

توسعه روابط مقاومت جریان در رودخانه‌های کوهستانی بر اساس مطالعه آزمایشگاهی

محمد همتی^{۱*} و وفا مصطفی^۲

^{۱*} - نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی آب دانشگاه ارومیه m.hemmati@urmia.ac.ir

^۲ - دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی دانشگاه ارومیه

تاریخ پذیرش: ۹۴/۹/۲۸

تاریخ دریافت: ۹۴/۸/۱۰

چکیده

هدف این تحقیق ارائه و توسعه روابطی برای محاسبه ضرایب مقاومت جریان در آبراهه‌های با بستر سنگریزه‌ای می‌باشد. بدین منظور، آزمایش‌هایی در یک فلوم با قابلیت شیب‌پذیری، با طول ۸ متر و عرض ۰/۲۵ متر انجام گرفت. چهار شیب مختلف بستر (۴، ۶، ۸ و ۱۰ در هزار)، دو نوع ذرات سنگریزه‌ای به شکل تیز گوشه و طبیعی، سه نوع اندازه متوسط ذرات (۶۵/۳، ۴۶/۶ و ۳۸ میلی‌متر) و چهار دبی جریان (۰/۰۱، ۰/۰۱۷، ۰/۰۲۴ و ۰/۰۳۱ متر مکعب در ثانیه) به عنوان متغیرهای مورد استفاده تحقیق حاضر بودند. با استفاده از تعریف‌های جدید برای متغیرهای بی‌بعد در شکل معادله‌های بی‌بعد هندسه هیدرولیک، روابط مقاومت جریان جدیدی برای ذرات طبیعی و تیز گوشه توسعه داده شد. همچنین روابطی برای ضریب زبری مانینگ در هر دو نوع سنگریزه طبیعی و تیز گوشه ارائه شد. علاوه بر آن نتایج نشان داد که معادله‌های توسعه یافته بر اساس پارامترهای بی‌بعد هندسه هیدرولیک، بهترین روش برای ارتباط سرعت به دبی جریان در رودخانه‌های کوهستانی می‌باشد.

کلید واژه‌ها: هندسه هیدرولیک، بستر سنگریزه‌ای، روابط مقاومت جریان، شکل ذرات، رودخانه‌های کوهستانی.

Develop of Flow Resistance Equations in Mountainous Rivers Based On Experimental Study

M. Hemmati^{1*} and V. Mostafa²

1* - Corresponding Author, Assistant Professor, Water Engineering Department, Urmia University, Urmia, Iran.

2- M.Sc. Student, Water structures, Urmia University, Urmia, Iran.

Received: 1 November 2015

Accepted: 19 December 2015

Abstract

The aim of this research is to develop relations to estimate the flow resistance coefficients in gravel-bed channels. In this regards, the experiments were carried out in a tilting flume with length of 8m and width of 0.25m. In this research, four different bed slopes (0.004, 0.006, 0.008 and 0.01), two gravel types (natural and crushed shapes), three mean diameter (d_{50}) of gravels (65.3, 46.6 and 38 mm) and four discharges (0.01, 0.017, 0.024 and .031 m^3/s) were used as a variables. New flow resistance equations were developed for natural and crushed gravels by using the new definitions for dimensionless variables in terms of non-dimensional hydraulic geometry equations. Also, new equations were presented to estimate Manning's roughness coefficient for both shapes. In addition, the results showed that the developed equations based on non-dimensional hydraulic geometry relations are the best way to link the mean flow velocity to the flow discharge in mountain rivers.

Keywords: Hydraulic geometry, Gravel bed, Flow resistance equations, Particles shape, Mountain rivers.

مختلف مقاطع (هی^۷، ۱۹۷۹) و یا برای استغراق نسبی مختلف (کیرونوتو و گراف^۸، ۱۹۹۴) پارامتر B_r دارای مقادیر متفاوت می‌باشد.

بخشی از نیروی پسا (درگ) که توسط عناصر بزرگ زبری در آبراهه‌های کوهستانی ایجاد می‌شود با تغییر عدد فرود و استغراق نسبی تغییر می‌کند (باتورست و همکاران^۹، ۱۹۸۱). آبرله و همکاران^{۱۰} (۱۹۹۹) گزارش دادند که در استفاده از روش‌هایی که به دنبال پیش‌بینی مستقیم فاکتور اصطکاکی (f) از عدد فرود (Fr) هستند، باید با احتیاط رفتار شود و این روش‌ها نمی‌توانند به عنوان پیش‌بینی کننده مناسب از مقاومت جریان در نظر گرفته شوند. برای یک شیب معلوم S ، عدد فرود و فاکتور اصطکاکی از رابطه (۲) محاسبه می‌شود که به روش فرودی معروف می‌باشد:

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{\bar{u}}{\sqrt{ghs}} = \frac{F_r}{\sqrt{s}} \quad (2)$$

که در آن \bar{u} : سرعت متوسط، u_* : سرعت برشی، f : فاکتور اصطکاکی دارسی-ویسیاخ، g : شتاب ثقل، F_r : عدد فرود جریان و h : عمق متوسط جریان می‌باشد. یکی دیگر از روش‌های تجربی برای استخراج رابطه برای مقاومت جریان یا ایجاد یک رابطه بین سرعت متوسط و عمق متوسط آب (یا دبی جریان)، استفاده از روش‌های توانی می‌باشد. برای یک مقطع رودخانه با شیب ثابت S و بستر ثابت (که در آن d_c ثابت باشد)، رابطه بین سرعت متوسط و دبی جریان به صورت زیر خواهد بود:

$$\bar{u} = c Q^m \quad (3)$$

که در این رابطه Q : دبی جریان، c و m : ضرایب ثابت می‌باشند که با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و یا میدانی محاسبه می‌شوند.

مقدار m برای آبراهه‌های با بستر شنی کمتر از ۰/۴۰ (۰/۴ < m)، برای بسترهای سنگریزه‌ای، سنگ فرش و تخته سنگی در محدوده ۰/۴۵ الی ۰/۵۵ و برای آبراهه‌های پله استخری تند^{۱۱} و استخر - ریفل^{۱۲} بیش از ۰/۵۵ می‌باشد (باتورست، ۱۹۹۳).

مقدمه

نیروهای مهم فیزیکی از جمله نیروی اینرسی، فشار، وزن و اصطکاک باعث کنترل جریان در رودخانه می‌شوند که به طور مستقیم توسط هندسه و زبری‌های رودخانه ایجاد می‌شوند. برای یک رودخانه با بستر سنگریزه‌ای نسبتاً پایدار، تعیین هندسه آبراهه آسان بوده اما برآورد ضریب زبری که عمدتاً منعکس کننده مقاومت جریان رودخانه است، مشکل می‌باشد. به جهت موثر بودن ضریب زبری بر روی شرایط جریان یک رودخانه (تراز آب و سرعت)، دقت پیش‌بینی تراز آب در هنگام وقوع سیل، طراحی سازه‌های هیدرولیکی و جنبه‌های پایداری سنگ چینی‌ها مهم می‌باشد. علاوه بر آن ضریب زبری برای بررسی جنبه‌های اکولوژیک یک رودخانه در شبیه‌سازی شرایط جریان مرتبط با زیستگاه مناسب نیز مهم می‌باشد (کیم و همکاران^۱، ۲۰۱۰). به-خاطر اهمیت ضریب زبری، تلاش‌های زیادی برای کمی کردن ضریب زبری رودخانه‌های با بستر سنگریزه‌ای انجام گرفته است (کیم و همکاران^۲، ۲۰۱۰). در میان آنها، مطالعات تجربی ضریب زبری بر اساس اندازه مواد بستر (بری^۳، ۱۹۷۹) یا عمق نسبی (بری^۴، ۱۹۷۹؛ چارلتون و همکاران^۵، ۱۹۷۸؛ لیمیرینوس^۶، ۱۹۷۰) معروف می‌باشند. با این حال با توجه به نا منظمی‌ها و متفاوت بودن رودخانه‌های طبیعی، پیش‌بینی ضریب زبری با استفاده از این روش‌ها برای یک بازه رودخانه ساده نیست (کیم و همکاران^۱، ۲۰۱۰).

مقاومت جریان در رودخانه‌های کوهستانی با استفاده از روش‌های لگاریتمی، فرودی و توانی تعیین و محاسبه می‌شود. شکل کلی روش‌های لگاریتمی برای تعیین ضریب مقاومت جریان در قالب رابطه (۱) می‌باشد:

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{1}{k} \ln \frac{h}{k_s} + B_r \quad (1)$$

که در آن f : فاکتور اصطکاکی دارسی-ویسیاخ، k : ثابت وان کارمن، h : عمق متوسط آب، B_r : ضریب ثابت و k_s : زبری معادل ذرات بستر می‌باشد. مقدار ضریب ثابت وان کارمن برابر با ۰/۴ می‌باشد. در صورتی که برای جریان‌های با استغراق نسبی کم، مقدار k برابر با ۰/۱۸ باشد، پروفیل سرعت تطابق خوبی با توزیع لگاریتمی دارد (بایزیت^۵، ۱۹۸۲؛ دیتریچ و کل^۶، ۱۹۹۷). کاهش در مقدار k برخی عدم اطمینان را در کاربرد نظری معادله (۱) برای جریان‌های با زبری نسبی بزرگ نشان می‌دهد. برای شکل‌های

7- Hey
8- Kironoto and Graf
9- Bathurst *et al.*
10- Aberle *et al.*
11- steep pool/fall
12- pool-riffle

1- Kim *et al.*
2- Bray
3- Charlton *et al.*
4- Limerinos
5- Bayazit
6- Dittrich and Koll

رابطه (۶) به شکل رابطه (۷) که در آن استغراق نسبی ($\frac{R}{d_c}$) هم در فرمول ظاهر می‌شود، ارائه شده است (سوتو و مادرید اریس، ۱۹۹۴). علاوه بر آن شفاعی بجستان و بهرامی یاراحمدی^۷ (۲۰۱۲) نیز رابطه‌ای مشابه رابطه (۷) برای رودخانه‌های با بستر ملایم ارائه کرده‌اند. مقایسه روابط گوناگون ارائه شده توسط محققان مختلف نشان داد که ضرایب توانی رابطه (۶) (که برای رودخانه‌های کوهستانی با مقیاس زبری بزرگ می‌باشد) بیشتر از رابطه (۷) (که در آن زبری در مقیاس متوسط و کوچک است) می‌باشد:

$$n = \left(a + \ln(b.S_f^c / F_r^d) \right) (d_{84}^{1/6} / g^{1/2}) \quad (۶)$$

$$n = \left[a + \ln(b.S_f^c \cdot \left(\frac{R}{d_c}\right)^d / F_r^e) \right] (d_{84}^{1/6} / g^{1/2}) \quad (۷)$$

که در آن n : ضریب زبری مانینگ، S_f : شیب خط انرژی، F_r : عدد فرود جریان، d_{84} : شاخص اندازه زبری که در آن ۸۴ درصد ذرات قطرشان کمتر از آن است، g : شتاب ثقل، R : شعاع هیدرولیکی و d_c : شاخص زبری است که برخی محققان به جای آن از d_{90} ، d_{84} یا d_{50} استفاده می‌کنند. پراکاش^۸ (۲۰۱۴) با استفاده از داده‌های میدانی رابطه (۸) را برای محاسبه ضریب دارسی - ویسباخ (f) در رودخانه‌های با بستر سنگریزه‌ای ارائه داد:

$$\sqrt{1/f} = (2.5(h/d_c)^{2.1}) / (1 + (h/d_c)^2) \quad (۸)$$

که در آن h و d_c : به ترتیب عمق متوسط جریان و اندازه مواد بستر می‌باشد.

تعیین دبی جریان در آبراهه‌های کوهستانی خیلی راحت‌تر از عمق جریان است. لذا محققان زیادی معادله‌های بی‌بعد هندسه هیدرولیک را برای رودخانه‌های کوهستانی پیشنهاد کرده‌اند که سرعت متوسط جریان را به دبی کل جریان (Q) (ریکنمن^۹، ۱۹۹۴) یا دبی واحد عرض q (آبرله و اسمارت، ۲۰۰۳؛ کومیتی و همکاران^{۱۰}، ۲۰۰۷؛ فرگوسن، ۲۰۰۷؛ ریکنمن و رینگ^{۱۱}، ۲۰۱۱؛

کلرهایس^۱ (۱۹۷۳) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی مقدار m را برای رودخانه‌های کوهستانی در محدوده ۰/۴ الی ۰/۷۱۴ تعیین کرد. بسیاری از روش‌های زیر مجموعه رابطه (۳) به یک سطح مقطع محدود نشده است. این معادله‌های رژیم، با معرفی پارامتر زبری (d_c) و شیب (S) به معادله‌های توانی مقاومت جریان تبدیل می‌شوند. لذا رابطه (۳) به صورت زیر نوشته می‌شود (آبرله و اسمارت^۲، ۲۰۰۳):

$$\bar{u} = c_1 g^{m_1} S^{m_2} Q^{m_3} d_c^{m_3} \quad (۴)$$

که در آن c_1 : ضریب تجربی است و m_1 ، m_2 و m_3 با توجه به شرایط آزمایش‌ها تعیین می‌گردند.

روش‌های موجود توانی، فرودی و لگاریتمی برای تعیین مقاومت جریان بر پایه فرضیه‌هایی که در آن شیب و اندازه ذره مشخصه برابر باشد، رفتار هیدرولیکی را یکسان نمایش می‌دهند. اما جریان در آرایش‌های مختلف از زبری با ارتفاع یکسان می‌تواند رفتار هیدرولیکی متفاوتی داشته باشد که با بررسی داده‌های آزمایشگاهی معلوم می‌گردد (آبرله و اسمارت، ۲۰۰۳).

جارت^۳ (۱۹۸۴) فرمول زیر را (در واحد SI) برای رودخانه‌های کوهستانی که شیب آنها در محدوده ۰/۲ الی ۴ درصد بود به صورت زیر ارائه داد:

$$n = 0.32 S_f^{0.38} R^{-0.16} \quad (۵)$$

که در آن S_f و R : به ترتیب شیب خط انرژی و شعاع هیدرولیکی می‌باشد.

فرمول کلی ارائه شده توسط برخی محققان از جمله، اوگارت و مادرید اریس^۴ (۱۹۹۴)، سوتو و مادرید اریس^۵ (۱۹۹۴) و حبیبی و همکاران^۶ (۲۰۱۴) در رودخانه‌های کوهستانی با زبری در مقیاس بزرگ ($\frac{d}{d_{84}} \leq 1.2$)، عمق متوسط جریان می‌باشد)

مطابق رابطه (۶) می‌باشد که ضرایب این فرمول بر اساس نوع تحقیق (آزمایشگاهی یا میدانی) و محدوده شیب بستر و شرایط دیگر متفاوت می‌باشد. برای رودخانه‌هایی که مقیاس زبری در محدوده متوسط ($1.2 < \frac{d}{d_{84}} \leq 4$) و کوچک ($4 < \frac{d}{d_{84}}$) باشد،

7 - Shafai- Bejestan, M. and M. Bahrami-Yarahmadi
8- Prakash
9- Rickenmann
10- Comiti et al.
11- Rickenmann and Recking

1- Kellerhals
2- Aberle and Smart
3- Jarrett
4- Ugarte and Madrid-Aris
5- Soto and Madrid-Aris
6 - Habibi et al.

ریکنمن، ۱۹۹۴؛ زیمرمن، ۲۰۱۰) ارتباط می‌دهد. این روابط در شکل بی‌بعد آن به صورت زیر است:

$$V^* = c.q^* m_s^{(1-m)/2} \quad (9)$$

که در آن $V^* = u/\sqrt{gD_{84}}$ ، $q^* = q/\sqrt{gD_{84}^3}$ ؛ سرعت متوسط جریان و C و m : ضرایبی هستند که به صورت آزمایشگاهی تعیین می‌شوند. فرگوسن (۲۰۰۷) نشان داد که این نوع معادله‌ها (رابطه ۹)، تعیین سرعت جریان در رودخانه‌های طبیعی را بهتر از معادله‌های دیگر توصیف می‌کنند. برای کاربرد بهتر این روابط در مکان‌های مختلف، پیشنهاد شده است که پارامتر شیب سطح آب یا شیب بستر کانال (S) به عنوان یک فاکتور اضافی در این نوع معادله‌ها در نظر گرفته شود (آبرله و اسمارت، ۲۰۰۳؛ دیوید و همکاران، ۲۰۱۰؛ فرگوسن، ۲۰۰۷؛ زیمرمن، ۲۰۱۰؛ ریکنمن و رکینگ، ۲۰۱۱). در نتیجه ریکنمن و رکینگ (۲۰۱۱) دو پارامتر بی‌بعد جدید را معرفی کردند:

$$V^{**} = c.q^{**m} \quad (10)$$

که در آن $V^{**} = u/\sqrt{gSD_{84}}$ و $q^{**} = q/\sqrt{gSD_{84}^3}$ ؛ شیب بستر کانال می‌باشند. فرگوسن (۲۰۰۷) و ریکنمن و رکینگ (۲۰۱۱) از D_{84} به عنوان شاخص زبری در رابطه (۱۰) استفاده نمودند. بررسی منابع مختلف نشان می‌دهد که بیشتر معادله‌های پیش‌بینی مقاومت جریان، برای رودخانه‌های با شیب ملایم بوده و روابط مربوط به رودخانه‌های کوهستانی بسیار کم می‌باشند و اینکه مطالعات بسیار محدودی در مورد تأثیر شکل ذرات بر ضرایب مقاومت جریان صورت گرفته است که در این مورد می‌توان به مطالعه بهرامی یاراحمدی و شفاعی بجستان (۱۳۹۰) اشاره نمود. همچنین در مطالعه‌های میدانی، اندازه‌گیری دبی جریان در آبراهه‌های کوهستانی و کوچک خیلی دقیق‌تر از اندازه‌گیری عمق جریان می‌باشد. در این نوع آبراهه‌ها به‌خاطر نا منظمی‌های توپوگرافی بستر، تعیین عمق جریان مشکل می‌باشد. لذا استفاده از روابط بی‌بعد هندسه هیدرولیک که اخیراً مورد توجه محققین قرار گرفته است برای رودخانه‌های کوهستانی با بستر زبر مناسب بوده و هنوز توسعه کافی نیافته‌اند و این تحقیق در نظر دارد روابط بی‌بعد هندسه هیدرولیک و ضرایب مقاومت جریان را برای ذرات بستر از نوع سنگریزه تیز گوشه و طبیعی در رودخانه‌های کوهستانی توسعه دهد.

مواد و روش‌ها

تجهیزات آزمایشگاهی

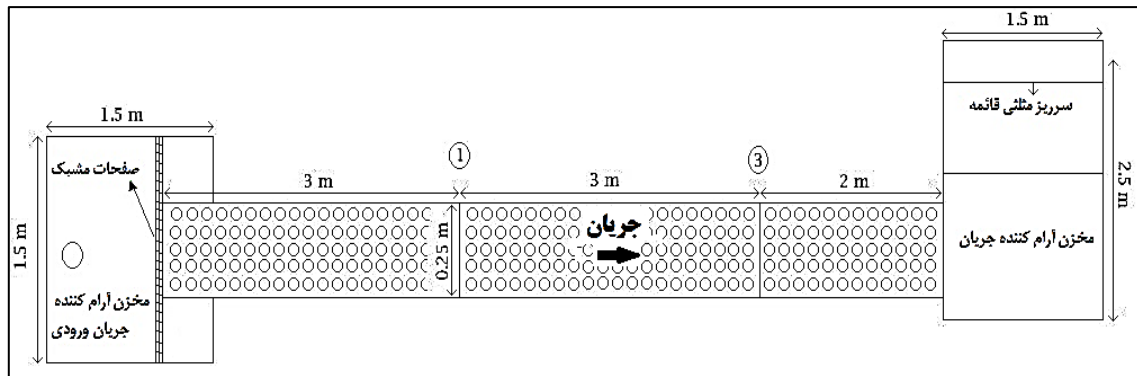
در راستای تحقق اهداف این تحقیق، آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی واقع در آزمایشگاه هیدرولیک کاربردی دکتر فرهودی، گروه مهندسی آب دانشگاه ارومیه انجام شد. طول مفید فلوم ۸ متر و عرض آن ۲۵ سانتی‌متر می‌باشد که در بالادست آن یک مخزن آرام‌کننده جریان وجود دارد. در بالادست ورودی کانال از صفحات مشبک برای آرام کردن جریان ورودی به فلوم استفاده گردید. برای اندازه‌گیری دبی جریان در پایین‌دست فلوم از سرریز مثلی با زاویه قائمه استفاده گردید. در بالادست سرریز از مخزن آرام‌کننده جریان برای کاهش تلاطم جریان و افزایش دقت اندازه‌گیری تراز آب استفاده گردید. کانال مذکور شیب‌پذیر بوده و برای تنظیم شیب بستر از الکتروموتور و یا اهرم دستی که در زیر فلوم قرار دارد استفاده گردید. شکل (۱) پلان مدل فیزیکی و شکل (۲) تصویری از شکل سنگریزه‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد.

نحوه انجام آزمایش‌ها

بعد از تنظیم شیب کف کانال توسط الکتروموتور، سنگریزه‌ها با اندازه و شکل مورد نظر در کف و در طول کل کانال گسترانیده شد. سپس جریان آب با باز کردن شیر فلکه، به آرامی وارد کانال شد و دبی جریان توسط سرریز مثلی موجود در پایین‌دست فلوم اندازه‌گیری شد. بعد از اطمینان از تنظیم دبی جریان مورد نظر، اندازه‌گیری‌های سرعت و عمق آب در مقاطع مختلف از جمله مقاطع ۱، ۲ و ۳ (شکل ۱) ثبت شد. فاصله مقاطع ۱، ۲ و ۳ از ابتدای فلوم به ترتیب برابر با ۳، ۴/۵ و ۶ متر می‌باشد. سرعت جریان با استفاده از سرعت سنج الکترو مغناطیسی ACM2-RS با دقت ± 0.5 (سانتی‌متر بر ثانیه)، و عمق جریان با استفاده از عمق‌سنج مکانیکی با دقت 0.1 میلی‌متر اندازه‌گیری شد. نحوه انجام آزمایش‌ها بدین صورت بود که بعد از قرارگیری سنگریزه‌ها در طول کل کانال با اندازه و شکل مورد نظر، چیدمان آنها در شیب‌ها و شرایط مختلف هیدرولیکی تغییر نمی‌کرد. با توجه به اینکه آرایش قرارگیری زبری در کانال بر ضرایب مقاومت جریان تأثیرگذار می‌باشد (آبرله و اسمارت، ۲۰۰۳)، لذا بدین منظور چیدمان و آرایش سنگریزه‌ها در بستر در شرایط مختلف تغییر داده نشد. کل آزمایش‌های انجام گرفته در تحقیق حاضر ۹۶ آزمایش می‌باشد. جدول (۱) پارامترها و محدوده تغییرات آنها را در تحقیق حاضر نشان می‌دهد. بر اساس طبقه‌بندی باتورست و همکاران (۱۹۸۱) شرایط آزمایش‌های تحقیق حاضر در محدوده زبری با مقیاس متوسط و بزرگ ($4 < \frac{y}{d_{50}}$) که در آن y عمق جریان و d_{50} قطر متوسط سنگریزه می‌باشد.

1- Zimmermann

2- David et al.



شکل ۱- پلان فلوم آزمایشگاهی و تجهیزات مربوطه



شکل ۲- تصویری از شکل سنگریزه‌ها (میلی‌متر) $(d_{50}=65.3)$

جدول ۱- پارامترها و محدوده تغییرات آنها در تحقیق حاضر

توضیحات	محدوده تغییرات	پارامتر
-	تیز گوشه، طبیعی (نسبتاً گرد گوشه)	شکل ذرات سنگریزه*
-	۰/۰۳۱ و ۰/۰۲۴، ۰/۰۱۷، ۰/۰۱	دبی جریان (متر مکعب بر ثانیه)
در محدوده سنگریزه بسیار درشت	۶۵/۳ و ۴۶/۶، ۳۸	متوسط اندازه ذرات d_{50} (میلی‌متر)
در محدوده شیب‌های تند	۱۰ و ۸، ۶، ۴	شیب بستر (در هزار)
زبری با مقیاس بزرگ و متوسط	۱/۷۳ الی ۰/۶۱۴	استغراق نسبی شعاع هیدرولیکی (R/d_{50})
زبری با مقیاس بزرگ و متوسط	۳/۷ الی ۰/۸۵	استغراق نسبی عمق جریان (y/d_{50})
-	۱/۲ الی ۰/۶	عدد فرود جریان F_r

*: ذرات طبیعی از کنار رودخانه‌ها و ذرات تیز گوشه از کارخانه‌های سنگ شکن جمع‌آوری شده است.

پارامترهای بی‌بعد هیدرولیک

برای توصیف بهتر ارتباط بین دبی واحد عرض و سرعت جریان و پیش‌بینی معادله سرعت، از تحلیل ابعادی استفاده گردید که در آن سرعت جریان (V) تابعی از شیب خط انرژی (S_f) ، دبی واحد عرض (q) ، عمق آب (y) ، شتاب ثقل (g) ، لزوجت دینامیکی آب (μ) ، چگالی آب (ρ) و شاخص زبری (d_{50}) می‌باشد:

$$f(V, q, y, g, \mu, \rho, d_{50}, S_f) = 0 \quad (11)$$

با استفاده از تئوری π باکینگهام و انتخاب متغیرهای تکراری y, ρ, V و رابطه بی‌بعد زیر استخراج می‌شود:

$$f\left(\frac{q}{Vy}, \frac{v}{\sqrt{gy}}, \frac{y}{d_{50}}, R_e, S_f\right) = 0 \quad (12)$$

به‌خاطر متلاطم زبر بودن جریان (کمترین حد عدد رینولدز برشی در آزمایش‌ها ۱۶۵۱ می‌باشد) از عدد رینولدز جریان (R_e) صرف‌نظر شد. پس از تعیین متغیرهای تکراری بر اساس روش π باکینگهام و با توجه به اینکه می‌توان گروه‌های بی‌بعد را در هم ادغام کرد، معکوس نمود و یا جذر گرفت؛ بنابراین رابطه گروه‌های بی‌بعد به صورت زیر می‌باشد که به پارامترهای بی‌بعد هیدرولیک معروف می‌باشند (ریکنمن و ریکینگ، ۲۰۱۱) استخراج می‌گردد:

همتی و مصطفی: توسعه روابط مقاومت جریان در رودخانه‌های...

رکینگ (۲۰۱۱)، برابر با ۰/۵۴۵ به دست آمد. همچنین ارتباط بین دو پارامتر بی بعد برای تمامی سنگریزه‌های طبیعی و تیز گوشه در شکل (۳-۳) و رابطه بین آنها مطابق با معادله (۱۷) می‌باشد. با این حال، با به کارگیری این روابط می‌توان با اندازه‌گیری یکی از پارامترها مثل سرعت متوسط جریان، دبی واحد عرض را محاسبه نمود که در آبراهه‌های طبیعی این امر مستلزم داشتن اطلاعات در خصوص شیب و اندازه مواد بستر می‌باشد.

رابطه بین دو پارامتر بی بعد هندسه هیدرولیک V'^{**} و q'^{**} برای شرایطی که در آن از شیب بستر (S_0) به جای شیب خط انرژی استفاده شود نیز مشابه حالت قبل از رابطه توانی تبعیت می‌کند که نتایج آن برای تمامی داده‌ها (هر دو نوع شکل سنگریزه) در شکل (۴) ارائه شده است. رابطه توانی در این حالت مطابق با رابطه (۱۸) می‌باشد که در آن مقدار توان (m) برابر با ۰/۳۹۰۵ بوده که تا حدودی بیشتر از مقدار آن در معادله (۱۷) می‌باشد:

$$V^{**} = 3.4402 q^{**0.3491} \quad (15) \text{ برای ذرات طبیعی}$$

$$R^2 = 0.93$$

$$V^{**} = 2.9291 q^{**0.395} \quad (16) \text{ برای ذرات تیز گوشه}$$

$$R^2 = 0.88$$

$$V^{**} = 3.1765 q^{**0.3719} \quad (17) \text{ برای هر دو نوع سنگریزه}$$

$$R^2 = 0.89$$

$$V'^{**} = 3.8479 q'^{**0.3905} \quad (18) \text{ برای هر دو نوع سنگریزه}$$

$$R^2 = 0.88$$

لازم به ذکر می‌باشد که روابط فوق برای شرایطی صادق است که در آن شیب بستر بین ۴ الی ۱۰ در هزار ($0.4\% \leq S_0 \leq 1\%$) و ($6 < q^{**} < 60$) باشد.

علت وجود برخی تفاوت‌های جزئی بین نتایج تحقیق حاضر و سایر محققان این است که اولاً تحقیق حاضر برای شرایط آزمایشگاهی بوده و مطالعه اکثر محققان میدانی می‌باشد. ثانیاً در تحقیق حاضر به خاطر بررسی اثر شکل بر ضرایب مقاومت جریان، از دانه‌بندی یکنواخت استفاده شده است در حالی که در رودخانه‌های طبیعی، مواد بستر دانه‌بندی غیریکنواخت دارند که این امر (غیر یکنواختی مواد بستر) باعث افزایش ضرایب مقاومت جریان می‌شود. لذا با توجه به دلایل ذکر شده مقدار توان پارامتر q^{**} (m) برای روابط تحقیق حاضر کمتر از سایر محققان می‌باشد.

علاوه بر آن، ارتباط بین پارامتر بی بعد سرعت (V^{**}) با استغراق‌های نسبی (R/d_{50}) و (y/d_{50}) در شکل (۵) نیز از قانون توانی تبعیت می‌کند. لذا با اطلاع از مقدار استغراق نسبی، می‌توان مقدار سرعت متوسط جریان را برآورد نمود که این امر از فرمول‌های

$$V^{**} = \frac{V}{\sqrt{g S_f d_{50}}},$$

$$q^{**} = \frac{q}{\sqrt{g S_f d_{50}^3}} \quad (13)$$

در صورتی که از شیب بستر استفاده شود گروه‌های بی بعد فوق به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$V'^{**} = \frac{V}{\sqrt{g S_0 d_{50}}},$$

$$q'^{**} = \frac{q}{\sqrt{g S_0 d_{50}^3}} \quad (14)$$

پارامترهای بی بعد فوق، مشابه پارامترهایی است که توسط ریکنمن و رکینگ (۲۰۱۱) ارائه شده است (رابطه ۱۰)، با این تفاوت که آنها به جای d_{50} از d_{84} استفاده کرده‌اند و به همین ترتیب نیچه^۱ (۲۰۱۲) از زبری کانال (R) به جای d_{50} استفاده نموده است. ارتباط بین دو پارامتر بی بعد V^{**} و q^{**} با استفاده از نتایج آزمایشگاهی مشخص خواهد شد که در بخش نتایج به آن پرداخته شده است.

نتایج و بحث

در تحقیق حاضر سعی گردید با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، ارتباط بین دو پارامتر V^{**} و q^{**} و همچنین سایر پارامترها از جمله استغراق نسبی بررسی و روابط استخراج شده از نتایج تحقیق حاضر با نتایج سایر محققان مورد مقایسه و ارزیابی قرار گیرد. نتایج آزمایش‌های تحقیق حاضر نشان داد که رابطه بین پارامتر بی بعد سرعت (V^{**}) و دبی جریان (q^{**}) برای سنگریزه‌های طبیعی و تیز گوشه که در آن از شیب خط انرژی به عنوان پارامتر شیب استفاده شده از قانون توانی ($V^{**} = c q^{**m}$) تبعیت می‌کند که نتایج آن در شکل‌های (۳-الف) و (۳-ب) نشان داده شده است. همچنین روابط توانی بین دو پارامتر بی بعد برای سنگریزه‌های طبیعی در معادله (۱۵) و برای تیز گوشه در معادله (۱۶) ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد ارتباط بین دو پارامتر بی بعد در سنگریزه‌های طبیعی تا حدودی بهتر از سنگریزه‌های تیز گوشه بوده و مقدار توان (m) در ذرات تیز گوشه ($m=0.395$) بیشتر از طبیعی ($m=0.3491$) می‌باشد. مقدار m شدت تغییرات سرعت را نشان می‌دهد و طبق گفته بانورست (۱۹۹۳) زیاد بودن مقدار m دلیل بر زیاد بودن مقاومت جریان می‌باشد. با این وجود مقاومت جریان در سنگریزه‌های تیز گوشه تا حدودی بیشتر از سنگریزه‌های طبیعی می‌باشد که این امر توسط بهرامی یاراحمدی و شفافی بجستان (۱۳۹۰) نیز تأیید شده است. مطالعه صحرایی ریکنمن و

بزرگ می باشد؛ اما با این وجود اکثر داده‌ها در شرایط زبری متوسط قرار دارند:

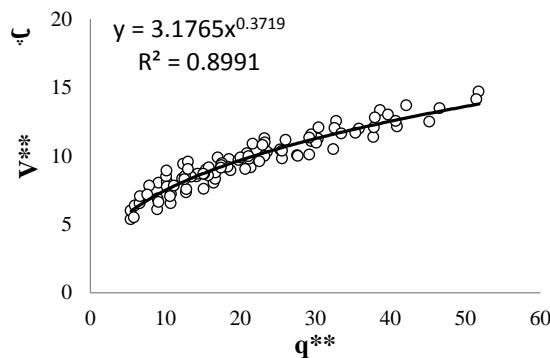
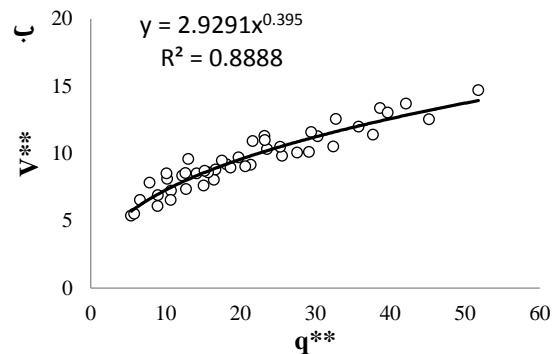
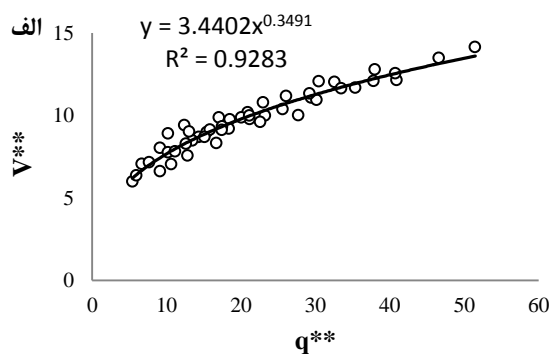
$$V^{**} = 8.747 \left(\frac{R}{d_{50}} \right)^{0.6967} \quad (۱۹)$$

$$R^2 = 0.77$$

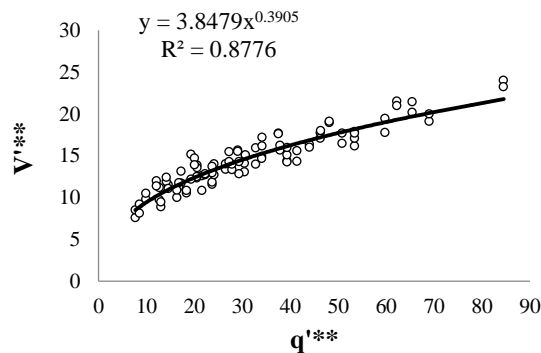
$$V^{**} = 6.6023 \left(\frac{y}{d_{50}} \right)^{0.5317} \quad (۲۰)$$

$$R^2 = 0.76$$

(۱۹) و (۲۰) قابل دستیابی می‌باشد. اما دقت معادله‌ها به شکل $V^{**} = c q^{**n}$ (روابط ۱۵ الی ۱۸) در پیش‌بینی سرعت متوسط بیشتر از روابط (۱۹) و (۲۰) می‌باشد. همچنین ریکنمن و رکینگ (۲۰۱۱) معادله‌هایی را بر اساس زبری با مقیاس بزرگ، متوسط و کوچک ارائه داد که دقت آنها نیز کمتر از معادله‌های به شکل $V^{**} = c q^{**n}$ بود؛ بطوریکه رابطه بین V^{**} و استغراق نسبی (R/d_{84}) برای استغراق‌های کمتر از ۱ (زبری با مقیاس بزرگ) از دقت بسیار پایینی برخوردار بود. بر اساس شکل‌های (۵-الف) و (۵-ب) ملاحظه می‌گردد که استغراق نسبی (y/d_{50}) و یا (R/d_{50}) کمتر از ۴ بوده و شرایط آزمایش برای زبری با مقیاس متوسط و

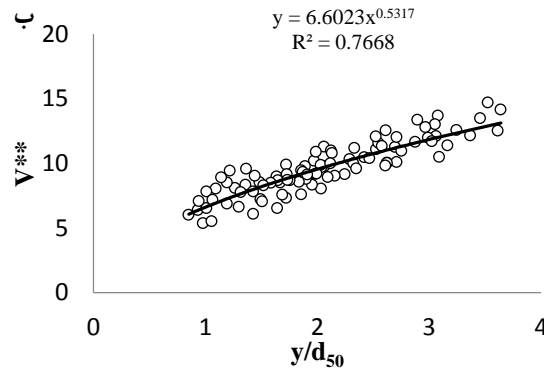
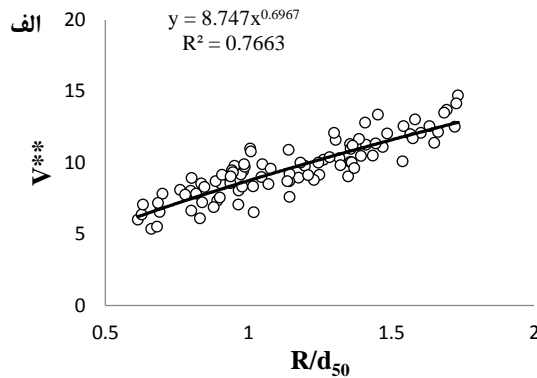


شکل ۳- تغییرات پارامتر بی بعد سرعت (V^{**}) در مقابل پارامتر بی بعد دبی واحد عرض (q^{**}) برای (الف) سنگریزه های طبیعی، (ب) سنگریزه‌های تیز گوشه و (پ) هر دو نوع سنگریزه



شکل ۴- تغییرات پارامتر بی بعد سرعت (V^{**}) در مقابل پارامتر بی بعد دبی واحد (q^{**}) برای هر دو نوع سنگریزه

همتی و مصطفی: توسعه روابط مقاومت جریان در رودخانه‌های...



شکل ۵- ارتباط بین پارامتر بی بعد سرعت (V^{**} ، با، الف) استغراق نسبی شعاع هیدرولیکی (R/d_{50}) و (ب) استغراق نسبی عمق آب (y/d_{50})

بستر (k) برای ذرات طبیعی بیشتر از ذرات تیز گوشه می‌باشد. با اینکه توان شیب بستر کمتر از توان پارامتر q^* می‌باشد؛ اما این روابط بیانگر موثر بودن پارامتر شیب بستر در معادله پیش‌بینی سرعت جریان می‌باشد. با این حال سایر مطالعات در زمینه جریان در آبراهه‌های تند نشان داد که شیب بستر، پارامتر تأثیر گذار نبوده و یا با یک توان منفی در معادله‌ها ظاهر می‌شود (کومیتی و همکاران، ۱۹۹۱، ۲۰۰۹). این در حالی است که محققانی چون ریکنمن (۱۹۹۴) و آبرله و اسمارت (۲۰۰۳) گزارش دادند که وجود پارامتر شیب می‌تواند پیش‌بینی سرعت را بهبود بخشد. اندازه‌گیری‌های صحرائی نشان داد که برای آبراهه‌هایی که شیب بستر آنها کمتر از 0.184 است، مقدار m برابر با 0.7 به دست آمد و مقدار m با افزایش شیب بستر افزایش می‌یابد (لی و فرگوسن، ۲۰۰۲). مقدار m برای آبراهه‌های عمیق در حدود 0.4 و برای شرایط کم عمق برابر با 0.6 می‌باشد (فرگوسن، ۲۰۰۷). وجود اختلاف در مقدار m بین تحقیق حاضر و محققان دیگر مربوط به شرایط آزمایش و استفاده از ذرات سنگریزه یکنواخت در تحقیق حاضر می‌باشد. دانه-بندی مواد بستری در رودخانه‌های طبیعی غیر یکنواخت می‌باشد که این امر باعث افزایش ضرایب مقاومت جریان و در نتیجه افزایش مقدار m می‌گردد.

پیش‌بینی روابط بی بعد هندسه هیدرولیک

مزیت اصلی استفاده از پارامتر بی بعد V^{**} در مقابل q^* این است که روابطی که بر اساس دبی واحد عرض Q برای پیش‌بینی سرعت جریان توسعه یافته‌اند در مقایسه با روابطی که بر اساس عمق جریان توسعه یافته‌اند دارای مقادیر کم خطا در متغیرهای ورودی هستند؛ به‌ویژه زمانی که این معادله‌ها برای آبراهه‌های تند زیر به کار می‌روند (فرگوسن، ۲۰۰۷؛ کومیتی و همکاران، ۲۰۰۹؛ زیمرمن، ۲۰۱۰). علاوه بر آن معادله ماینینگ - استریکلر برای

برخی محققان برای ارتباط سرعت با دبی واحد عرض جریان رابطه‌ای را مشابه با رابطه (۹) ارائه داده‌اند که در آن توان شیب (S) را به صورت ضربی از توان q^* تعریف کرده‌اند ($V^* = Cq^{*m}S^{(1-m)/2}$). تحلیل‌های انجام گرفته روی داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر نشان داد که مستقل نمودن توان‌های هر پارامتر بی‌بعد، نتایج بهتری را ارائه می‌دهد. لذا شکل روابط استخراج شده به صورت ($V^* = Cq^{*m}S_o^k$) ارائه گردید. روابط (۲۱) و (۲۲) با استفاده از نرم‌افزار اسپاس اس نسخه ۱۶ که دارای بیشترین ضریب همبستگی و کمترین خطای نسبی بودند، استخراج گردید. به منظور بررسی خطای نسبی روابط مذکور در پیش‌بینی V^* از آماره درصد خطای نسبی ($E(\%) = \frac{\sum(|X_p - X_o|)}{\sum X_o} \times 100$) استفاده گردید که در آن متغیر X پارامتر بی‌بعد سرعت و زیر نویس‌های O و P به ترتیب نشان دهنده مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده می‌باشند:

$$V^* = Cq^{*m}S_o^k = 1.439q^{*0.372}S_o^{0.107} \quad (21) \quad \text{تیز گوشه}$$

$$R^2 = 0.90, \quad E(\%) = 4.7\%$$

$$V^* = Cq^{*m}S_o^k = 2.247q^{*0.345}S_o^{0.188} \quad (22) \quad \text{طبیعی}$$

$$R^2 = 0.94, \quad E(\%) = 3.3\%$$

$$\text{که در آن } V^* = \frac{V}{\sqrt{g d_{50}}} \text{ و } q^* = \frac{q}{\sqrt{g d_{50}^3}} \text{ می‌باشد.}$$

تطابق خوب بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده روابط مذکور (شکل ۶) و درصد خطای کم $4/7$ و $3/3$ به ترتیب برای روابط (۲۱) و (۲۲) نشان از دقت مناسب و قابل قبول این روابط می‌باشد. با مقایسه روابط استخراج شده برای ذرات تیز گوشه و طبیعی کاملاً مشهود می‌باشد که توان پارامتر q^* (m) در ذرات تیز گوشه تا حدودی بیشتر از ذرات طبیعی می‌باشد. برعکس، توان شیب

حاضر برآورد می‌کند (شکل ۸-ب). خطای نسبی فرمول ریکنمن و رکینگ (۲۰۱۱) در برآورد V^{**} نسبت به معادله (۲۵) تحقیق حاضر در حدود ۱۶ درصد می‌باشد؛ این در حالی است که خطای نسبی فرمول فرگوسن (۲۰۰۷) در حدود ۱۱ درصد می‌باشد. با اینکه خطای نسبی رابطه ریکنمن و رکینگ (۲۰۱۱) بیشتر از رابطه فرگوسن (۲۰۰۷) می‌باشد؛ اما به دلیل روند یکسان تغییرات V^{**} در مقابل q^{**} در تحقیق حاضر و تحقیق ریکنمن و رکینگ (۲۰۱۱)، می‌توان نتیجه گرفت که نتایج تحقیق حاضر تطابق خوبی با نتایج ریکنمن و رکینگ (۲۰۱۱) دارد. دلیل وجود برخی تفاوت‌ها بین نتایج تحقیق حاضر و محققان دیگر به شرایط رودخانه‌های مورد استفاده در تحقیق آنها مربوط می‌شود.

پیش‌بینی رابطه ضریب زبری مانینگ برای ذرات تیز گوشه

و طبیعی

در تحقیق حاضر علاوه بر پیش‌بینی روابط مربوط به متغیرهای بی‌بعد هندسه هیدرولیک، سعی گردید تا بر اساس آزمایش‌های انجام یافته، روابطی (در سیستم SI) برای محاسبه ضریب زبری مانینگ به صورت تابعی از شیب خط انرژی (S_f)، عدد فرود جریان (F_r)،

استغراق نسبی (y/d_{50}) و پارامتر $(\frac{d_{50}^{1/6}}{\sqrt{g}})$ برای سنگریزه‌های تیز گوشه (رابطه ۲۶) و طبیعی (رابطه ۲۷) پیش‌بینی شود. روابط

پیش‌بینی شده نشان دهنده ارتباط مستقیم شیب خط انرژی و رابطه معکوس عدد فرود جریان و استغراق نسبی با ضریب زبری مانینگ می‌باشد. ضرایب و توان‌های مربوط به روابط ارائه شده برای ذرات تیز گوشه و طبیعی متفاوت می‌باشند؛ به‌طوری‌که توان شیب خط انرژی در ذرات تیز گوشه بیشتر از ذرات طبیعی می‌باشد که این امر نشان دهنده اثر بیشتر شیب بر روی ضریب زبری مانینگ در سنگریزه‌های تیز گوشه می‌باشد. علاوه بر آن توان استغراق نسبی هم که رابطه عکس با مقدار ضریب زبری دارد در ذرات تیز گوشه اثر بیشتری نسبت به ذرات طبیعی دارد. همچنین شفاعی بجستان و بهرامی یاراحمدی (۲۰۱۲) گزارش دادند که ضریب زبری مانینگ ذرات تیز گوشه بیشتر از ذرات طبیعی می‌باشد. روابط (۲۶) و (۲۷) برای شرایطی صادق است که زبری در مقیاس بزرگ و متوسط ($0.6 \leq \frac{R}{d_{50}} \leq 1.8$) و شیب بستر در محدوده 0.004 الی 0.01 باشد.

میزان خطای نسبی کم روابط (۲۶) و (۲۷) که بترتیب برابر با $4/2$ و $3/3$ درصد می‌باشد و همچنین تطابق خوب بین داده‌های پیش‌بینی شده با اندازه‌گیری شده (شکل ۹) نشان دهنده دقت مناسب و قابل قبول روابط مذکور می‌باشد.

$$n = 1.306 \times S_f^{0.707} F_r^{-0.031} \left(\frac{y}{d_{50}}\right)^{-0.464} \left(\frac{d_{50}^{1/6}}{\sqrt{g}}\right) + 0.013 \quad (26)$$

$$R^2 = 0.86, E(\%) = 4.2$$

$$n = 0.793 \times S_f^{0.578} F_r^{-0.174} \left(\frac{y}{d_{50}}\right)^{-0.376} \left(\frac{d_{50}^{1/6}}{\sqrt{g}}\right) + 0.011 \quad (27)$$

اعماق نسبی کم در محدوده زبری‌های با مقیاس متوسط و بزرگ مناسب نمی‌باشد (فرگوسن، ۲۰۰۷؛ ریکنمن و رکینگ، ۲۰۱۱).

برای پیش‌بینی روابط بین متغیرهای بی‌بعد هندسه هیدرولیک، از نتایج ۹۶ آزمایش انجام شده با استفاده از نرم‌افزار اسپاس اس نسخه ۱۶ روابط (۲۳)، (۲۴) و (۲۵) که دارای بیشترین ضریب همبستگی و کمترین خطای نسبی را داشتند استخراج گردید که مشابه رابطه ریکنمن و رکینگ (۲۰۱۱) می‌باشد:

$$V^{**} = 3.089 q^{**0.376} \left[1 + \left(\frac{q^{**}}{93.2} \right)^{4.53} \right] \quad (23) \text{ تیز گوشه}$$

$$R^2 = 0.89, E(\%) = 6.1\%$$

$$V^{**} = 3.55 q^{**0.338} \left[1 + \left(\frac{q^{**}}{90.3} \right)^{5.241} \right] \quad (24) \text{ طبیعی}$$

$$E(\%) = 3.6\%, R^2 = 0.93$$

$$V^{**} = 3.314 q^{**0.357} \left[1 + \left(\frac{q^{**}}{90.84} \right)^{4.966} \right] \quad (25) \text{ هر دو شکل سنگریزه}$$

$$E(\%) = 4.8\%, R^2 = 0.91$$

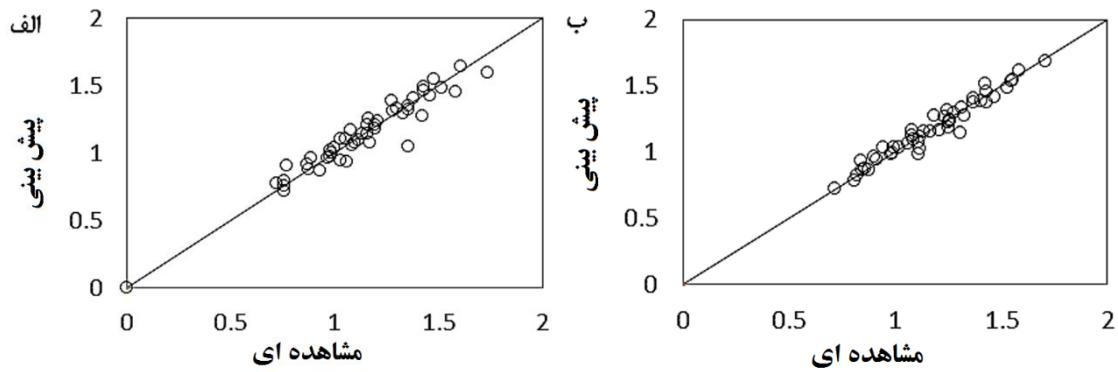
محاسبه درصد خطای نسبی روابط (۲۳)، (۲۴) و (۲۵) در پیش‌بینی مقدار متغیر بی‌بعد V^{**} به ترتیب برابر با $3/6$ ، $6/1$ و $4/8$ درصد می‌باشد که این امر نشان دهنده دقت قابل قبول روابط مذکور می‌باشد. علاوه بر آن مقادیر اندازه‌گیری شده در مقابل مقادیر برآورد شده برای هر یک از روابط مذکور ترسیم گردید که نتایج آن بیانگر تطابق خوب بین داده‌های مشاهده‌ای و پیش‌بینی می‌باشد (شکل ۷).

روابط ارائه شده برای شرایطی صادق است که در آن مقیاس زبری در محدوده متوسط و بزرگ ($0.6 \leq \frac{R}{d_{50}} \leq 1.8$)، شیب بستر در محدوده 0.004 الی 0.01 و $6 \leq q^{**} \leq 60$ باشد.

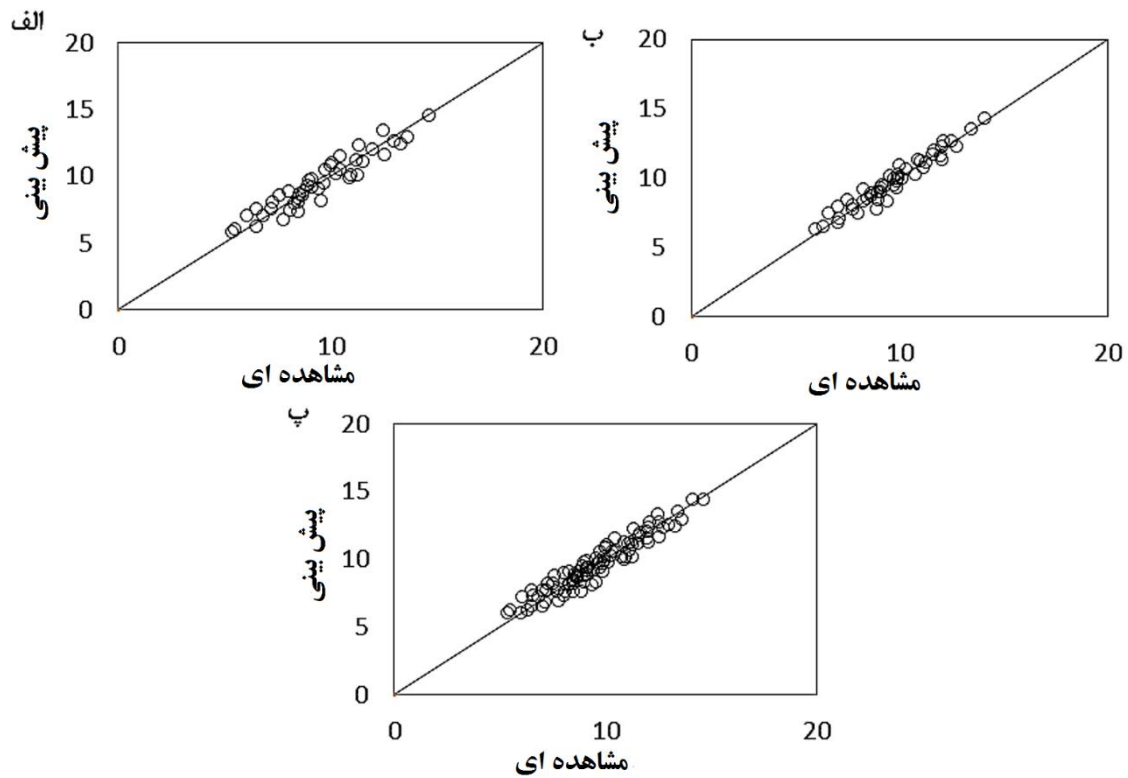
مقایسه روابط (۲۳)، (۲۴) و (۲۵) حاصل از نتایج تحقیق حاضر با روابط محققان دیگر از جمله ریکنمن و رکینگ (۲۰۱۱) و فرگوسن (۲۰۰۷) نشان می‌دهد که روابط مذکور تطابق خوبی با نتایج این محققان بویژه ریکنمن و رکینگ (۲۰۱۱) دارد (شکل ۸) که دلیل این امر تشابه فرمول‌های تحقیق حاضر (روابط ۲۳ الی ۲۵) با فرمول ایشان می‌باشد. با اینکه فرمول ریکنمن و رکینگ (۲۰۱۱) برای تمامی محدوده q^{**} ، مقادیر V^{**} را کمتر از روابط تحقیق حاضر برآورد می‌کند؛ اما روند و شیب تغییرات V^{**} در مقابل q^{**} برای رابطه ایشان بسیار مشابه روابط تحقیق حاضر می‌باشد (شکل ۸-الف). برای q^{**} ‌های کمتر از ۲۵، رابطه فرگوسن (۲۰۰۷) مقادیر V^{**} را کمتر و برای q^{**} ‌های بزرگتر از ۲۵، بیشتر از روابط تحقیق

همتی و مصطفی: توسعه روابط مقاومت جریان در رودخانه‌های...

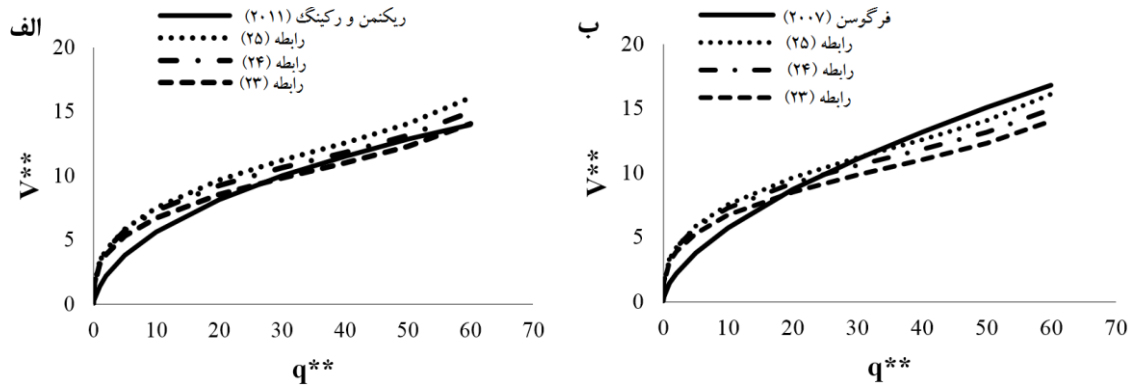
$$R^2 = 0.87, E(\%) = 3.3$$



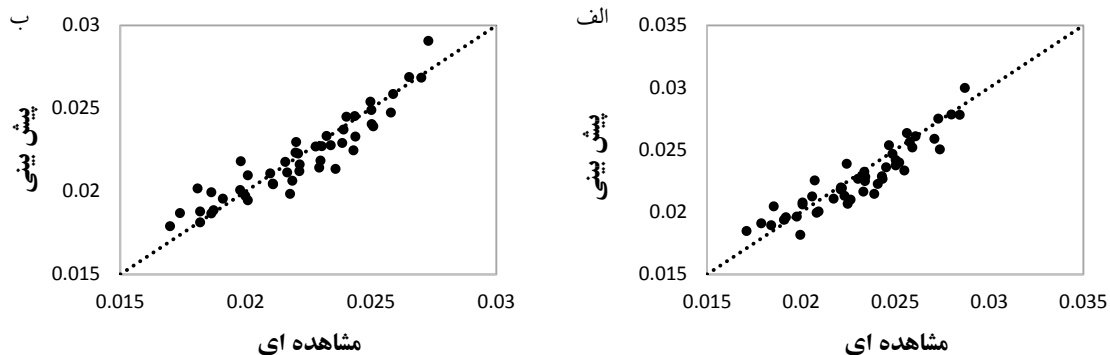
شکل ۶- مقادیر برآورد شده V^* در مقابل مشاهده شده V^* ؛ الف: ذرات تیز گوشه، ب: ذرات طبیعی



شکل ۷- مقادیر برآورد شده V^{**} در مقابل مشاهده شده V^{**} ؛ الف: ذرات تیز گوشه، ب: ذرات طبیعی و پ) برای هر دو شکل سنگریزه



شکل ۸- مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج محققان دیگر



شکل ۹- مقادیر برآورد شده ضریب زبری مانینگ در مقابل مقادیر اندازه گیری شده آن؛ الف) ذرات تیز گوشه و ب) ذرات طبیعی

طبیعی (برابر با ۰/۳۴۵) می باشد و این مقدار کمتر از مقادیر مربوط به مطالعات صحرائی می باشد.

بر خلاف نظر برخی محققانی چون کومیتی و همکاران (۲۰۰۷) نتایج تحقیق حاضر نشان داد که شیب بستر یک پارامتر تأثیر گذار بر مقاومت جریان می باشد که موافق با نظر برخی محققان از جمله ریکمن (۱۹۹۴ و ۱۹۹۱) و آبرله و اسمارت (۲۰۰۳) می باشد.

توان شیب خط انرژی و استغراق نسبی در روابط پیش بینی شده ضریب زبری مانینگ برای ذرات تیز گوشه بیشتر از ذرات طبیعی می باشد که این امر بیانگر تأثیر بیشتر ذرات تیز گوشه بر مقاومت جریان در رودخانه های کوهستانی می باشد که این امر توسط بهرامی یاراحمدی و شفافی بجزستان (۱۳۹۰) برای بسترهای با شیب ملایم نیز تأیید شده است.

روابط استخراج شده نشان داد که ضریب زبری مانینگ رابطه مستقیم با شیب خط انرژی، و رابطه عکس با مقدار استغراق نسبی و عدد فرود جریان دارد که مقدار توان این پارامترها در ذرات تیز گوشه بیشتر از ذرات طبیعی می باشد.

نتیجه گیری

نتایج تحقیق حاضر نشان داد که:

- ارتباط بین پارامترهای بی بعد سرعت (V^{**}) و دبی واحد جریان (q^{**}) برای سنگریزه های طبیعی و تیز گوشه از قانون توانی ($V^{**} = cq^{**m}$) تبعیت می کند که مقدار توان (m) در ذرات تیز گوشه در حدود ۰/۴ بوده که بیشتر از مقدار آن برای ذرات طبیعی ($m \approx 0.35$) می باشد. این امر نشان دهنده بیشتر بودن مقدار مقاومت جریان در سنگریزه های تیز گوشه می باشد. این در حالی است که مقدار m برای نتایج مطالعه صحرائی ریکمن و ریکمن (۲۰۱۱)، برابر با ۰/۵۴۵ به دست آمده است.
- مستقل نمودن توان های هر پارامتر بی بعد در رابطه ی بین V^* و q^* نتایج بهتری را ارائه می دهد که شکل روابط استخراج شده به صورت $(V^* = C q^{*m} S_o^k)$ ارائه گردید. روابط استخراج شده نشان داد که توان متغیر q^* (m) در ذرات تیز گوشه (برابر با ۰/۳۷۲) تا حدودی بیشتر از ذرات

منابع

- ۱- بهرامی یاراحمدی، م. و م. شفاعی بجمستان. ۱۳۹۰. بررسی آزمایشگاهی اثر شکل ذرات رسوبی بستر بر ضریب زبری مانینگ. نشریه آب و خاک مشهد (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۵(۱): ۶۰-۵۱.
- 2- Aberle, J., Dittrich, A. and F. Nestmann. 1999. Estimation of gravel bed river flow resistance. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(12):1315–1319.
- 3- Aberle, J. and G. M. Smart. 2003. The influence of roughness structure on flow resistance on steep slopes. *Journal of Hydraulic Research*, 41: 259–269.
- 4- Bathurst J.C. 1993. Flow resistance through the channel network. In K. Beven and M. J. Kirkby (Eds.), *Channel Network Hydrology*, Wiley, Chichester, (pp. 69 – 98).
- 5- Bathurst, J.C., Li, R. H. and D.B. Simons. 1981. Resistance equation for large-scale roughness. *Journal of Hydraulic Engineering*, 107(12):1593–1613.
- 6- Bayazit, M. 1982. Flow structure and sediment transport mechanics in steep channels. In: *Proceedings of 156th Euromech, Mechanics of Sediment Transport*, 12-14 Jul., Istanbul, Turkey, pp. 197–206.
- 7- Bray, D. I. 1979. Estimating average velocity in gravel-bed rivers. *Journal of Hydraulic Division*, 105(9):1103-1122.
- 8- Charlton, F., Brown, P. M. and R. W. Benson. 1978. The hydraulic geometry of some gravel rivers in Britain. Report IT 180, Hydraulics Research Station, Wallingford, UK.
- 9- Comiti, F., Mao, L., Wilcox, A., Wohl, E. and M. Lenzi. 2007. Field derived relationships for flow velocity and resistance in high-gradient streams. *Journal of Hydrology*, 340:48–62.
- 10- Comiti, F., Cadol, D. and E. Wohl. 2009. Flow regimes, bed morphology and flow resistance in self-formed step-pool channels. *Water Resource Research*, 45(4):1-18.
- 11- David, G. C. L., Wohl, E. E., Yochum, S. E. and B. P. Bledsoe. 2010. Controls on spatial variations in flow resistance along steep mountain streams. *Water Resource Research*, 46(3):1-21.
- 12- Dittrich, A. and K. Koll. 1997. Velocity field and resistance of flow over rough surfaces with large and small submergence. *International Journal of Sediment Research*, 12(3): 21–33.
- 13- Ferguson, R. 2007. Flow resistance equations for gravel and boulder bed streams. *Water Resource Research*, 43(5):1–12.
- 14- Habibi, M., Namaee, M. R. and M. Saneie. 2014. An experimental investigation to calculate flow resistance in a steep river. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(4):1176-1184.
- 15- Hey, R.D. 1979. Flow resistance in gravel-bed rivers. *Journal of Hydraulic Division*, 105(4):365–379.
- 16- Jarrett, R. D. 1984. *Hydraulics of High Gradient Streams*. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 110 (11): 1519- 1539.
- 17- Kellerhals, R. 1973. Hydraulic performance of mountain streams. In: *Proceeding of 15th Congress of the IAHR, Istanbul*, 1, pp. 467–473.
- 18- Kim, J. S., Lee, C. J., Kim, W. and Y. J. Kim. 2010. Roughness coefficient and its uncertainty in gravel-bed river. *Water Science and Engineering*, 3(2):217-232.
- 19- Kironoto, B.A. and W.H. Graf. 1994. Turbulence characteristics in rough uniform open-channel flow. In: *Proceeding of Institution of Civil Engineers. Water, Maritime and Energy*, 106:333–344.

- 20-Lee, A. J. and R. I. Ferguson. 2002. Velocity and flow resistance in step-pool streams. *Geomorphology*, 46:59-71.
- 21-Limerinos, J. T. 1970. Determination of the manning coefficient from measured bed roughness in natural channels. U.S. Geology of Survey Water Supply Paper, 1898-B, 47 p.
- 22-Nitsche, M. 2012. Macro-roughness, flow resistance and sediment transport in steep mountain streams. Ph. D. Dissertation, University of Leipzig.
- 23-Prakash, H. 2014. Prediction of flow resistance in gravel bed river. *International Journal of Engineering and Technology Research (IJETR)*, 2(4):155-159.
- 24-Rickenmann, D. 1994. An alternative equation for the mean velocity in gravel-bed rivers and mountain torrents. *Journal of Hydraulic Engineering*, 94(1): 672-676.
- 25-Rickenmann, D. 1991. Hyper concentrated flow and sediment transport at steep slopes, *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(11): 1419-1439.
- 26-Rickenmann, D. and A. Recking. 2011. Evaluation of flow resistance in gravel-bed rivers through a large field data set. *Water Resources Research*, 47(7):1-22.
- 27-Shafai- Bejestan, M. and M. Bahrami-Yarahmadi. 2012. River bed resistance coefficient variation of different sediment particle shapes. *World Environmental and Water Resources Congress*, May 20-24, Albuquerque, New Mexico, United States, P:1585-1591.
- 28-Soto, U, A. and M. Madrid Aris. 1994. Roughness coefficient in mountain rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, American Society of Civil Engineering, New York, 1: 1-8.
- 29-Ugarte, A. and M. Madrid-Aris. 1994. Roughness coefficient in mountain rivers. In: *Hydraulic Engineering '94, Proceedings of the 1994 Conference*, Buffalo, New York, August 1-5, Volume 1.
- 30- Zimmermann, A. 2010. Flow resistance in steep streams: An experimental study. *Water Resources Research*, 46(9):1-18.