینولدز نیروی درگ اصطکاک<sup>۱</sup> هم کاهش می‌یابد. در نتیجه با افزایش دبی و عمق جریان نیروی درگ کل و در نتیجه ضریب اصطکاک ( $f$ ) کاهش می‌یابد.

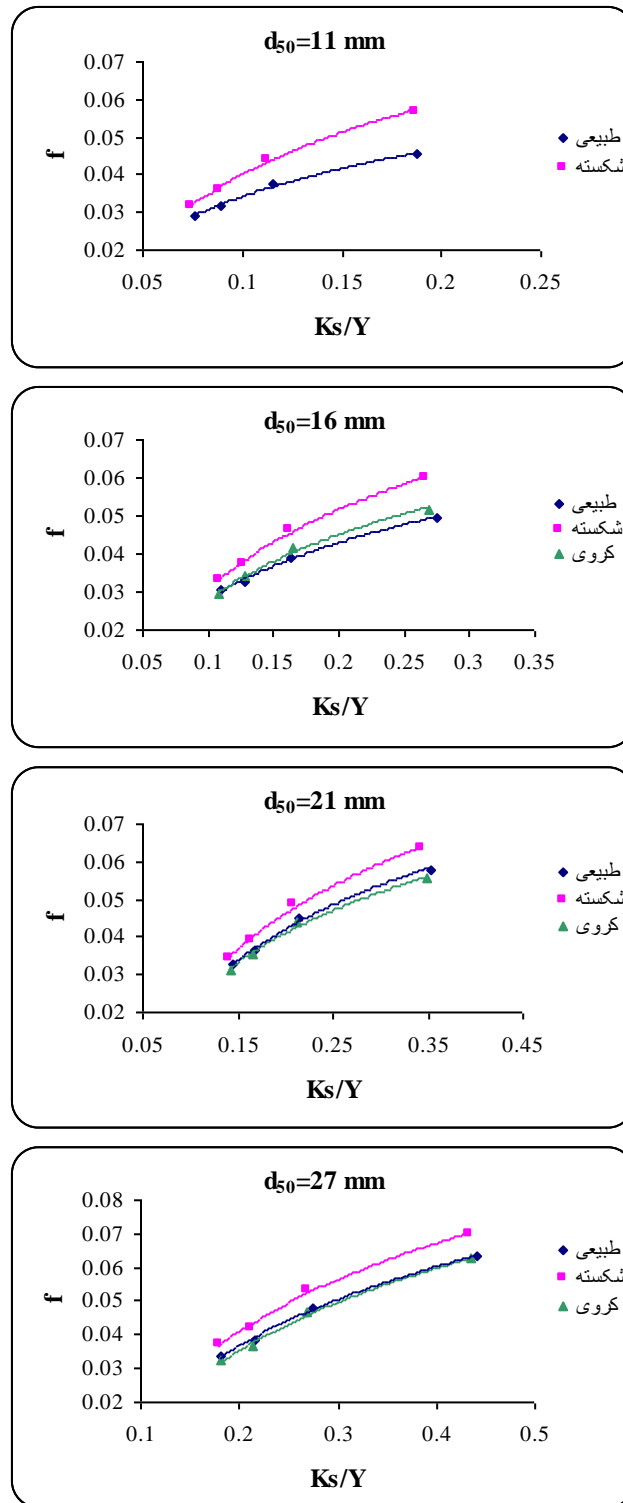
نتایج بر روی شکل ۳ نشان می‌دهد که ضریب اصطکاک ( $f$ ) تنها به اندازه‌ی ذرات بستگی ندارد و عواملی نظیر دبی جریان، عمق جریان، شعاع هیدرولیکی جریان، شکل ذرات رسوبی و غیره می‌توانند مؤثر باشند که در تحقیق حاضر اثر شکل این ذرات بر ضریب اصطکاک بررسی گردید.

- 
- 1- Skin Friction Drag
  - 2- Pressure Drag
  - 3- Separation Point
  - 4- Wake

---

5- Separation Point





شکل ۴- نمودارهای  $f$  در مقابل  $k_s / Y$  به ازای دبی‌های مختلف برای رسوبات با اندازه‌های یکسان

در نتیجه افت اصطکاکی کم‌تری ایجاد کنند. با بزرگ‌تر شدن اندازه‌ی رسوبات، کشیدگی ذرات شن

نیروی درگ فشاری ایجاد شده در اثر این نوع شکل ذرات نسبت به ذرات مصنوعی کاملاً کروی کم‌تر و

ذرات مصنوعی کاملاً کرووی بیش از ذرات طبیعی نسبتاً گردگوشه می‌شود.

#### استخراج رابطه

برای به‌دست آوردن رابطه‌ی ضریب اصطکاک ( $f$ ) سعی شده است از نتایج تحقیقات افضل‌ی مهر و آنکتیل (۱۹۹۸) و دیگر محققان استفاده شود؛ به همین دلیل علاوه بر پارامتر استغراق نسبی ( $Y/K_s$ ) از پارامتر مهم دیگری مانند عدد فرود ( $F_r$ ) در استخراج رابطه‌ی ضریب اصطکاک ( $f$ ) استفاده شده است. برای این منظور با استفاده از داده‌های جدول ۲ مقادیر پارامترهای بی بعد تعیین و سپس با استفاده از نرم افزار *SPSS* رابطه‌ی ضریب اصطکاک استخراج شد.

$$R^2 = 0.954 \quad (10)$$

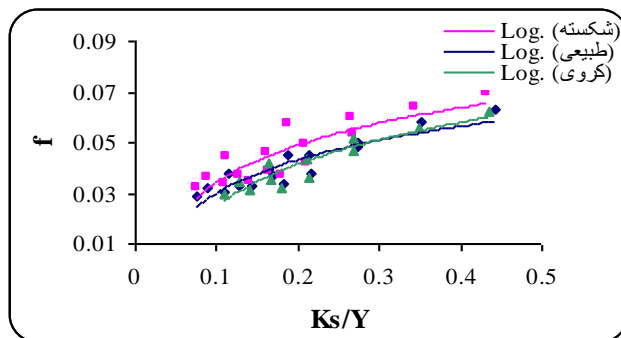
$$\sqrt{\frac{8}{f}} = 0.6274 \ln\left(\frac{Y}{d_{50}}\right) + 24.4834 F_r - 3.761$$

میانگین نسبی خطای ( $MARE$ ) رابطه‌ی فوق، ۲/۱۵۷ درصد می‌باشد.

طبیعی نسبتاً گردگوشه کمتر و کرویت آن‌ها بیشتر می‌شود و سطح عمود بر جریان این ذرات در برابر جریان، به ذرات مصنوعی کاملاً کرووی نزدیک‌تر می‌شود و به این دلیل است که، در اندازه‌های ۲۱ و ۲۷ میلی‌متر ضریب اصطکاک ( $f$ ) ذرات طبیعی نسبتاً گردگوشه و ذرات مصنوعی کاملاً کرووی تقریباً برابر می‌شوند.

با ملاحظه نمودارها می‌توان استنباط کرد که با بزرگ‌تر شدن اندازه‌ی رسوبات بستر، مقدار ضریب اصطکاک ( $f$ ) ذرات شن شکسته‌ی تیزگوشه به ذرات طبیعی نسبتاً گردگوشه نزدیک‌تر می‌شود؛ زیرا با بزرگ‌تر شدن ذرات شکسته‌ی تیزگوشه، تعداد زوایای شکسته و تیز آن‌ها کمتر و کوچک‌تر می‌شود؛ پس منطقه‌ی جداشدگی<sup>۱</sup> پشت ذرات شکسته تیزگوشه با بزرگ‌تر شدن آن‌ها کوچک‌تر می‌شود در نتیجه مقدار افت ناشی از ذرات شکسته تیزگوشه با بزرگ‌تر شدن آن‌ها به ذرات طبیعی نسبتاً گردگوشه نزدیک‌تر می‌شود. به عبارتی با بزرگ‌تر شدن اندازه‌ی رسوبات بستر مقادیر ضریب اصطکاک ( $f$ ) رسوبات با اشکال مختلف به یکدیگر نزدیک‌تر می‌شود و اثر شکل ذرات رسوبی بر روی ضریب اصطکاک ( $f$ ) در اندازه‌های کوچک‌تر، قابل توجه‌تر است.

در شکل ۵ همه ذرات رسوبی مورد استفاده در آزمایش‌ها، نشان داده شده است. شکل ۵ نشان می‌دهد که ذرات شکسته‌ی تیزگوشه بیش‌ترین مقدار ضریب اصطکاک ( $f$ ) و ذرات مصنوعی کاملاً کرووی کم‌ترین مقدار ضریب اصطکاک ( $f$ ) را دارند هر چقدر  $k_s/Y$  بیش‌تر می‌شود مقادیر ضریب اصطکاک ذرات طبیعی نسبتاً گردگوشه و ذرات مصنوعی کاملاً کرووی به هم نزدیک می‌شود و برای  $k_s/Y \geq 0.33$  مقدار ضریب اصطکاک



شکل ۵- مقادیر  $f$  در مقابل  $k_s / Y$  برای همه‌ی ذرات رسوبی

ذرات طبیعی نسبتاً گردگوشه وجود دارد ولی در رسوبات با اندازه‌های ۲۷ میلی‌متر ضریب اصطکاک ( $f$ ) ذرات طبیعی نسبتاً گردگوشه و ذرات مصنوعی کاملاً کروی تقریباً برابرند و ضریب اصطکاک ( $f$ ) ذرات شکسته‌ی تیزگوشه کم‌ترین اختلاف را با ذرات مذکور دارد.

#### تشکر و قدردانی

این مطالعه با حمایت مالی از محل پژوهانه-ی نویسنده‌ی دوم انجام شده است که بدین وسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران تشکر و قدردانی می‌شود.

#### علائم و نشانه‌ها

- $n$ : ضریب زبری مانینگ
- $C$ : ضریب زبری شزی
- $f$ : ضریب اصطکاک داریسی-ویسباخ
- $V$ : سرعت متوسط جریان
- $S_0$ : شیب بستر آبراهه
- $R$ : شعاع هیدرولیکی جریان
- $Y$ : عمق جریان
- $g$ : شتاب ثقل زمین
- $S_f$ : شیب خط انرژی جریان
- $R_e$ : عدد رینولدز

#### نتیجه‌گیری و پیشنهادات

با توجه به نتایج به‌دست آمده برای ذرات با اندازه‌های یکسان، مقدار ضریب اصطکاک ( $f$ ) ذرات شن شکسته‌ی تیزگوشه از ذرات طبیعی نسبتاً گردگوشه و ذرات مصنوعی کاملاً کروی بیش‌تر است.

با توجه به شکل ۴ در رسوبات با اندازه‌ی ۱۶ میلی‌متر مقدار ضریب اصطکاک ( $f$ ) ذرات شن طبیعی نسبتاً گردگوشه کم‌تر از ذرات مصنوعی کاملاً کروی می‌باشد ولی در اندازه‌های ۲۱ و ۲۷ میلی‌متر مقدار ضریب اصطکاک ( $f$ ) ذرات شن طبیعی نسبتاً گردگوشه و ذرات مصنوعی کاملاً کروی تقریباً برابرند. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهند که با بزرگ‌تر شدن اندازه‌ی رسوبات بستر، مقدار ضریب اصطکاک ( $f$ ) ذرات شن شکسته‌ی تیز گوشه به ذرات طبیعی نسبتاً گردگوشه نزدیک‌تر می‌شود.

به‌طور کلی می‌توان گفت که با بزرگ‌تر شدن اندازه‌ی رسوبات بستر مقادیر ضریب اصطکاک ( $f$ ) رسوبات با اشکال مختلف به یک-دیگر نزدیک‌تر می‌شوند و اثر شکل ذرات رسوبی بر روی ضریب اصطکاک ( $f$ ) در اندازه‌های کوچک-تر، قابل توجه‌تر است؛ به گونه‌ای که در رسوبات با اندازه‌های ۱۱ میلی‌متر اختلاف قابل توجهی بین ضریب اصطکاک ( $f$ ) ذرات شکسته‌ی تیزگوشه و

$R_{e*}$ : عدد رینولدز ——— ریزی  
 $U$ : لزوجت کنماتیک سیال  
 $k_s$ : اندازه‌ی متوسط ذرات بستر  
 $\frac{Y}{k_s}$  و  $\frac{R}{k_s}$ : استغراق نسبی

$d_{50}$ : اندازه‌ی ذره‌ی ای که ۵۰ درصد وزنی ذرات از آن کوچک‌ترند.

### منابع

- ۱- شفاعی بجستان، م. مترجم. (۱۳۸۳). "جریان در کانال‌های باز". اهواز، انتشارات دانشگاه شهید چمران، چاپ اول، ص ۴۶۰.
- ۲- شفاعی بجستان، م. (۱۳۸۷). "مبانی نظری و عملی هیدرولیک انتقال رسوب". اهواز، انتشارات دانشگاه شهید چمران، چاپ اول، ویرایش دوم، ص ۵۴۹.
- ۳- محمودیان شوشتری، م. (۱۳۸۵). "اصول جریان در مجاری باز". اهواز، انتشارات دانشگاه شهید چمران، جلد اول، چاپ اول، ص ۴۸۶.
- ۴- مطیعی، م. صانعی، م و طباطبایی، م. (۱۳۸۴). "بررسی آزمایشگاهی رابطه‌ی ضریب زبری و اندازه‌ی قطر ذرات در آبراهه‌های با شیب تند". کرمان، پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران.
- ۵- همایون، ر. (۱۳۸۷). "مطالعه‌ی اثر عمق جریان بر ضریب زبری مانینگ در بسترهای با زبری متفاوت". پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.
- 6- Afzalimehr, H. and Anctil, F. (1998). "Estimation of Gravel-Bed River Flow Resistance". Journal of Hydraulic Engineering, Vol, 124, No.10.
- 7- Anderson, A. G. Paintal, A. S. and Davenport, J. T. (1970). "Tentative design procedure for riprap lined channels". NCHRP Rep. 108, Hwy. Res. Board, Nat. Acad. Of Sci.–Nat. Acad. Of Engrg., Washington, D.C.
- 8- Fathi Moghadam, M. (1996). "Momentum Absorption in Non-rigid Non-submerged, tall Vegetation along Rivers". Ph.D. Thesis, university of Waterloo, Canada.
- 9- Fathi-Moghadam, M. and Kouwen, N. (1997). "Nonrigid, nonsubmerged, vegetative roughness on floodplains". Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 123(1), 51-57.
- 10- Itakura, T. and Kishi, T. (1980). "Open Channel flow with suspended sediments". Journal of Hydraulic Engineering, ASCE 106(8), pp 1325-1343.
- 11- Jarret, R. D. (1984). "Hydraulics of High Gradient Streams". Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 110, PP 1519- 1539.
- 12- Khullar, N. K. Kothiyari U. C. and Ranga Raju, K. G. (2002). "The effect of suspended sediment on flow resistance". 5<sup>th</sup> International conference on hydro-science and engineering, September, 18-21, Warsa, Poland.

- 13- Kouwen, N. (1992). "Modern Approach to Design of Grassed channels". Journal of Irrigation and Drainage Eng. ASCE, 118(5). PP 733-743.
- 14- Lyn, D. A. (1991). "Resistance in Flat- Bed Sediment- Laden Flows". Journal of Hydraulic Engineering, VOL 117(1), January: 94-114.
- 15- Vanoni, V. A. and Nomecos, G. N. (1960). "Resistance Properties of Sediment Laden Streams". Trans, Am, Soc, Civ . Engrs, ASCE, PP 1140-1175.
- 16- Yen, B. C. (2002). "Open Channel Flow Resistance". Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 128, No. 1, PP 20-39.

