

بررسی آزمایشگاهی اثر ارتفاع، تراکم و آرایش اجزاء زبری بر ضریب زبری مانینگ

نسترن پورنگ^{1*}، سید محمود کاشفی پور²

تاریخ دریافت: 93/09/24 تاریخ پذیرش: 94/12/10

¹- کارشناس ارشد سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

²- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: marypourang67@gmail.com

چکیده

در بررسی و تحلیل هیدرولیکی کانال‌های باز تعیین مقاومت جریان امری ضروری است. اغلب برای توصیف مقاومت جریان یا زبری نسبی یک آبراهه یا دشت سیلابی از ضریب زبری مانینگ استفاده می‌شود. در این تحقیق اثر اندازه، درصد تراکم و آرایش زبری‌های مکعبی مصنوعی بر ضریب زبری مانینگ بررسی شد. مجموعاً 48 آزمایش با 3 ارتفاع متغیر زبری (5، 10 و 15 میلی‌متر)، 2 درصد تراکم زبری (25 و 50 درصد)، 2 نوع آرایش زبری (منظم و شطرنجی)، 4 مقدار متغیر دبی جریان روی کف زبر و 4 آزمایش با کف صاف در یک فلوم آزمایشگاهی انجام پذیرفت. مطابق برنامه آزمایش‌ها طولی به اندازه 3/7 متر از کف فلوم به‌عنوان بستر زبر طراحی گردید. نتایج نشان داد که اثر نوع آرایش زبری بر تغییر ضریب زبری مانینگ بیشتر از اثر ارتفاع و تراکم زبری هست. همچنین مقدار متوسط ضریب زبری مانینگ (n) از 0/009 در سطح صاف به 0/0132 در آرایش منظم و 0/0175 در آرایش شطرنجی افزایش یافت. در نهایت به‌منظور مقایسه با نتایج سایر محققان، روابطی برای برآورد ضریب دارسی-ویسباخ (f) بر اساس درصد تراکم زبری (C) در کف، استغراق نسبی (y/k_s)، عدد فرود جریان (F_r) و فاکتور مرتبط با آرایش زبری‌ها (ϵ) ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: استغراق نسبی، ضریب دارسی-ویسباخ، کانال باز

Laboratory Investigation on the Effect of Height, Density and Arrangement of Artificial Roughness Elements on Manning Roughness Coefficient

N Pourang^{1*}, M Kashefipour²

Received: 15 December 2014 Accepted: 29 February 2016

¹ M.Sc. Graduate., Dept. of Water Struc., Faculty of Water Sciences Engin., Univ. of Shahid Chamran of Ahvaz, Iran

² Prof., Dept. of Water Struc., Faculty of Water Sciences Engin., Univ. of Shahid Chamran of Ahvaz, Iran

*Corresponding Author, Email: marypourang67@gmail.com

Abstract

Determination of flow resistance is an essential parameter for studying and hydraulic analysis of the open channels. Manning roughness coefficient is often be used for description flow resistance or relative roughness of a channel or floodplain. This research was focused on the effect of the height, density and arrangement of the artificial cubic roughness elements on Manning roughness coefficient. In total 48 experiments were conducted with three values of roughness height (5, 10 and 15 mm), two percentages of roughness density (25% and 50%), two types of roughness arrangement (regular and staggered patterns), four flow discharge values on rough bed and four experiments with smooth bed in a laboratory flume. A length of 3.7 meter of the flume bed was designed as the rough bed according to the experiments plan. The results showed that the influence of the roughness arrangement on changing the value of Manning roughness coefficient (n) is more than the influence of the height and density of roughness. Also the mean value of Manning coefficient increased from 0.009 in smooth bed to 0.0132 in regular pattern and 0.0175 in staggered pattern. At last in order to compare with the results of previous works, some relationships have been offered in order to estimate the Darcy-weisbach coefficient (f) on the basis of the roughness density percentage at the bottom (C), relative submergence (y/k_s), Froude number of flow (F_r) and a factor related to roughness arrangement (ϵ).

Keyword: Darcy-weisbach coefficient, Open channel, Relative submergence

مقدمه

زبری دارسی-ویسباخ (f) وجود دارد. هر سه این

ضرایب به نوعی ضرایب مقاومت جریان هستند که در معادلات حاکم بر جریان در رودخانه‌ها کاربرد فراوانی دارند.

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

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

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

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

محاسبه ضریب زبری از مهم‌ترین پارامترهای ورودی در مطالعه و طراحی کانال‌های باز هست. طراحی کانال‌های پایدار و سازه‌های مربوط به آن، تخمین دبی جریان، تعیین سرعت حمل رسوب و غیره از جمله موارد کاربرد آن هست. همچنین تعیین صحیح ضریب زبری برای جریان تأثیر به‌سزایی در مطالعات هیدرولیکی (شامل رسم هیدروگراف‌ها) و در کاهش هزینه‌ها از نظر اقتصادی دارد (چاو 1959).

برای تخمین مقاومت جریان در مجاری باز از روابط مانینگ، شزی و دارسی-ویسباخ استفاده می‌شود که در این روابط پارامترهایی چون ضریب زبری شزی (C)، ضریب زبری مانینگ (n) و ضریب

سنگدانه رودخانه‌ای به قطرهای متوسط 17/5, 11/4, 35 میلی‌متر در دو نوع آرایش قطری و مربعی برای زبری‌ها استفاده کرد. در شبکه مربعی عنصرهای زبری در فواصل مساوی از هم در یک ردیف عرضی و طولی در کف و جداره قرار گرفته درحالی‌که در آرایش قطری، یک عنصر در مرکز هر شبکه مربعی قرار می‌گیرد. با استفاده از پروفیل سطح آب برداشت‌شده، ضریب زبری مانینگ در فاصله بین هر دو بازه محاسبه و یک رابطه مشخص برای ضریب زبری مانینگ ارائه شد.

بهرامی و شفافی بجستان (1389) به‌منظور بررسی آزمایشگاهی اثر رسوبات درشت‌دانه کف کانال بر ضریب مقاومت جریان از 8 نوع رسوب درشت‌دانه شامل 4 نوع رسوب طبیعی نسبتاً گردگوشه و 4 نوع رسوب شکسته تیزگوشه با اندازه متوسط (11, 16, 21, 27) میلی‌متر در کانالی به عرض 0/25 متر استفاده نمود. طول کف زیر شده برابر با 6 متر در نظر گرفته شد. وی در نهایت رابطه 8 را برای تعیین ضریب مقاومت جریان ارائه نمود:

$$\frac{8}{f} = 0.7523 \ln\left(\frac{y}{d_{50}}\right) + 23.605 F_r - 3.515 \quad [8]$$

که در آن y عمق متوسط جریان و d_{50} اندازه متوسط و ذرات بستر و F_r عدد فرود جریان هست. سایره و آلبرتسون (1961) با بررسی اثر آرایش و ارتفاع زبری بر مشخصات جریان در یک فلوم آزمایشگاهی با شیب‌های 0/001 تا 0/003 رابطه لگاریتمی مقاومت جریان را که هم اثرات ارتفاع و هم آرایش زبری‌ها را در بردارد، به‌صورت زیر ارائه دادند:

$$\frac{8}{f} = 2.146 \ln\left(\frac{y}{k_s}\right) + 0.013C - 3.2\epsilon + 13.4F_r + 5.931 \quad [9]$$

کلوسس (1962) با استفاده از زبری‌های مکعبی شکل با ابعاد 1/5 سانتی‌متر و تراکم‌های 0/11، 0/25، 0/44 و 0/7 به بررسی اثر ارتفاع و تراکم زبری بر مقاومت جریان پرداخت. در نتایج وی اندازه زبری

که در این روابط n ضریب زبری مانینگ، f ضریب زبری دارسی - ویسباخ، C ضریب زبری شزی، V سرعت متوسط جریان (L/T) ، R شعاع هیدرولیکی (L) ، S_f شیب‌خط انرژی، g شتاب ثقل (L/T^2) و K_n ضریبی است که در سیستم متریک مقدار آن برابر با 1 و در سیستم انگلیسی برابر با 1/486 هست.

ضرایب مقاومت در معادله‌های 1 تا 3 به‌صورت زیر با هم رابطه دارند:

$$\frac{8}{f} = \frac{n \sqrt{g}}{R^{1/6} K_n} = \frac{\sqrt{g}}{C} = \frac{\sqrt{gRS_f}}{V} = \frac{V}{u_*} = \sqrt{\frac{8}{f}}, f = \frac{8gn^2}{R^{1/3}} \quad [4]$$

که $u_* = \sqrt{gRS_f}$ سرعت برشی جریان هست.

به‌این‌ترتیب با دانستن یکی از ضرایب مقاومتی جریان، دیگر ضرایب زبری را می‌توان طبق رابطه فوق تعیین کرد (دین 2002).

جریان ورقه‌ای در مجاری روباز به‌ندرت اتفاق می‌افتد و از دید عملی می‌توان گفت که به‌طورکلی در آبراهه‌ها جریان متلاطم و به‌لحاظ هیدرولیکی زبر است. ضریب زبری دارسی-ویسباخ در جریان‌های متلاطم زبر بر اساس آزمایش‌های نیکورادزه، از رابطه زیر محاسبه می‌شود (محمودیان شوشتری 1385):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{C}{\sqrt{8g}} = 2 \text{Log} \frac{\hat{e} 12 R \hat{u}}{\hat{e} k_s \hat{u}} \quad [5]$$

معادله توزیع سرعت در جریان متلاطم، خارج از زیر لایه ورقه‌ای که از نظریه طول اختلاط پرانتل پیروی می‌کند، بر اساس مطالعات نیکورادزه به‌شکل زیر است:

$$\frac{V}{u_*} = 5.75 \text{Log} \frac{y}{k_s} + 8.5 \quad [6]$$

کیولگان با انتگرال‌گیری از رابطه فوق، معادله زیر را برای تعیین سرعت متوسط در جریان‌های متلاطم زبر به‌دست آورد:

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{V}{u_*} = 5.75 \text{Log} \frac{R}{k_s} + 6.25 \quad [7]$$

تدین فر و فغفور مغربی (1388) به‌منظور بررسی اثر توزیع عنصرهای زبری بر ضریب زبری مانینگ جهت زبر کردن جداره و کف فلوم آزمایشگاهی از مصالح

که در آن y/D_{84} استغراق نسبی هست. اسکرودر (1990) با استفاده از عنصرهای زبری به شکل‌های (مکعبی، کنگره‌دار، کروی و گنبدی) نتیجه گرفت که زبری نسبی (k_s/y) وابسته به شکل زبری‌ها و درصد تراکم آن‌ها (C) هست. یانگ و همکاران (2011) اثر زبری بر مقاومت جریان در یک کانال یا بستر شنی متحرک را بررسی کرده و بیان می‌کند که نیروی مقاومتی جریان تابعی از دو نیروی دراگ و اصطکاک سطحی هست. با توجه به اهمیت عدد رینالدز علاوه بر اندازه زبری در رژیم جریان بینابین ($4 \times 10^3 \leq k_s/\nu \leq 10^4$) رابطه زیر را برای فاکتور اصطکاکی (f) در محدوده رژیم جریان بینابین ارائه نمود:

$$f = b_0 \left(\frac{y}{d_{50}} \right)^{b_1} (\log R)^{b_1} \quad [13]$$

قابل ذکر است که $\pi (L^2/T)$ ضرایب لزوجت سینماتیکی هست، به علاوه (y/d_{50}) استغراق نسبی و ضرایب b_0, b_1 بر اساس روش کمینه مربعات محاسبه و به ترتیب دارای مقدار 1/0083 و -0/662 هستند. هاتاف (2012) با بررسی اثر شکل زبری بر مقاومت جریان اذعان کرد که مقدار زبری نسبی (k_s/y) در مورد عنصرهای زبری تیز گوشه حدود 10 (در دامنه 8-12) و برای عنصرهای زبری گرد گوشه مقدار زبری نسبی بین 4 و 5 (یعنی حدود نصف مقدار قبلی) هست. به علاوه ارتفاع معادل زبری (k_s) وابسته به شکل و ارتفاع زبری‌ها هست، به نحوی - که در مورد زبری‌های تیز گوشه به این علت که منطقه جداشدگی ایجاد شده پشت هر ذره تیز گوشه بزرگتر از ذرات دیگر هست، نیروی دراگ فشاری ذرات تیز گوشه بیشتر از ذرات دیگر و در نتیجه بیشترین k_s را دارند.

کریستودولو و همکاران (2013) به منظور بررسی اثر شکل زبری بر مقاومت جریان در یک کانال با عرض 0/25 متر و شیب تند 16/5 درصد در محدوده اعداد فرود 1/5-2 و استغراق نسبی 1/5-3/5، از 8 نوع عنصر

معادل تابعی از درصد تراکم زبری‌ها در نظر گرفته شد. وی در نهایت رابطه زیر را برای مقاومت جریان در نظر گرفت:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \text{Log} \frac{4y}{k_s} + 11C \quad [10]$$

هریچ و شالیتز (1964) با مطالعه بر روی زبری‌های مکعبی با ارتفاع 15 سانتی‌متر در یک کانال آزمایشگاهی با 1/68 متر عرض و شیب کف 0/003 تا 0/03، پارامتر q (نسبت سطحی از پلان که توسط عنصرها اشغال شده بر واحد سطح کف کانال) را معرفی کردند. در مورد زبری‌های مکعبی شکل، q معادل با درصد تراکم زبری‌ها در پلان (C) هست.

اولقیان و مکدونالد (1964) آزمایش‌هایی را با استفاده از زبری‌های مکعبی مصنوعی با اندازه 1/27 سانتی‌متر در یک فلوم با عرض 0/61 انجام دادند. طول کف زبر شده برابر با 10 متر در نظر گرفته شد. ایشان اعتبار قانون لگاریتمی را در بیان فاکتور اصطکاکی (f) مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که چنانچه استغراق نسبی جریان (y/k_s) بیشتر از 3 باشد، مقادیر فاکتور اصطکاکی f را به خوبی می‌توان با رابطه لگاریتمی بیان نمود. همچنین بر اساس نتایج آزمایش‌های خود و دیگر محققان بیان کردند که در تراکم 20 درصد از زبری‌ها مقاومت جریان بیشترین مقدار را دارد. وی رابطه زیر را برای مقاومت جریان ارائه داد:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 0.88 \text{Ln} \left(\frac{11y}{k_s} \right) \quad [11]$$

باتورث (1985) با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده از رودخانه‌های کوهستانی انگلستان با شیب‌های 0/004 تا 0/04 و $y/D_{84} < 10$ رابطه مقاومت جریان را با استفاده از متغیر ضریب زبری داریسی-ویسباخ (f) به صورت زیر ارائه کرد:

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = 5.62 \log \left(\frac{y}{D_{84}} \right) + 4 \quad [12]$$

است. در این تحقیق اثر ارتفاع، تراکم و نوع آرایش زبری‌های مصنوعی بر ضرایب مقاومت جریان بررسی شده است. با توجه به مطالعات انجام گرفته بیشتر روابط مقاومتی موجود، روابطی هستند که در آن‌ها ضریب زبری داری-ویسباخ تابعی از پارامترهای هیدرولیکی و متغیرهای زبری معرفی شده است. به این منظور جهت مقایسه نتایج این تحقیق با سایر محققان، روابط در تحقیق حاضر بر اساس ضریب زبری داری-ویسباخ ارائه شده‌اند.

تحلیل ابعادی

از آنجاکه در این مرحله برای رسیدن به اهداف این تحقیق باید پارامترهای بی بعد مؤثر بر ضریب زبری مانینگ (n) را تعیین کنیم. از این رو از تحلیل ابعادی استفاده می‌شود، متغیرهای مؤثر بر ضریب زبری مانینگ (n) عبارت‌اند از:

$$n = f(r, V, y, m, d, g, b, k_s, S_0, C, \epsilon) \quad [15]$$

که در آن n ضریب زبری مانینگ، V سرعت متوسط جریان، y عمق جریان، r جرم واحد حجم آب، m ضریب لزوجت دینامیکی آب، d کشش سطحی، g شتاب ثقل زمین، b عرض فوم و برابر با 0/3m و S₀ شیب کف کانال که در این تحقیق مقدار آن ثابت در نظر گرفته شد (S₀ = 0/00055) k_s ارتفاع زبری، C تراکم زبری بر حسب درصد و ε فاکتور مربوط به نوع آرایش زبری‌ها هست که بزرگتر از 1 و برابر با نسبت فاصله قطری عنصرهای زبری در دو ردیف عرضی مجاور هم در آرایش منظم (با توجه به شکل 2) به همین فاصله در آرایش شطرنجی در هر تراکم ثابت هست.

با به کار بردن نظریه باکینگهام و انتخاب 3 متغیر r, V, y به عنوان متغیرهای تکراری می‌توان رابطه بی بعد زیر را استخراج نمود:

$$n = f(Re, We, Fr, \frac{k_s}{y}, C, \epsilon) \quad [16]$$

که در آن Re = rVy/m عدد رینولدز، عدد وبر Fr = v/√gy عدد فرود جریان، We = rV²l/s

زبری با شکل‌های مختلف مکعبی، نیم مکعب، زبری‌های گوشه‌دار، استوانه‌ای و نیم‌کره‌ای استفاده نمود. طول کف زبر شده برابر با 3/55 متر در نظر گرفته شد. از آنجاکه زبری کف بزرگتر از زبری دیواره‌ها هست، برای بهتر منظور کردن اثرات زبری کف می‌توان یک مقدار معادل n_b که هم اثرات زبری کف و هم دیواره را در بردارد را به صورت زیر ارائه کرد:

$$n_b^{3/2} = n^{3/2} \left(1 + \frac{2y}{b}\right) - n_w^{3/2} \left(\frac{2y}{b}\right) \quad [14]$$

که در آن y عمق جریان، b عرض کف کانال، n_w ضریب زبری کف، n ضریب زبری دیواره برابر با 0/01 در یک سطح صاف و n ضریب زبری مانینگ کل که از رابطه مانینگ حاصل شده است هست.

ابراهیم و عبدالمجید (2014) اثر دبی و عمق پایاب روی ضریب زبری مانینگ در 6 نوع زبری (پوشش گیاهی از نوع علف هرز، شن، سیمان، مخلوطی از شن و ماسه، بلوک‌های سیمانی، نوعی ماده پلاستیکی) در کانالی به عرض و عمق 0/6 متر و شیب 0/03 را مورد بررسی قرار دادند. طول کف زبر شده برابر با 8 متر در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که ضریب زبری مانینگ با دبی رابطه عکس داشته به نحوی که مقدار این ضریب برای دبی‌های 10 و 40 لیتر بر ثانیه به ترتیب برابر با 0/03 و 0/01 هست. کمترین و بیشترین مقدار این ضریب به ترتیب مربوط به نوعی ماده پلاستیکی و پوشش گیاهی مصنوعی اندازه‌گیری شد. به علاوه در هر 6 نوع زبری، کمترین و بیشترین مقدار این ضریب، به ترتیب در اعماق پایاب 0/15 و 0/3 متر گزارش شده است.

در مرحله طراحی پروژه‌های عمرانی تخمین ضریب زبری مانینگ برای محاسبه دقیق و واقعی دبی، سرعت و عمق جریان ضروری است. تاکنون در رابطه با چگونگی توزیع زبری در کف کانال و تأثیر آن بر کمیت‌های مختلف جریان تحقیقات اندکی انجام شده

هست (به نقل از شفاعی بجزستان 1387). بر این اساس طول بستر زبر شده در همه آزمایش‌ها ثابت و برابر با 3/7 متر در نظر گرفته شد. جریان پس از عبور از بستر زبر با طی یک مسافت تقریباً 5/3 متری به انتهای فلوم می‌رسید. جنس دیواره فلوم از شیشه و در همه آزمایشات فقط کف فلوم زبر می‌شد. برای انجام آزمایش‌ها ابتدا کف زبر آماده شده در بازه 3/7 متر میانی تثبیت می‌شد به گونه‌ای که با عبور جریان حرکتی نداشته باشد. آنگاه با روشن کردن پمپ دبی ورودی به فلوم توسط شیر ورودی به میزان دلخواه تنظیم می‌گردید. رقوم سطح آب در طول فلوم به خصوص بر روی بستر زبر در 10 نقطه توسط رقوم سنج با دقت 0/1 میلی‌متر و پروفیل سرعت جریان توسط سرعت‌سنج Dop 2000 در 3 مقطع، مقطع اول با 60 سانتی‌متر فاصله از ابتدای کف زبر شده در بالادست کف زبر شده، مقطع دوم وسط کف زبر شده و مقطع سوم با 60 سانتی‌متر فاصله از انتهای کف زبر شده در پایین‌دست طول زبر شده اندازه‌گیری شد. در همه آزمایش‌ها از دبی‌های 18، 11، 5 و 27 لیتر بر ثانیه استفاده گردید. در این تحقیق ارتفاع معادل زبری برابر با اندازه عنصرها انتخاب گردید. به منظور آسان‌تر شدن ارجاع به آزمایش‌ها، نشانه‌گذاری مطابق جدول 1 انجام شده است. شکل 1 نمای جانبی و پلان فلوم 30 سانتی‌متری و محل قرارگیری کف زبر نشان داده شده است. شکل 2 نحوه قرارگیری زبری‌ها در کف فلوم در آرایش‌های منظم و شطرنجی در تراکم 25 درصد را نشان می‌دهد.

زبری نسبی و S_o شیب کف کانال که در این تحقیق مقدار آن ثابت در نظر گرفته شد ($S_o = 0/00055$) هست. با توجه به اینکه کمینه عدد رینولدز جریان روی سطوح زبر برابر با 48000 و کمینه عدد وبر برابر با 440 محاسبه شده، جریان در محدوده آشفته بوده، بنابراین از عدد رینولدز و عدد وبر می‌توان صرف‌نظر کرد. به این ترتیب ضریب زبری مانینگ تابع زبری نسبی، عدد فرود جریان، درصد تراکم زبری و آرایش زبری‌ها هست.

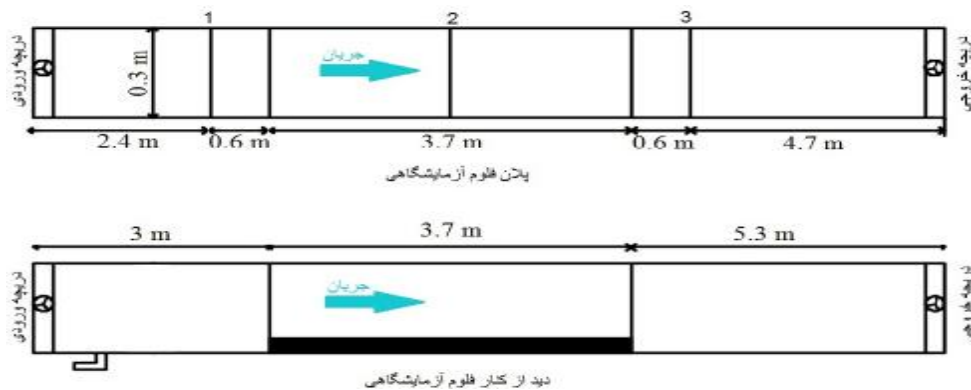
$$n = f\left(\frac{k_s}{y}, F_r, C, \Theta\right) \quad [17]$$

با توجه به رابطه 4: $(na \sqrt{f})$ در نتیجه:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = g\left(\frac{y}{k_s}, F_r, C, \Theta\right) \quad [18]$$

مواد و روش‌ها

به منظور دستیابی به اهداف این تحقیق، آزمایش‌های متعددی در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز و در فلومی به طول 15 متر، عرض 30 سانتی‌متر، عمق 50 سانتی‌متر و شیب کف ثابت و برابر با 0/00055 انجام گردید. در ابتدای فلوم 30 سانتی‌متری صفحات مشبک جهت مستهلک کردن انرژی جنبشی آب و از بین بردن شتاب جریان قرار داده شد که جریان پس از عبور از این صفحات با طی یک مسافت تقریباً 3 متری به ابتدای سطح زبر شده در بستر می‌رسید. با توجه به نظر محققانی چون راس (1946)، دین (1978) و رانگاراگو (2000) حداقل طولی که در آن پروفیل توسعه یافته کامل تشکیل می‌شود، 10 برابر عرض فلوم



شکل 1- پلان و مقطع فلوم 30 سانتی متری و تجهیزات آن و محل قرارگیری کف زبر.

رابطه زیر و مشخص بودن عمق و سرعت متوسط جریان در مقاطع 1، 2 و 3 به ازای هر دبی معین قابل محاسبه است. به طور مثال:

$$S_{E_{1,3}} = \frac{(y_1 + \frac{V_1^2}{2g}) - (y_3 + \frac{V_3^2}{2g})}{D_{x_{1,3}}} \quad [20]$$

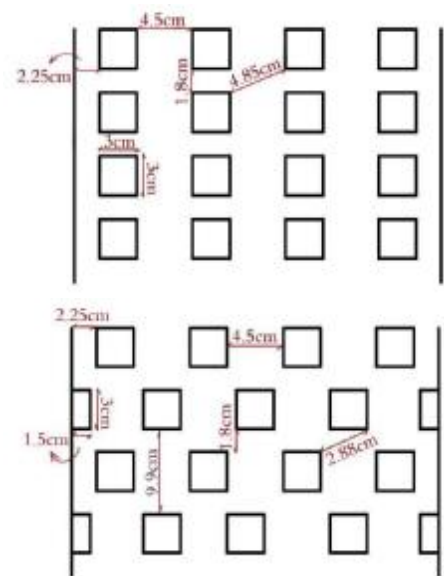
که در این روابط y_1, y_3 اعماق جریان در مقاطع 1 و 3 و V_1, V_3 سرعت متوسط جریان در مقاطع 1 و 3، $D_{x_{1,3}}$ فاصله بین مقاطع 1 و 3 که برابر با 4/9 متر هست. سپس طبق رابطه مانینگ، ضریب زبری مانینگ به طور متوسط بین هر دو مقطع محاسبه می شود، برای مثال بین دو مقطع 1 و 3:

$$n_{1,3} = \sqrt{\frac{2 S_{f_{1,3}}}{\frac{V_1^2}{R_1^{4/3}} + \frac{V_3^2}{R_3^{4/3}}}} \quad [21]$$

که در آن R_1 و R_2 به ترتیب مقدار شعاع هیدرولیکی در مقاطع 1 و 3 هستند. $n_{1,3}$ ضریب زبری مانینگ که به طور متوسط بین مقاطع 1 و 3 محاسبه می شود، به این ترتیب با محاسبه $n_{1,2}$ و $n_{2,3}$ ضریب زبری مانینگ کل به صورت زیر محاسبه می شود:

$$n = \frac{n_{1,3} + n_{2,3} + n_{1,2}}{3} \quad [22]$$

رابطه زیر محاسبه می شود:



شکل 2- نحوه قرارگیری زبری ها در آرایش منظم و شطرنجی در تراکم 25 درصد.

جدول 1- نام گذاری زبری ها.

آرایش		تراکم (%)		ارتفاع (mm)	
منظم	شطرنجی	25	50	5	10
P1	P2	D25	D50	H1	H2
				H3	

محاسبات ضریب زبری مانینگ

برای محاسبه ضریب زبری مانینگ (n) از رابطه (1) استفاده می شود. مقدار شیب خط انرژی نیز از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$[19] \quad S_0 = S_f + S_{\text{کف کانال}}$$

S_0 = شیب کف کانال که در تمامی آزمایشها

ثابت و برابر با 0/00055 بوده و مقدار S_E با توجه به

[23]

$$f = \frac{8gn^2}{R_2^{1/3}}$$

که مقدار شعاع هیدرولیکی در وسط طول

زبر هست.

به منظور تعیین درصد اختلاف ضریب زبری

مانینگ (n) آرایش منظم زبری‌ها نسبت به آرایش

شطرنجی، از رابطه زیر استفاده می‌شود:

[24]

$$\text{درصد اختلاف} = \left(\frac{n - n_*}{n_*} \right)$$

که در آن n ضریب زبری مانینگ آرایش منظم

و n* ضریب زبری مانینگ آرایش شطرنجی هست.

جدول 2 نتایج این محاسبات را در 12 آزمایش انتخابی

نشان می‌دهد.

جدول 2- مقادیر متغیرهای استفاده شده در محاسبه ضریب زبری مانینگ در 12 آزمایش.

f	n	S _{f1,2}	S _{f2,3}	S _{f1,3}	V ₂ (ms ⁻¹)	y ₃ (m)	V ₂ (ms ⁻¹)	y ₂ (m)	V ₁ (ms ⁻¹)	y ₁ (m)	آزمایش	دبی (L/s)
۰/۰۶۳۲	۰/۰۱۶۴۷	۰/۰۰۲۷۲	۰/۰۰۱۸۳	۰/۰۰۲۲۸	۰/۳۷	۰/۰۴۵	۰/۳۲۷	۰/۰۵۱	۰/۲۸۲	۰/۰۵۹	p2 D25 H1	5
۰/۰۴۸۲	۰/۰۱۵۱۵	۰/۰۰۲۸۶	۰/۰۰۲۱۲	۰/۰۰۲۴۹	۰/۵۰۶	۰/۰۷۲	۰/۴۵۸	۰/۰۸	۰/۴۱۲	۰/۰۸۹	p2 D25 H1	11
۰/۰۴۵۸	۰/۰۱۵۲۵	۰/۰۰۲۳۱	۰/۰۰۳۸۹	۰/۰۰۳۱۰	۰/۶۳۲	۰/۰۹۵	۰/۵۴۸	۰/۱۰۹	۰/۵۱۳	۰/۱۱۷	p2 D25 H1	18
۰/۰۴۱۱	۰/۰۱۴۷۳	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۵۸۴	۰/۰۰۴۰۷	۰/۸۱۸	۰/۱۱	۰/۶۶۲	۰/۱۳۶	۰/۶۲۵	۰/۱۴۴	p2 D25 H1	27
۰/۰۹۳۱	۰/۰۲۰۶۸	۰/۰۰۰۷۵	۰/۰۰۹۸	۰/۰۰۵۳۱	۰/۴۵۷	۰/۰۳۶	۰/۲۴	۰/۰۶۸	۰/۲۳۸	۰/۰۷	p2 D25 H3	5
۰/۰۷۱۵	۰/۰۱۸۷۴	۰/۰۰۱۰۹	۰/۰۰۷۷۶	۰/۰۰۴۴۳	۰/۵۵۳	۰/۰۶۶	۰/۳۹۵	۰/۰۹۳	۰/۳۸۲	۰/۰۹۶	p2 D25 H3	11
۰/۰۶۰۱	۰/۰۱۷۷۱	۰/۰۰۰۶۷	۰/۰۱۱۸۹	۰/۰۰۶۲۸	۰/۷۵	۰/۰۸	۰/۴۷۲	۰/۱۲۶	۰/۴۶۹	۰/۱۲۸	p2 D25 H3	18
۰/۰۵۶	۰/۰۱۷۳۱	۰/۰۰۲۴۹	۰/۰۰۹۹۱	۰/۰۰۶۱۹	۰/۹	۰/۱	۰/۶۱۶	۰/۱۴۶	۰/۵۸۴	۰/۱۵۴	p2 D25 H3	27
۰/۰۸۱۴	۰/۰۱۸۹۱	۰/۰۰۲۴۹	۰/۰۰۵۷۴	۰/۰۰۴۱۱	۰/۴۷۶	۰/۰۳۵	۰/۲۹۸	۰/۰۵۶	۰/۲۶۴	۰/۰۶۳	p2 D50 H1	5
۰/۰۵۷۹	۰/۰۱۶۶۴	۰/۰۰۲۵۸	۰/۰۰۳۸۶	۰/۰۰۳۲۲	۰/۵۳۹	۰/۰۶۸	۰/۴۴۷	۰/۰۸۲	۰/۴۰۷	۰/۰۹	p2 D50 H1	11
۰/۰۴۸۸	۰/۰۱۵۷۴	۰/۰۰۲۴۷	۰/۰۰۴۰۴	۰/۰۰۳۲۶	۰/۶۳۱	۰/۰۹۵	۰/۵۴۵	۰/۱۱	۰/۵۰۸	۰/۱۱۸	p2 D50 H1	18
۰/۰۴۰۴	۰/۰۱۴۶۶	۰/۰۰۱۴۷	۰/۰۰۷۶۷	۰/۰۰۴۵۷	۰/۸۵۷	۰/۱۰۵	۰/۶۴۳	۰/۱۴	۰/۶۲۱	۰/۱۴۵	p2 D50 H1	27

نتایج و بحث

شکل‌های 3 الف و ب به ترتیب تغییرات ضریب

زبری مانینگ در مقابل ارتفاع زبری (ks) برای هر دو

آرایش منظم و شطرنجی با تراکم‌های 25 و 50 درصد را

نشان می‌دهد. با توجه به این شکل‌ها ملاحظه می‌شود

که به ازای یک دبی ثابت با افزایش ارتفاع زبری، مقدار

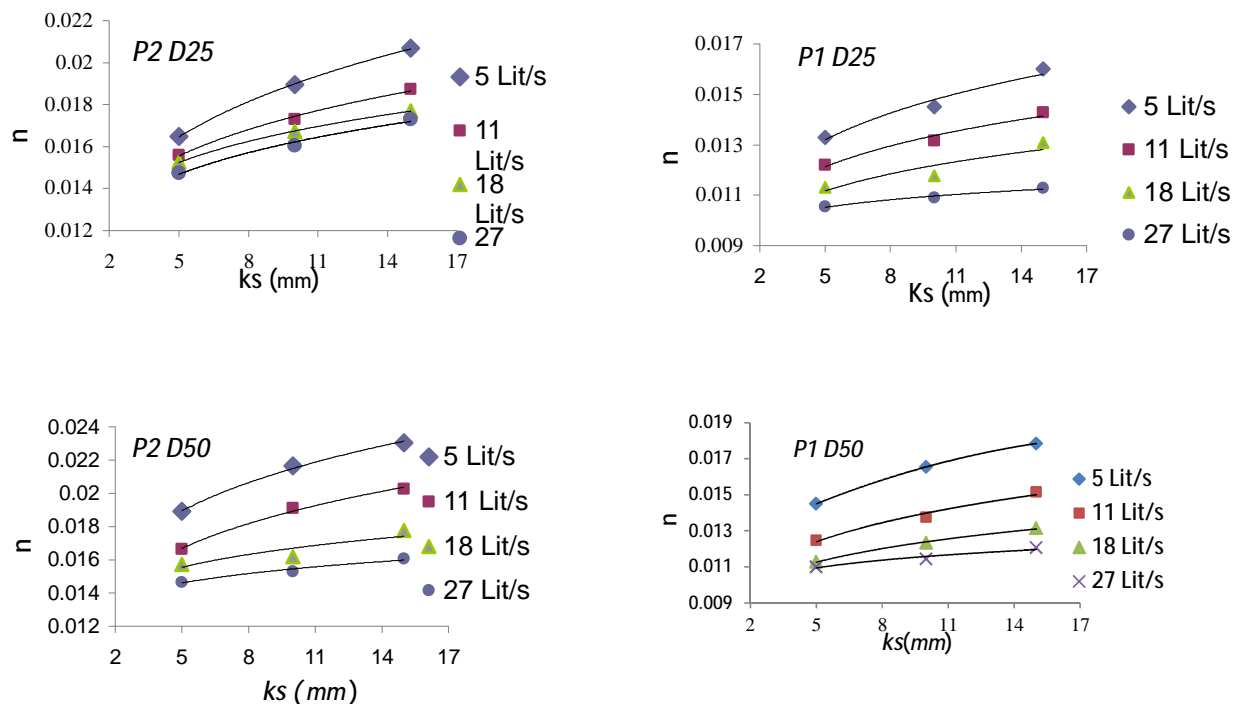
ضریب زبری مانینگ (n) نیز افزایش می‌یابد. به‌علاوه

شیب تغییرات ضریب زبری مانینگ در مقابل اندازه

زبری با بیشتر شدن دبی کاهش می‌یابد، به‌گونه‌ای که

در دبی 5 لیتر بر ثانیه بیشترین شیب تغییرات و در دبی

27 لیتر بر ثانیه کمترین شیب را نشان می‌دهد.



شکل 3(ب)- تغییرات ضریب زبری مانینگ در مقابل ارتفاع زبری برای آرایش شطرنجی.

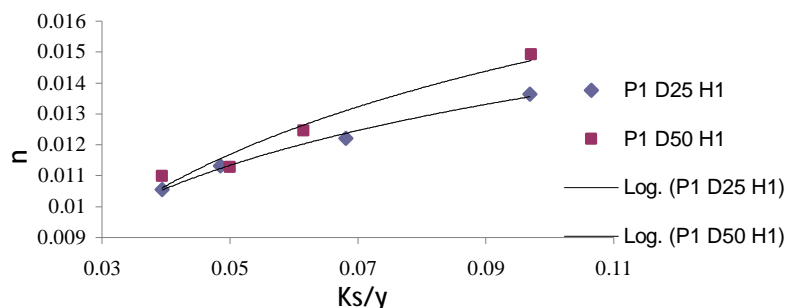
به منظور بررسی اثر تراکم و آرایش زبری بر ضریب زبری مانینگ، نمودارهای n در مقابل k_s/y برای زبری‌های با ارتفاع زبری یکسان در شکل‌های 4 و 5 نشان داده شده است. شکل 4 اثر درصد تراکم زبری بر ضریب زبری مانینگ را در آرایش منظم در ارتفاع یکسان زبری ($k_s = 5\text{mm}$) نشان می‌دهد، همان‌طور که مشاهده می‌شود ضریب زبری مانینگ با افزایش تراکم زبری‌ها (از 25 به 50 درصد) افزایش می‌یابد. به این علت که با کاهش فاصله میان عنصرهای زبری، تمرکز گردابه‌های تلاطمی در فواصل بین زبری‌ها بیشتر شده و در نتیجه نیروی دراگ اصطکاکی اعمال شده روی زبری‌ها افزایش می‌یابد، به این ترتیب مقدار افت اصطکاکی با افزایش تراکم زبری افزایش می‌یابد. با توجه به شکل 5 که اثر آرایش زبری بر تغییر فاکتور اصطکاکی را در ارتفاع یکسان زبری‌ها ($k_s = 5\text{mm}$) در تراکم 50 درصد نشان می‌دهد، مقدار ضریب زبری مانینگ در آرایش شطرنجی در شرایط یکسان بیش از

شکل 3(الف)- تغییرات ضریب زبری مانینگ در مقابل ارتفاع زبری برای آرایش منظم.

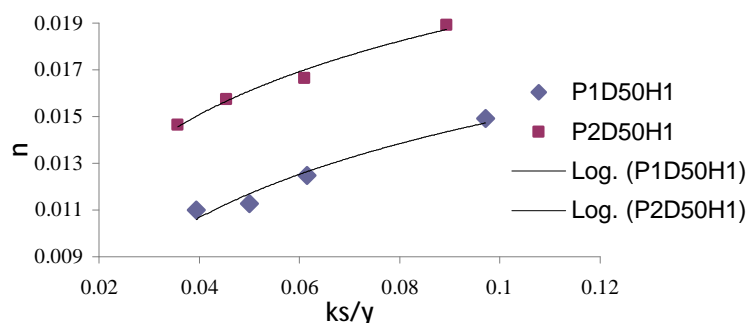
با افزایش دبی و عمق جریان، سرعت متوسط جریان (V) و شیب خط انرژی (S_f) افزایش می‌یابند، در نتیجه سرعت برشی جریان (u_*) نیز افزایش می‌یابد ولی چون روند تغییرات سرعت جریان بیش از سرعت برشی جریان هست، پس V/u_* نیز با افزایش دبی افزایش می‌یابد. با در نظر گرفتن رابطه کیولگان (رابطه 7) به ازای زبری ثابت با افزایش عمق جریان (y) و شعاع هیدرولیکی (R)، ضریب زبری دارسی-ویسباخ (f) کاهش می‌یابد و به ازای یک عمق ثابت با افزایش زبری بستر (k_s) ضریب اصطکاک دارسی-ویسباخ (f) افزایش می‌یابد که این نشان‌دهنده انطباق نتایج آزمایشگاهی و نظری به دست آمده هست.

به علاوه با توجه به رابطه مستقیم میان f ، n (رابطه 4) مقدار ضریب زبری مانینگ نیز کاهش می‌یابد. درستی و انطباق نتیجه نظری و آزمایشگاهی حاصله را در شرایط تراکم و ارتفاع زبری ثابت نشان می‌دهد.

آرایش منظم هست. مقایسه شکل‌های 4 و 5 نشان می‌دهد که میزان تغییر ضریب زبری مانینگ با تغییر آرایش منظم هست. مقایسه شکل‌های 4 و 5 نشان می‌دهد که میزان تغییر ضریب زبری مانینگ با تغییر



شکل 4- تغییرات n در مقابل k_s/y در ارتفاع زبری ($k_s = 5 \text{ mm}$) در آرایش منظم.



شکل 5- تغییرات n در مقابل k_s/y در ارتفاع زبری ($k_s = 5 \text{ mm}$) و تراکم ثابت 50 درصد در هر دو آرایش.

به عبارتی دیگر اثر آرایش زبری بر تغییر ضریب زبری بیشتر هست.

ارائه روابط جدید

با توجه به مطالعات انجام شده و پیشینه، تحقیق اکثر روابط موجود برای مقاومت جریان، روابطی هستند که بر اساس ضریب زبری داریسی-ویسباخ ارائه شده‌اند. برای به دست آوردن رابطه مقاومت جریان و با توجه به توصیه سایر محققان در استخراج روابط برای ضریب زبری داریسی-ویسباخ (f)، علاوه بر پارامترهای استغراق نسبی (y/k_s) و (R/k_s)، اثر پارامترهای مهم دیگری مانند عدد فرود (F_r) و درصد تراکم (%C) در نظر گرفته شد. ارائه یک رابطه کلی برای ضریب مقاومتی جریان لزوم در نظر گرفتن اثر نوع آرایش زبری را در برداشت. محققانی چون سایره و آلبرتسون (1961) نشان دادند که با تغییر آرایش زبری-

به منظور مقایسه کمی اثر تراکم و آرایش زبری‌ها، درصد اختلاف ضریب زبری مانینگ (n) در آرایش منظم نسبت به آرایش شطرنجی زبری‌ها در جدول 3 نشان داده شده است. همان‌طور که این جدول نشان می‌دهد متوسط درصد اختلاف ضریب زبری مانینگ در آرایش منظم در تراکم 25 درصد زبری‌ها نسبت به آرایش شطرنجی برابر با $+24/74$ درصد هست که علامت مثبت نشان‌دهنده این است که ضریب زبری مانینگ آرایش شطرنجی بیش از آرایش منظم زبری‌ها هست و از آنجا که در تراکم 50 درصد زبری‌ها این مقدار برابر با $+24/53$ هست، نتیجه می‌گیریم که با تغییر آرایش زبری از منظم به شطرنجی، تغییرات ضریب زبری مانینگ بیشتر از هنگامی است که در یک آرایش یکسان درصد تراکم زبری‌ها تغییر کند،

هر تراکم ثابت هست، اثر نوع آرایش زبری بر مقاومت جریان نظر گرفته شد. در این تحقیق مقدار این پارامتر در آرایش منظم در تراکم‌های 25 و 50 درصد، برابر با 1 و در آرایش شطرنجی در تراکم‌های 25 و 50 درصد به ترتیب برابر با 1/68 و 1/46 محاسبه شد.

ها از منظم به شطرنجی، فاصله قطری میان عنصرها در دو ردیف مجاور تغییر می‌کند، به این ترتیب با استفاده از پارامتر € که برابر با نسبت فاصله قطری عنصرهای زبری در دو ردیف عرضی مجاور در آرایش منظم (با توجه به شکل 2) به همین فاصله در آرایش شطرنجی در

جدول 3- درصد اختلاف ضریب زبری مانینگ آرایش منظم نسبت به آرایش شطرنجی.

ارتفاع زبری (mm)/آرایش و تراکم	منظم		
	50	25	
	24/69	22/58	5
	24/88	26/28	10
	24/03	25/35	15
	24/53	24/74	میانگین

جدول 4- مقایسه روابط استخراج شده مقاومت جریان.

شماره رابطه	فرمول	r^2	ADD
26	$\sqrt{\frac{8}{f}} = 0.092 \left(\frac{y}{k_s}\right) - 0.03C - 3.958 \text{ €} + 22.491 F_r + 7.579$	0/865	3/25
27	$\sqrt{\frac{8}{f}} = 1.723 \text{Ln} \left(\frac{y}{k_s}\right) - 0.034C - 4.782 \text{ €} + 18.15 F_r + 7.659$	0/887	3/08
28	$\sqrt{\frac{8}{f}} = 3.542 \text{Ln} \left(\frac{y}{k_s}\right) - 0.045C - 6.547 \text{ €} + 15.509$	0/815	4/097
29	$\sqrt{\frac{8}{f}} = 1.039 \text{Ln} \left(\frac{R}{k_s}\right) - 0.03C - 3.813 \text{ €} + 23.644 F_r + 6.012$	0/865	3/20
30	$\sqrt{\frac{8}{f}} = 3.273 \text{Ln} \left(\frac{R}{k_s}\right) - 0.045C - 6.424 \text{ €} + 17.492$	0/693	5/61

$$ADD = \frac{1}{m} \hat{a} \left| \frac{q - q^*}{q} \right| \quad [25]$$

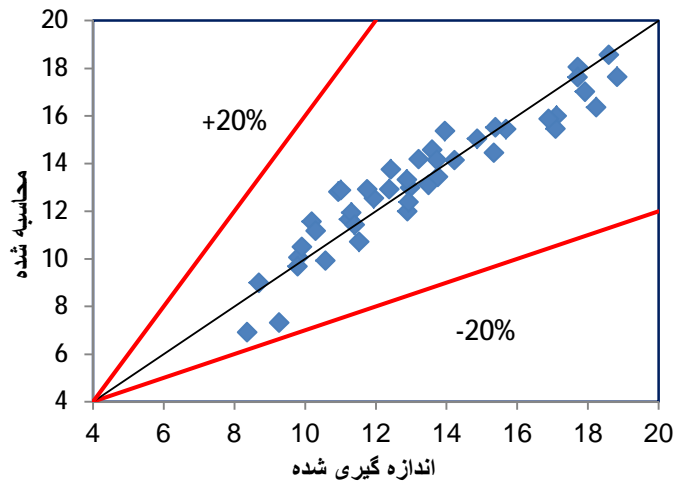
که در آن m تعداد مقادیر، q متغیر اندازه‌گیری شده و q^* متغیر محاسبه شده هست.

با مقایسه نتایج جدول 4 می‌توان دریافت که استفاده از پارامتر y/k_s نسبت به R/k_s بدون عدد فرود، ضریب تعیین (r^2) بیشتر و میانگین نسبی خطای کمتری (ADD) می‌دهد ولی با حضور هم عدد فرود و

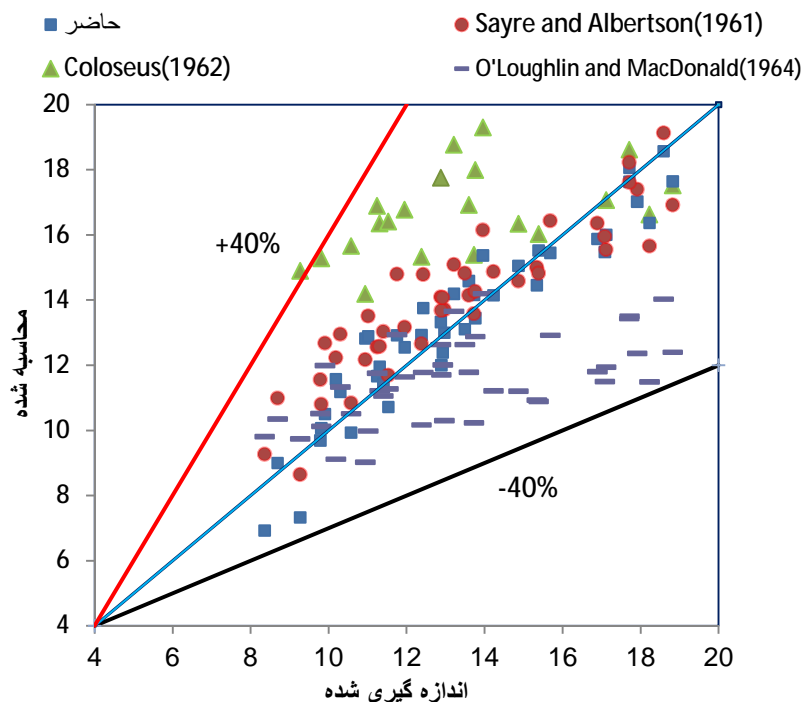
برای این منظور با استفاده از داده‌های جدول 2 مقادیر پارامترهای بی‌بعد تعیین و با استفاده از نرم‌افزار SPSS افزایش دقت برآورد هر یک از روابط که ترکیبی از پارامترهای بی‌بعد مختلفی داشتند محاسبه گردید که نتایج نهایی در جدول 4 ارائه شده است. مقدار میانگین نسبی خطا (ADD) میان تابع مقاومت محاسبه شده و اندازه‌گیری شده با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

از بین روابط استخراج شده، رابطه شماره 27 مقاومت جریان را بهتر و با دقت بیشتری تخمین می‌زند. قابل ذکر است که رابطه توانی با توجه به اعتبار کم و ضریب تعیین بسیار پایین در روابط جدول 4 گنجانده نشده است.

هم C و ϵ تأثیر R/k_s و y/k_s تقریباً یکسان است. هر یک از پارامترهای عدد فرود، C و ϵ به تنهایی باعث افزایش r^2 و کاهش میانگین نسبی خطا (ADD) شده‌اند. با توجه به ضریب تعیین روابط خطی و لگاریتمی استخراج شده، دقت این دو رابطه یکسان است. به علاوه



شکل 6- مقایسه $\sqrt{8/f}$ داده‌های اندازه‌گیری شده و محاسبه شده.



شکل 7- مقایسه $\sqrt{8/f}$ داده‌های اندازه‌گیری و محاسباتی روابط 10.9 و 11 با رابطه استخراج شده (رابطه 27).

به سطح صاف افزایش می‌یابد. در این مطالعه پس از یکسری آزمایش روابطی استخراج گردید که نشان می‌دهند علاوه بر پارامتر استغراق نسبی (y/k_s) ، عدد فرود (F_r) و فاکتور نوع آرایش (ϵ) در برآورد هرچه دقیق‌تر مقاومت جریان تأثیر به‌سزایی دارد. به‌علاوه در این تحقیق روابط نیمه‌لگاریتمی و خطی مقاومت جریان را با دقت یکسانی تخمین می‌زنند. به‌علاوه معادله‌های به‌دست‌آمده با توجه به شرایط و محدوده متغیرهای این تحقیق به‌دست‌آمده‌اند، از آنجاکه در طبیعت پراکندگی زبری‌ها بسیار نامشخص، تصادفی و از یک مقطع به مقطع دیگر تفاوت‌ها فاحش است، رابطه‌ای که بتواند اثرات کلی زبری‌ها را با همه رفتارهای غیرخطی مقاومتی در برابر جریان بیان کند، کار ساده‌ای نخواهد بود در دیگر شرایط بایستی تغییرات این ضریب موردبررسی و بهترین رابطه با بیشترین ضریب تعیین و کمترین درصد خطا ارائه شود.

در شکل 6 مقدار داده‌های اندازه‌گیری و رابطه استخراج‌شده (رابطه 27) با هم مقایسه شده‌اند. در شکل 7 نیز رابطه استخراج‌شده (رابطه 27) با روابط 9، 10 و 11 مقایسه شده است. همان‌طور که قبلاً اشاره شد اثر تغییر نوع آرایش زبری بر مقاومت جریان بیشتر از اثر دو متغیر دیگر هست. از آنجاکه سایر و آلبرتسون (1961) اثر نوع آرایش زبری بر استخراج روابط در نظر گرفت نتایج وی از مطابقت بهتری با تحقیق حاضر برخوردار است.

نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق اثر ارتفاع، تراکم و نوع آرایش زبری‌های مصنوعی بر مقاومت جریان بررسی شد. بنا بر نتایج به‌دست‌آمده اثر نوع آرایش زبری بر مقاومت جریان بیشتر از دو متغیر دیگر هست. به‌نحوی که مقدار متوسط ضریب زبری مانینگ در آرایش‌های منظم و شطرنجی به ترتیب حدود 46/63 و 94/67 درصد نسبت

منابع مورد استفاده

- بهرامی م و شفاعی بجستان م، 1389. مطالعه آزمایشگاهی اثر رسوبات درشت دانه کف کانال بر ضریب مقاومت جریان. مجله دانش آب و خاک، جلد 20، شماره 2، صفحه‌های 143 تا 156.
- تدین فرح و فغفور مغربی م، 1388. اثر توزیع المان‌های زبری بر ضریب زبری مانینگ. صفحه‌های 169 تا 178. هشتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، 8-6 بهمن، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز.
- شفاعی بجستان م، 1387. مبانی نظری و عملی هیدرولیک انتقال رسوب. اهواز، انتشارات دانشگاه شهید چمران، چاپ اول، ویرایش دوم، صفحه 551.
- محمودیان شوشتری م، 1385. اصول جریان در مجاری باز. اهواز، انتشارات دانشگاه شهید چمران، جلد اول، چاپ اول، صفحه 486.

- Bathurst JC, 1985. Flow resistance estimation in mountain rivers. *Journal of Hydraulics Engineering* 111: 625-641.
- Chow VT, 1959. *Open channel hydraulics*. McGraw-Hill Book Company, New York, NY.
- Christodoulou GC, Kostidou E and Vassilakos P, 2013. Resistance to flow over submerged obstacles in a steep Channel. Pp.632-644. *Proceedings 2nd European IAHR Congress*. 27-29 June, Munich, Germany.
- Coloseus HJ, 1962. Discussion of roughness spacing in rigid open channels. *Journal of the Hydraulics Division* 88:194-199.
- Herbich JB and Shulits S, 1964. Large-scale roughness in open-channel flow. *Journal of Hydraulic Division* 90(6): 203-230.
- Huthoff F, 2012. Theory for flow resistance caused by submerged roughness elements. *Journal of Hydraulic Research* 50(1):10-17.
- Ibrahim MM and Abdel-Mageed NB, 2014. Effect of bed roughness on flow characteristics. *International Journal of Academic Research* 6(5):169-178.

- O'Loughlin A and Macdonald EG 1964. Some roughness concentration effects on boundry resistance. La Houille Blanche 7: 777-782.
- Sayre W and Albertson ML, 1961. Roughness spacing in rigid open channels. Journal of Hydraulics Division, 87:121-150.
- Schroder RCM, 1990. Hydraulic methods of roughness determination. DVWK Schriften, 92, Verlag paul parey, Humburg-Berlin, Germany.
- Yang SQ, Han Y and Dharmasiri N, 2011. Flow resistance over fixed roughness elements. Journal of Hydraulic Engineering ASCE 49(2): 257-262.
- Yen BC, 2002. Open channel flow resistance. Journal of Hydraulic Engineering ASCE 128(1): 20-39 .