

بررسی شاخص‌ها و عوامل مؤثر بر ضریب زبری مانینگ در رودخانه‌ها و تعیین مدل جدید جهت برآورد آن (مطالعه موردی رودخانه رادکان خراسان رضوی)

رضا صدیق* - علی باقریان کلات^۱ - حمزه نور^۲ - حسین رجایی^۱ - زهره شیبانی زاده^۱ - رضا واحدی طرقي^۱ - علی واحدی طرقي^۱
* کارشناس پژوهشی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی reza.seddigh@gmail.com
۱- کارشناس پژوهشی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی
alibagheriankalat@yahoo.co, h.rajaei@areeo.ac.ir, shaybanizadeh_sh@yahoo.com,
۲- استادیار مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی h.noor@areeo.ac.ir

چکیده

از روش‌های معمول برای برآورد سرعت و دبی جریان در کانال‌ها و رودخانه‌ها استفاده از روابط تجربی نظیر معادله مانینگ می‌باشد. در این روش تعیین ضریب زبری دارای اهمیت ویژه‌ای است. محققین زیادی در خصوص برآورد منطقی آن در شرایط و رودخانه‌های مختلف تحقیق و پژوهش کرده‌اند. در این راستا پژوهشی در رودخانه رادکان انجام شد و مقاطعی با بستر شنی، جریان یکنواخت و آشفته، بدون موانع و گیاهان و نیز بدون فرم‌های بستر انتخاب گردید و داده‌هایی نظیر دبی، سرعت جریان، مشخصات مصالح بستر و شرایط هندسی مقطع جریان اندازه‌گیری شد. با انجام آنالیز ابعادی مشخص گردید عدد فرود جریان و نسبت شعاع هیدرولیکی به D_{50} می‌تواند به عنوان پارامتر مهم تعیین این ضریب در نظر گرفته شود. نتایج نشان داد ضریب زبری جریان دارای نسبت عکس با عدد فرود می‌باشد و نیز دانه‌بندی مصالح بستر و شعاع هیدرولیکی جریان در محاسبه ضریب زبری مؤثر است. در نهایت رابطه‌ای ارائه شد که می‌تواند با دقتی مناسب ضریب زبری را برای رودخانه مورد مطالعه تخمین بزند. علاوه بر این، رابطه‌ای بر اساس شعاع هیدرولیکی برای تخمین ضریب زبری نیز ارائه گردید.

واژه‌های کلیدی: مهندسی رودخانه، ضریب زبری مانینگ، عدد فرود، رودخانه‌ی رادکان، خراسان رضوی

مقدمه

رودخانه‌ها از دیرباز مورد توجه جوامع انسانی بوده‌اند و در اساس، زندگی و شکل‌گیری جوامع انسانی و تمدن‌های بشری با رودخانه پیوند خورده است. تشکیل شهرهای قدیمی و تمدن‌های باستانی از جمله تمدن‌های ساکن در بین‌النهرین در حد فاصل رودخانه‌های دجله و فرات، تمدن مصر در دره نیل، تمدن چین در دره رودخانه‌ی زرد و هزاران نمونه‌های دیگر مدیون رودخانه‌ها و در کناره‌های آن‌ها گسترش یافته است.

در حال حاضر نیز همانند گذشته به رودخانه‌ها توجه زیادی شده و از رودخانه و آب جاری در آن استفاده‌های زیادی برده می‌شود. تأمین آب شرب، صنعت، کشاورزی و فضای سبز، و نیز پرورش ماهی، محیط‌های تفرجگاهی و تفریحی، مسابقات ورزشی، کشتیرانی و غیره همه و همه از استفاده‌های رودخانه می‌باشند.

تخمین سرعت متوسط جریان در رودخانه‌ها، یکی از مهمترین مشکلات مطرح در هیدرولیک رودخانه‌ها، خصوصاً رودخانه‌های کوهستانی که اغلب فاقد ایستگاه اندازه‌گیری هستند، می‌باشد. برای اندازه‌گیری سرعت آب روش‌های مختلفی وجود دارد که یکی از این روش‌های معمول برای برآورد دبی سیلابی و به ویژه دبی حداکثر لحظه‌ای، روش‌های هیدرولیکی مبتنی بر مشخصات هیدرولیکی مقاطع اندازه‌گیری می‌باشد. در این روش‌ها، پارامتر ضریب زبری مانینگ نقشی اساسی در برآورد میزان دبی رودخانه دارا می‌باشد. انتخاب روش تعیین ضریب زبری، به شرایط رودخانه، دقت مورد نیاز در اندازه‌گیری و شرایط و امکانات موجود در منطقه مورد مطالعه بستگی دارد. دقت مدلسازی‌ها و پیش‌بینی‌های صورت گرفته با استفاده از این رابطه مبتنی بر دقت هر چه بیشتر تخمین ضریب مانینگ با توجه به شرایط منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

از آنجا که تعیین عمق جریان در مشخصه‌های فنی و حقوقی نظیر حدود بستر و حریم رودخانه‌ها، مؤثر می‌باشد، برآورد ضریب زبری علاوه بر ارزش فنی، اهمیت حقوقی نیز پیدا می‌کند، ضمن آنکه در برآورد این پارامتر هرچه دقت بیشتری صورت پذیرد، می‌توان به نتایج محاسبات هیدرولیکی اطمینان بیشتری داشت.

از معادلات و روابط مقاومت جریان در مجاری روباز نظیر رودخانه‌ها می‌توان به رابطه شزی، رابطه دارسی و بسباخ، رابطه مانینگ، رابطه سرعت بی بعد، روابط همبستگی بین دبی جریان و عوامل هیدرولیکی (وزارت نیرو، ۱۳۹۰) اشاره کرد که در این میان معادله مانینگ به علت سادگی و درجه دقت قابل قبول، برگزیده‌ترین انتخاب محققین علم هیدرولیک در تخمین ضریب زبری می‌باشد (ابریشمی و حسینی، ۱۳۸۷)، اعتماد به نتایج محاسبات بستگی به درستی تعیین مقدار ضریب زبری یا n دارد که برای این منظور، بایستی عواملی را که بر مقدار آن تأثیر می‌گذارند، مشخص نمود. این عوامل عبارتند از: زبری سطح بستر و بدنه، پوشش گیاهی، نامنظم بودن سطح مقطع آبراهه، نامنظمی مسیر آبراهه، رسوب‌گذاری و آبشستگی، موانع، تراز سطح آب و دبی، بارمعلق و بار بستر (شفاعی بجستانی، ۱۳۸۷).

تاکنون محققین زیادی در داخل و خارج از کشور بر روی ضریب زبری رودخانه‌ها مطالعه و و طیف گسترده‌ای از نتایج و مدل ارائه کرده‌اند که در جدول ۱ و ۲ به مهم‌ترین آنها اشاره شده است. از آنجا که روابط ارائه شده عمدتاً بر اساس اطلاعات آزمایشگاهی بوده و یا برای رودخانه خاصی توسعه یافته که در محدوده مشخصات همان رودخانه کاربرد دارد، ضرورت داشت به منظور شناسایی عوامل مؤثر در ضریب زبری مانینگ، مطالعاتی بر روی رودخانه شاندیز در استان خراسان رضوی که شرایط و ویژگی‌های خاص خود را دارد صورت پذیرد و روابط مناسب ارائه شود. در این مطالعه، از میان روابط ارائه شده، مناسب‌ترین رابطه برای این رودخانه، مشخص و همچنین رابطه‌ای که بتواند با دقت مناسب و فرمی ساده‌تر نسبت به سایر روابط، ضریب زبری را تخمین بزند، ارائه شد.

جدول ۱- تحقیقات انجام گرفته در مورد ضریب زبری در داخل کشور

| نتیجه | رودخانه | محقق |
|--|------------------------|----------------------------------|
| با استفاده از روابط تجربی به انی نتیجه رسیده اند که روابط کاون، لین کارلسون و مایر نزدیکترین جواب را نسبت به روش اندازه گیری مستقیم به ما می دهد | رودخانه کرخه (خوزستان) | رازقی خرم آبادی و همکاران (۱۳۸۸) |
| $n = (a \times R) + (b \times S^2)$ | فریزی (خراسان رضوی) | عباسی و همکاران (۱۳۹۰) |
| با استفاده از نرم افزار HEC-RAS روش سازمان مدیریت و برنامه ریزی را به عنوان بهترین روش و پس از آن به ترتیب روش کاون و چاو را به عنوان روش مناسب در تعیین ضریب زبری اولیت بندی نمودند. | گرگان رود (گلستان) | پریسای و بهره مند؛ (۱۳۹۱) |
| با کمک مدل HEC-RAS و در نظر گرفتن شاخص خطا، به این نتیجه رسیده اند که بهترین ضریب زبری از روش کاون به دست می آید و همچنین روش های تجربی که عمدتاً مقادیر کمتری نسبت به سایر روش ها را تخمین می زند، نامناسب ترین روش برای این رودخانه پیچانرودی می باشد. | شلمان رود (گیلان) | حق خواه و همکاران؛ (۱۳۹۲) |
| با استفاده از روابط متعدد تجربی، روش هندرسون نسبت به روش های تجربی دیگر از دقت بالاتری در تخمین زبری مانینگ برخوردار بوده و همچنین نتایج به دست از رابطه های میر - پیتر مولر و گراد و راجو سایر اماتیا نیز قابل قبول می باشند | چند رودخانه مهم دنیا | زارع و امیری؛ (۱۳۹۳) |

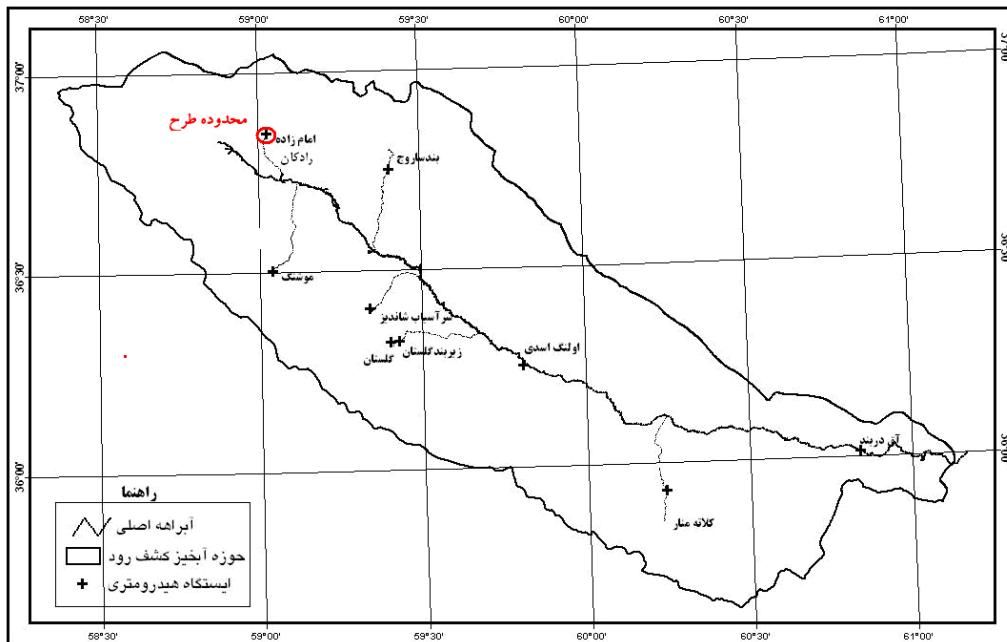
جدول ۲- تحقیقات انجام گرفته در مورد عوامل موثر بر ضریب زبری در خارج از کشور

| نتیجه | محقق | عامل مورد بررسی |
|---|------------------------------------|------------------------------|
| $n = 0.019D_{50}^{\frac{1}{6}}$ | استریکلر (۱۹۲۳) | تأثیر اندازه ذرات رسوبی بستر |
| $n = 0.039D_{50}^{\frac{1}{6}}$ | کیلوگان (۱۹۳۸) | |
| $n = 0.038D_{50}^{\frac{1}{6}}$ | میر پیتر مولر (۱۹۴۸) | |
| $n = 0.028D_{75}^{\frac{1}{6}}$ | لین و کارلسون (۱۹۵۳) | |
| $n = 0.041D_{50}^{\frac{1}{6}}$ | هندرسون (۱۹۶۶) | |
| $n = 0.113 \left[\frac{R^{\frac{1}{6}}}{1.16 + 2.03 \log\left(\frac{R}{D_{84}}\right)} \right]$ | لیمرینوس (۱۹۷۰) | |
| $n = 0.046D_{90}^{\frac{1}{6}}$ | ارتش امریکا (۱۹۹۱) | شیب بستر |
| ارائه رابطه نمایی بین ضریب زبری و شعاع هیدرولیکی و شیب بستر | جارت (۱۹۸۴) | |
| وجود رابطه خطی بین ضریب زبری مانینگ و تغییرات شیب بستر کانال | هسل و همکاران (۲۰۰۳) | |
| پیشنهاد استفاده از پارامتر D_{84} به عنوان مشخصه مصالح بستر در روابط | حبیبی (۲۰۰۶) | |
| ارائه رابطه تخمین ضریب زبری با استفاده از سرعت جریان | کامیتی و همکاران (۲۰۰۷) | |
| انطباق مقاومت برشی جریان با شرایط سطوح تراوا | ریچاردسون و پار (۱۹۹۲) | |
| ارائه رابطه غیر خطی شامل پارامترهای زبری نسبی، عدد فرود، خصوصیات مقطع عرضی و پارامتر انتقال رسوب کف | افضلی مهر و انکتیل (۱۹۹۹) | |
| تنش برشی روی بستر متحرک برابر است با مجموع تنش برشی مقاومت سطحی و مقاومت بستر | یانگ و کیت تان (۲۰۰۸) | |
| رابطه ای مبتنی بر استفاده از $2D_{90}$ برای محاسبه جریان روی سطوح سنگی ارائه نمودند. محققین این معادله را برای شرایط $3 < D_{90} < 30$ قابل استفاده دانستند. | Stephan و Maynard (۲۰۰۹) | |
| در رودخانه های با بستر شن و ماسه ای با استفاده از شرایط هندسی رودخانه در ناحیه ی دشت رابطه $Q = A_c R_H^{0.6906} S^{0.1216}$ را ارائه دادند | Stephen A. Sefick و همکاران (۲۰۱۲) | |
| با کالیبره کردن نتایج بدست آمده از ضرایب تجربی و آزمایشگاهی ارائه فرمول جدیدی برای کانال های با بستر درشت دانه، که نتایج آن نشان می دهد که فرمول جدید برای هر دو جریان کم عمق و عمیق بهترین همخوانی را دارا می باشد | Nian-Sheng Cheng (۲۰۱۵) | |

مواد و روش ها

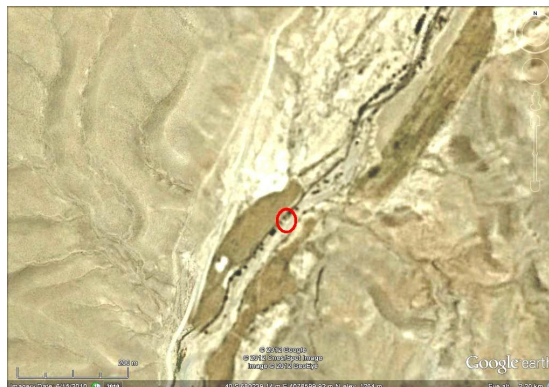
مشخصات منطقه مورد مطالعه

رودخانه رادکان از ارتفاعات «قره لکه» و «مریچگان» شروع و در حواشی روستاهای رادکان و مغان وارد دشت مشهد می شود. وسعت حوضه آبخیز این رودخانه ۲۳۹ کیلومتر مربع و متوسط حجم سالانه آب آن ۱۶ میلیون متر مکعب می باشد.



شکل ۱: محدوده مطالعاتی رودخانه رادکان

به منظور انجام مطالعات تکمیلی، مجموعه‌ای از اطلاعات، با پیمایش صحرائی و برداشت مشخصات هیدرولیکی و هندسی مورد نیاز، برداشت شد. در بازدید میدانی، وضعیت پلان رودخانه مورد بررسی قرار گرفته و نوع ریخت شناسی رودخانه از نظر مستقیم یا پیچان رود بودن تعیین شد. تغییرات مقاطع عرضی از نظر اندازه و شکل نیز مورد بررسی قرار گرفت و بازه‌ای انتخاب گردید که مشابهت آن با محل ایستگاه هیدرومتری زیاد باشد.



شکل ۲: موقعیت ایستگاه هیدرومتری رودخانه رادکان

در مقطعی که اطلاعات جمع آوری شد شرایط جریان یکنواخت، آشفته، بطور هیدرولیکی زبر، بدون موانع و فرم‌های بستر بود تا اثرات این موارد را بر مقاومت جریان تا حد امکان کم کند و بتوان فرض کرد که مقاومت جریان عمدتاً ناشی از اندازه ذرات بستر می باشد. فاصله برداشت مقاطع برای انجام مطالعات مربوط به ضریب زبری از ۲۰ تا ۱۰۰ متر و نیز ۵ برابر عرض مقطع جریان، توصیه شده است. علاوه بر این، مقدار D_{50} باید مساوی یا بیشتر از ۲ میلیمتر باشد که شن، قلوه سنگ یا تخته سنگ در بستر رودخانه می باشد.

بنابراین تلاش شد تا اطلاعات جمع آوری شده شرایط ذکر شده در بالا را داشته باشند، هرچند این موارد بطور کامل امکان پذیر نیست. در شکل (۲) تصویر ماهواره‌ای موقعیت ایستگاه هیدرومتری رودخانه رادکان مشاهده می‌شود. برای اندازه‌گیری مقاطع، بازه‌ی رودخانه‌ی مورد مطالعه به ترتیب جدول (۲) انتخاب گردید.

جدول ۳: بازه‌ی رودخانه‌ی منتخب استان و مقاطع عرضی مورد بررسی آنها

| تعداد مقاطع عرضی برداشت شده در هر مرحله | | | طول کل بازه مورد مطالعه | نام رودخانه |
|---|-----------------------|-----------------------|-------------------------|-------------|
| مرحله سوم اندازه‌گیری | مرحله دوم اندازه‌گیری | مرحله اول اندازه‌گیری | | |
| ۵ مقطع عرضی | ۵ مقطع عرضی | ۶ مقطع عرضی | ۸۰ متر | رادکان |

محدوده پارامترهای برداشت شده در جدول ۴، مشاهده می‌شوند.

جدول ۴: محدوده پارامترهای اندازه‌گیری شده

| محدوده | پارامتر اندازه‌گیری شده (واحد) |
|---------------|--------------------------------|
| ۰/۰۱۵ تا ۲/۹۷ | دبی (متر مکعب بر ثانیه) |
| ۱/۳۳ تا ۰/۲۵ | سرعت (متر بر ثانیه) |
| ۰/۰۱۳۵ | شیب |
| ۲/۳۳ تا ۰/۰۵۸ | مساحت خیس شده (متر مربع) |
| ۱۱/۳۸ تا ۱/۰۲ | محیط خیس شده (متر) |
| ۱ تا ۱۱/۲ | عرض سطح آب (متر) |
| ۸ | D ₅₀ (میلی‌متر) |

آنالیز ابعادی

با بکارگیری متغیرهای هیدرولیکی و هندسی مؤثر بر ضریب زبری مانینگ، می‌توان رابطه‌ای جهت تخمین این پارامتر بدست آورد. بدین منظور، ابتدا با بکارگیری آنالیز ابعادی، متغیرهای بدون بعد مؤثر بر ضریب زبری مانینگ مشخص و سپس به بررسی چگونگی تأثیر آنها پرداخته شد. برداشت پارامترهای هندسی و محاسبه مقادیر هیدرولیکی مورد نظر، امکان برآورد ضریب زبری مانینگ با استفاده از روابط تئوری را فراهم می‌سازد. ضریب زبری مانینگ، به پارامترهای مختلفی مطابق رابطه (۱)، بستگی دارد [۲ و ۱۱].

$$n = f(\rho, V, y, \mu, g, b, k_s, S_0) \quad (1)$$

که در آن، n ضریب زبری مانینگ، ρ جرم واحد حجم آب، V سرعت متوسط جریان آب، y عمق جریان، μ ضریب لزجت دینامیکی آب، g شتاب ثقل زمین، b عرض سطح آب، k_s اندازه متوسط ذرات بستر و S_0 شیب بستر می‌باشند. با استفاده از تئوری باکینگهام و انتخاب سه متغیر ρ ، V و y به‌عنوان متغیرهای تکراری، خواهیم داشت:

$$n = f\left(\text{Re}, \text{Fr}, S_0, \frac{R_h}{k_s}\right) \quad (2)$$

که در آن، Re عدد رینولدز جریان، Fr عدد فرود جریان و R_h شعاع هیدرولیکی، S_0 شیب و k_s شاخص ذرات بستر هستند که در این پژوهش پس از بررسی گزینه‌های مختلف قطر ذرات بستر، در نهایت D_{50} به عنوان شاخص ذرات بستر، مورد استفاده قرار گرفت. از آنجا که در تمام برداشت‌های این مطالعه، عدد رینولدز بیش از ۳۵۰۰۰ بوده که جریان را در شرایط متلاطم قرار می‌دهد، می‌توان اثر لزجت و یا عدد رینولدز صرف‌نظر کرد. همچنین شیب رودخانه در بازه مورد مطالعه مقدار ثابت ۰/۰۱۳۵ بوده، لذا رابطه (۲) به صورت ساده‌تری در خواهد آمد:

$$n = f\left(\text{Fr}, \frac{R_h}{k_s}\right) \quad (3)$$

شاخص‌های آماری

در این مطالعه به منظور مقایسه دقت روابط مختلف در تخمین مقدار ضریب زبری مانینگ از شاخص‌های آماری مطابق جدول ۵، استفاده شد:

جدول ۵: شاخص‌های آماری

| رابطه | شاخص |
|--|------------------------|
| $MSE = \frac{\sum_{i=1}^m (n_c - n_o)^2}{m}$ | میانگین مربعات خطا |
| $RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (n_c - n_o)^2}{m}}$ | جذر میانگین مربعات خطا |

در روابط بالا، n_c ضریب زبری محاسباتی، n_o ضریب زبری مشاهداتی و m تعداد داده‌ها می‌باشند.

نتایج و بحث

روابط ارائه شده توسط سایر محققین و بررسی آن

بطور کلی روابط برآورد ضریب زبری را می‌توان به دو دسته طبقه‌بندی کرد:

(الف) روابطی که ضریب زبری ناشی از یکی از عوامل را تعیین می‌کنند.

(ب) روابطی که ضریب زبری هیدرولیکی ناشی از مجموع چند عامل مؤثر را تعیین می‌کنند.

با توجه به این که روابط ارائه شده محاسبه ضریب زبری برای هر رودخانه نیاز به واسنجی و یا توسعه روابط جدیدتر داشته، در این مقاله با توجه به پارامترهای هندسی و هیدرولیکی برداشت شده، روابط مختلف مورد بررسی قرار گرفتند. همانگونه که در جدول (۵) مشاهده می‌شود، یک دسته از روابط موجود در تخمین ضریب زبری مانینگ تنها به مشخصه‌ای از قطر ذرات بستر وابسته‌اند. با استفاده از این روابط و بکار بردن قطر ذرات بستر برداشت شده از رودخانه رادکان، روابط فوق برای رودخانه مورد مطالعه محاسبه شده و در جدول (۶) روابط فوق و در جدول (۷) نتایج حاصل از آنها آمده است.:

جدول ۶: مقدار ضریب زبری تخمین زده شده با روابط مختلف

| رابطه | محقق (سال) |
|----------------------------|----------------------|
| $n = 0.019 D \frac{1}{50}$ | استریکلر (۱۹۲۳) |
| $n = 0.039 D \frac{1}{50}$ | کیلوگان (۱۹۳۸) |
| $n = 0.038 D \frac{1}{50}$ | میر پیتر مولر (۱۹۴۸) |
| $n = 0.028 D \frac{1}{75}$ | لین و کارلسون (۱۹۵۳) |
| $n = 0.041 D \frac{1}{50}$ | هندرسون (۱۹۶۶) |
| $n = 0.046 D \frac{1}{90}$ | ارتش امریکا (۱۹۹۱) |

جدول ۷: نتایج مقدار ضریب زبری تخمین زده شده با روابط مختلف

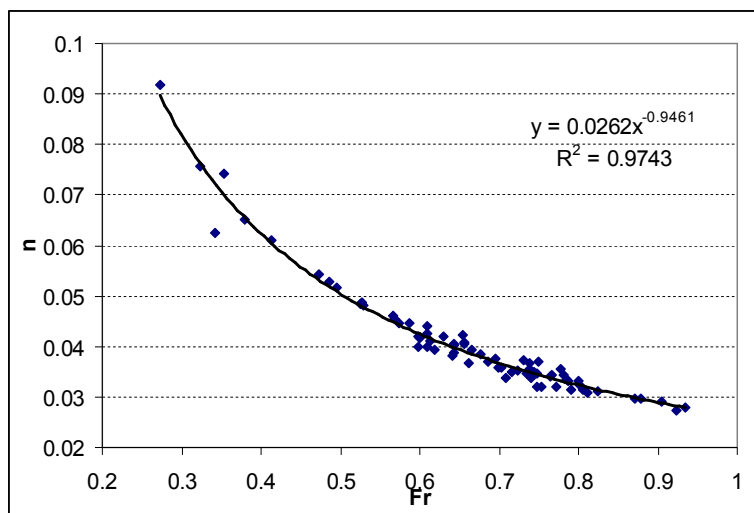
| رابطه | | | | | | رودخانه |
|----------|---------|---------------|---------------|---------|-------------|---------|
| استریکلر | کیلوگان | میر پیتر مولر | لین و کارلسون | هندرسون | ارتش امریکا | |
| ۰/۰۱۸ | ۰/۰۱۸ | ۰/۰۱۶ | ۰/۰۱۴ | ۰/۰۱۸ | ۰/۰۲۵ | رادکان |

اگر نتایج جدول (۷) را با میانگین ضریب زبری رودخانه‌ی رادکان، که ۰/۰۴۱، می‌باشد را مقایسه کنیم به این نتیجه می‌رسیم که این روابط نمی‌توانند تخمین مناسبی از ضریب زبری داشته باشند. به عبارت دیگر به نظر می‌رسد روابطی که در آنها برای تخمین ضریب زبری فقط از قطر متوسط ذرات بستر استفاده می‌شود، نمی‌توانند تخمین‌های مناسبی از ضریب زبری داشته باشند و لازم است علاوه بر مشخصات فیزیکی و هندسی رودخانه نظیر شعاع هیدرولیکی، عمق هیدرولیکی و دانه‌بندی بستر، پارامتری که بیانگر رفتار هیدرولیکی جریان در رودخانه باشد نیز بایستی در نظر گرفته شود.

روابط پیشنهادی ارائه شده

الف) رابطه‌ی هیدرولیکی

با انجام آنالیز ابعادی پارامترهای مؤثر در ضریب زبری مطابق رابطه (۴)، مشاهده می‌شود، علاوه بر قطر ذرات بستر، رفتار هیدرولیکی جریان نیز بایستی به‌نحوی در نظر گرفته شود. طبق این رابطه، عدد فرود جریان می‌تواند به عنوان پارامتر بیان کننده این رفتار در محاسبه ضریب زبری به کار گرفته شود. بررسی تحقیقات صورت گرفته توسط سایر محققین مشخص کرد، در کانال‌های مصنوعی عدد فرود جریان دارای نسبت عکس با ضریب زبری می‌باشد. به منظور مشاهده‌ی روند تأثیرگذاری عدد فرود جریان بر ضریب زبری در کانال‌های طبیعی نیاز به بررسی این ضریب در کانال‌های طبیعی بود که نتایج این بررسی در رودخانه رادکان نشان داد، با افزایش عدد فرود جریان، ضریب زبری مانینگ در رودخانه نیز روندی کاهشی از خود نشان می‌دهد. نتایج این بررسی در شکل (۳) مشاهده می‌شود.



شکل ۳: تغییرات ضریب زبری مانینگ و عدد فرود جریان در رودخانه رادکان

با توجه به اهمیت عدد فرود از میان روابطی که توسط سایر محققین برای محاسبه ضریب هیدرولیکی که ناشی از مجموع چند عامل مؤثر باشد می‌توان به رابطه ارائه شده توسط (آگرت و مادرید، ۱۹۹۴) (رابطه‌ی ۴) اشاره کرد که تأثیر این عدد در آن در آمده است. [۱۴]

$$n = \left[0.183 + \ln \left(\frac{1.74S^{0.1581}}{Fr^{0.263}} \right) \right] \times \left(\frac{D_{84}^6}{g^2} \right) \quad (4)$$

با استفاده از این رابطه تأثیر عدد فرود جریان بر ضریب زبری بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این بررسی برای هر رودخانه رادکان در جدول ۷ آورده شده است.

جدول ۸: مقدار ضریب زبری محاسبه شده با رابطه‌ی آگرت و مادرید

| رادکان | رودخانه |
|--------|-----------------------------------|
| ۰/۰۲۸ | ضریب زبری محاسبه شده با رابطه (۴) |

چنانچه نتیجه جدول ۷ و نیز ضریب متوسط زبری رودخانه‌ی رادکان که قبلاً به آن اشاره شد نشان می‌دهد و نیز با توجه به شرایط هندسی و هیدرولیکی خاص هر رودخانه نیاز به توسعه روابطی که در شرایط آن رودخانه صادق باشد، احساس می‌شود، لذا بدین منظور و با بهره‌گیری از داده‌های برداشت شده و همچنین روش ریاضی برازش (Solver)، رابطه‌ای جهت محاسبه ضریب زبری برای رودخانه رادکان ارائه شد تا بتواند با دقت مطلوب‌تری ضریب زبری در رودخانه‌ی مورد نظر را تخمین بزند.

ارائه رابطه

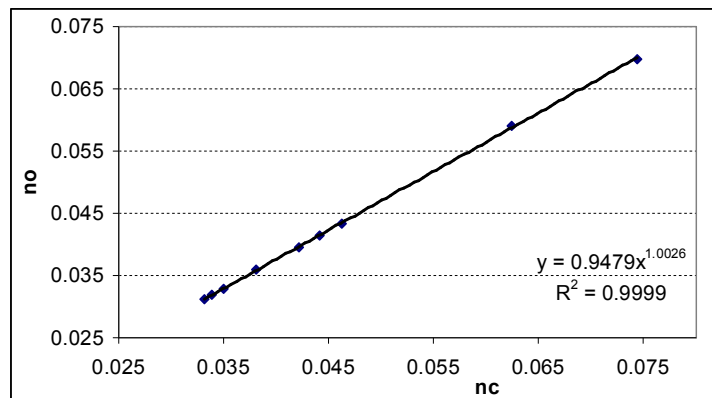
عواملی که به عنوان متغیر مستقل در معادله برازش استفاده می‌شوند، بایستی متغیرهای هیدرولیکی و هندسی را در برگیرند. این متغیرهای مستقل شامل کلیه متغیرهای بی‌بعد اشاره شده به روش آنالیز ابعادی می‌باشند. که این عمل با بررسی توأم عوامل مؤثر بر ضریب زبری (رابطه (۳)) با استفاده از دستور Solver در محیط نرم‌افزار Microsoft Office Excel 2007 و رگرسیون چند متغیره صورت گرفت.

برای ادامه کار و به منظور دستیابی به بهترین رابطه، داده‌های موجود به دو دسته تقسیم شدند. از ۸۰٪ داده‌ها برای محاسبات مربوط به رگرسیون چند متغیره و ۲۰٪ باقی‌مانده به عنوان داده‌های آزمون مورد استفاده قرار گرفتند. این دسته‌بندی به صورت کاملاً تصادفی انجام شد. نتایج این بررسی به عنوان بهترین رابطه برای محاسبه ضریب زبری برای رودخانه رادکان بشکل غیرخطی بصورت رابطه (۵) بدست آمد که این نتایج در جدول (۹) آمده است.

جدول ۹: رابطه ارائه شده برای رودخانه رادکان

| شماره رابطه | رابطه | ضریب تبیین |
|-------------|--|------------|
| (۵) | $n = 0.015 \times \frac{\left(\frac{R}{k_s}\right)^{0.16}}{Fr}$ <p>R = شعاع هیدرولیکی، $D_{50} = k_s$ = قطر متوسط ذرات بستر و Fr عدد فرود جریان</p> | ۰/۹۹۹ |

در ادامه به منظور بررسی دقت روابط ارائه شده، مقدار ضریب زبری برای ۲۰٪ داده‌های آزمون که در مرحله قبل مورد استفاده قرار نگرفتند، استفاده شد. نتایج حاصل از مقایسه مقدار تخمین زده شده از روابط مذکور با مقادیر واقعی در شکل (۴) مشاهده می‌شود که حاکی از انطباق بسیار خوب بین مقادیر ضریب زبری از رابطه مذکور با مقادیر واقعی است.



شکل ۴: مقایسه مقادیر تخمین زده شده و مشاهده‌ای ضریب زبری داده‌های آزمون در رودخانه رادکان

برای مقایسه دقت محاسباتی مقدار ضریب زبری رابطه ارائه شده با روابط پیشنهادی و رابطه آگرت و مادرید (۱۹۹۴)، با شاخص‌های آماری که در جدول (۴)، آورده شده است، رابطه (۵) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت که نتایج حاصل از آن در جدول (۱۰) آمده است.

جدول ۱۰: مقایسه‌ی نتایج آماری رابطه‌ی پیشنهادی و رابطه‌ی آگرت و مادرید

| رودخانه | R ² | | MSE | | RMSE |
|---------|----------------|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------|
| | رابطه پیشنهادی | رابطه آگرت و مادرید | رابطه پیشنهادی | رابطه آگرت و مادرید | رابطه آگرت و مادرید |
| رادکان | ۰/۹۹۹ | ۰/۹ | $7/5 \times 10^{-6}$ | ۰/۰۰۰۱ | ۰/۰۱ |

همانگونه که مشاهده می‌شود، رابطه پیشنهادی، اولاً دارای فرم ساده‌تری نسبت به رابطه (آگرت و مادرید، ۱۹۹۴) بوده، ثانیاً برای محاسبه ضریب زبری نیاز به اندازه‌گیری پارامترهای کمتری می‌باشد. ضمن آنکه همانگونه که در جدول (۹) و (۱۰)، مشاهده می‌شود، این رابطه دارای دقت به مراتب بالاتری از رابطه (آگرت و مادرید، ۱۹۹۴) می‌باشد.

ب) روابط هندسی

در این قسمت تلاش شد با استفاده از نرم افزار IBM SPSS 22.0 روابطی بین ضریب زبری اندازه‌گیری شده و مشخصات هندسی هیدرولیکی نظیر ارتفاع اشل در زمان اندازه‌گیری، پیرامون مرطوب، شعاع هیدرولیکی و عمق هیدرولیکی برقرار گردد. در بین پارامترهای مورد بررسی اگرچه مطلوب این بود که رابطه‌ای بین ضریب زبری و ارتفاع اشل برقرار گردد تا با سهولت بیشتری بتوان از آن استفاده کرد، ولی همبستگی ضریب زبری با این پارامتر در حد قابل قبول نمی‌باشد که شاید یکی از دلایل آن این باشد که تغییرات در عمق به تنهایی نمی‌تواند در بر گیرنده تغییرات ضریب زبری باشد. با بررسی بیشتر و مدلسازی رگرسیون غیر خطی در بین پارامترهای مورد بررسی رابطه ضریب زبری با شعاع هیدرولیکی از روند مطلوبی برخوردار می‌باشد. چگونگی روند تغییرات این دو پارامتر برای رودخانه رادکان در جداول (۱۰) تا (۱۳) و در شکل (۵) و رابطه‌ی (۶) نتایج مدل رگرسیونی برازش شده ارائه گردیده است. از آنجا که هدف اصلی این مطالعه استخراج روابط ساده و کاربردی برای تخمین ضریب زبری در مواقعی که امکان اندازه‌گیری جریان وجود ندارد، می‌باشد، رابطه‌ی ارائه شده این هدف را برآورده می‌کند. زیرا با اندازه‌گیری داغ آب جریان و مقطع عرضی، امکان استخراج سطح مقطع و پیرامون مرطوب میسر بوده و در نتیجه شعاع هیدرولیکی قابل محاسبه می‌باشد که می‌توان با استفاده از این روابط ضریب زبری مقطع را متناسب با داغ آب برداشت شده تخمین زد. اگرچه مطلوب این بود که از اطلاعات اندازه‌گیری شده سیلاب‌ها استفاده شود، ولی متأسفانه بیشتر اطلاعات سیلاب‌ها بر اساس اندازه‌گیری سرعت جریان نبوده و بر اساس تخمین ضریب زبری استوار می‌باشد که در این مطالعه قابل استفاده نبود.

جدول ۱۰: خلاصه مدل رگرسیونی غیر خطی توانی ضریب زبری در برابر شعاع هیدرولیکی برای رودخانه رادکان

| مدل | R | R ² | R ² Adjusted | Std. Error of the Estimate |
|-----|-------|----------------|-------------------------|----------------------------|
| | ۰/۷۳۶ | ۰/۵۴۱ | ۰/۵۲۸ | ۰/۱۰۹ |

همانطور که در جدول فوق مشاهده می‌شود ۵۴٪ از تغییرات ضریب زبری توسط متغیر شعاع هیدرولیکی توضیح داده می‌شود.

جدول ۱۱: جدول تحلیل واریانس غیر خطی توانی ضریب زبری در برابر شعاع هیدرولیکی برای رودخانه رادکان

| منابع تغییر | Ss | df | Ms | نسبت F | سطح معنی داری |
|-------------|-------|----|-------|--------|---------------|
| رگرسیون | ۰/۵۰۲ | ۱ | ۰/۵۰۲ | ۴۲/۳۹ | <۰/۰۰۰۱** |
| مانده | ۰/۴۲۶ | ۳۶ | ۰/۰۱۲ | | |
| کل | ۰/۹۲۸ | ۳۷ | - | | |

Ss: مجموع مربعات df: درجه آزادی MS: میانگین مربعات

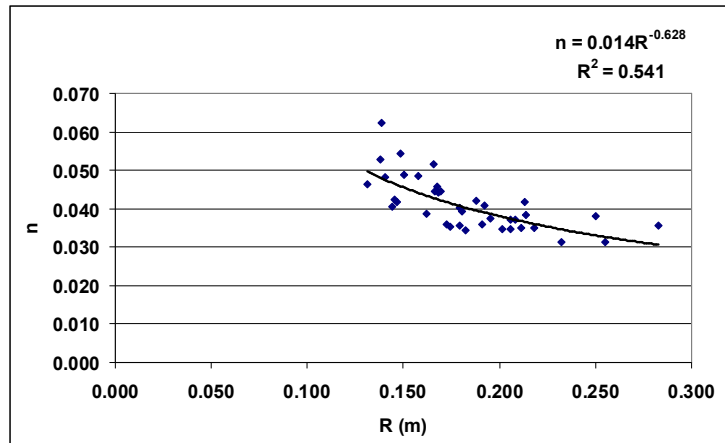
با توجه به مقدار نسبت F و سطح معنی داری تحلیل واریانس مدل رگرسیونی، از آنجایی که سطح معنی داری از ۰/۰۵ کوچکتر است، مدل رگرسیونی غیر خطی به کار برده شده معنادار است.

جدول ۱۲: جدول ضرایب رگرسیونی ضریب زبری در برابر شعاع هیدرولیکی برای رودخانه رادکان

| سطح معنی داری | t | Standardized Coefficients | Unstandardized Coefficients | | مدل |
|---------------|-------|---------------------------|-----------------------------|--------|-----------|
| | | Beta | Std. Error | B | |
| <۰/۰۰۰۱** | ۶/۰۲ | | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۱۴ | ضریب ثابت |
| <۰/۰۰۰۱** | -۶/۵۱ | -۰/۷۳۵ | ۰/۰۹۶ | -۰/۶۲۸ | Ln(R) |

B: ضریب رگرسیونی std. error: خطای ضریب رگرسیونی beta: ضریب استاندارد شده b

جدول فوق ضرایب رگرسیون و معناداری هر یک از آنها را نشان می دهد. معادله رگرسیونی نیز در جدول (۱۳) ارائه شده است.



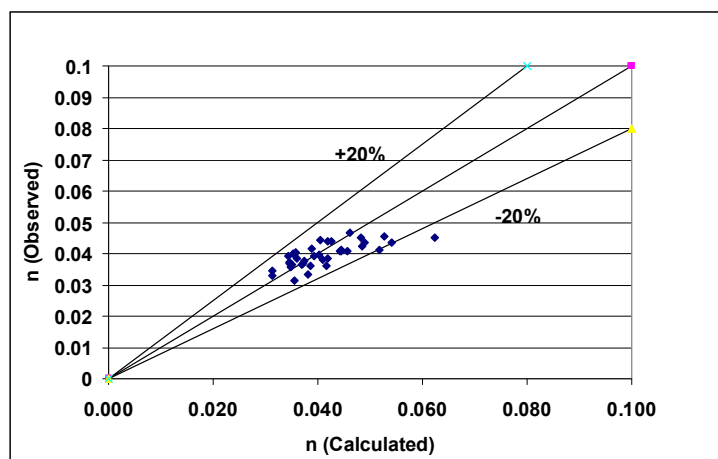
شکل ۵: تغییرات ضریب زبری و شعاع هیدرولیکی در رودخانه رادکان

در جدول (۱۳)، رابطه‌ی ریاضی استخراج شده برای رودخانه مورد مطالعه، مشاهده می‌شود.

جدول ۱۳: رابطه‌ی ریاضی برای رودخانه‌ی مورد مطالعه

| رودخانه | شماره رابطه | رابطه | R ² |
|---------|-------------|-------------------------------|----------------|
| رادکان | (۶) | $n = \frac{0.014}{R^{0.628}}$ | ۰/۵۴۱ |

مقادیر ضریب زبری اندازه‌گیری شده (مشاهده‌ای) و ضریب زبری محاسبه شده بر اساس رابطه‌ی توسعه یافته برای رودخانه‌ی رادکان در شکل (۶) ارائه گردیده؛ بر اساس این نمودار، پراکنش نقاط حول خط ۴۵ درجه بوده و در محدوده ۲۰ درصد خطا قرار دارند.



شکل ۶: مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و محاسبه‌ای در رودخانه رادکان

نتیجه‌گیری

از نتایج بدست آمده از این مطالعه، می‌توان به بیان موارد زیر پرداخت:

۱- روابط ارائه شده در این مقاله برای هر رودخانه، می‌تواند با دقت بالاتری نسبت به روابط قبیل، ضریب زبری مانینگ را تخمین بزند.

- ۲- از آنجا که روابطه ارائه شده برای بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده رودخانه می‌باشد می‌توان ادعا کرد که این روابطه با دقت بالا می‌تواند ضریب زبری رودخانه را تخمین بزند.
- ۳- روابطی که تنها اثر دانه‌بندی مصالح بستر را در نظر می‌گیرند، بطور کلی نمی‌توانند تخمین مناسبی از این ضریب ارائه دهند.
- ۴- در محاسبه ضریب زبری بایستی تاثیر رفتار هیدرولیکی جریان بر مقاومت جریان مدنظر قرار گیرد.
- ۵- در راستای نتایج سایر محققین بر تاثیر عکس عدد فرود با ضریب زبری در این مقاله نیز اثر این تأثیر بر ضریب زبری مانینگ در رودخانه‌ی مورد مطالعه به اثبات رسید.
- ۶- با توجه به همبستگی قوی و معنی دار بودن داده‌های اندازه‌گیری شده، روابط هندسی ارائه شده برای تخمین ضریب زبری بر اساس شعاع هیدرولیکی، با توجه به اینکه بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده زیادی استوار است، می‌تواند در زمانی که امکان اندازه‌گیری جریان وجود ندارد برای تخمین ضریب زبری، بکار رود.

منابع

- ابریشمی، ج، حسینی، س، م، ۱۳۸۷ ف هیدرولیک کانال‌های باز، مشهد. انتشارات دانشگاه امام رضا (ع).
- بهرامی یار احمدی، م، شفافی بجستان، م، ۱۳۹۰، بررسی آزمایشگاهی اثر شکل ذرات رسوبی بستر بر ضریب زبری مانینگ. مشهد. نشریه آب و خاک. دانشگاه فردوسی ۶۰-۵۱: (۱)۲۵.
- بی‌نام، راهنمای تعیین ضریب زبری هیدرولیکی رودخانه‌ها. ۱۳۹۰. وزارت نیرو. معاونت امور آب و آبفا. دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا. ۳۳۱-الف.
- پریسای، زهرا، بهره‌مند، عبدالرضا، (۱۳۹۱)، بررسی مناسب‌ترین روش تعیین ضریب زبری دربخشی از رودخانه گرگانرود؛ سومین همایش ملی مقابله با بیابان زایی و توسعه پایدار تالاب‌های کویری ایران، اراک - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک؛
- حق خواه، محمد، عمادی، علیرضا، فضل اولی، رامین، (۱۳۹۲)، تخمین ضریب زبری مانینگ در کانال‌های طبیعی (مطالعه موردی: سلمان‌رود)؛ پنجمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران؛ تهران - انجمن علوم و مهندسی منابع آب ایران، دانشگاه شهید بهشتی
- رازقی خرم آبادی، شادی، حسونی زاده، هوشنگ، رستمی، سعید، (۱۳۸۸)، تعیین ضریب زبری با استفاده از روشهای تجربی در بازه ی از رودخانه کرخه؛ هشتمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه؛ اهواز، دانشگاه شهید چمران اهواز
- زارع، محمد، امیری، محراب، (۱۳۹۳)، بررسی روش‌های تجربی مختلف در تعیین ضریب زبری رودخانه؛ هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، بابل - دانشگاه صنعتی نوشیروانی؛
- شفافی بجستان، م، ۱۳۸۷، اصول نظری و عملی هیدرولیک انتقال رسوب. اهواز. انتشارات دانشگاه شهید چمران.
- شفافی بجستان، م، ۱۳۸۷، جریان در کانال‌های باز. اهواز. انتشارات دانشگاه شهید چمران.
- عباسی، ع، الف، غفوریان، ر، رعنائی، الف، ۱۳۹۰، تخمین پارامتر ضریب زبری مانینگ با توجه به مشخصات هیدرولیکی رودخانه (مطالعه موردی: بازه‌ای از رودخانه فریزی). رشت. دهمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه گیلان.
- همایون، ر، فرهودی، ج، کوچک‌زاده، ص، ۱۳۸۷، مطالعه اثر عمق جریان بر ضریب زبری مانینگ در بسترهای با زبری متفاوت. تهران. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، گروه آبیاری و آبادانی. رشته سازه‌های آبی، دانشگاه تهران.
- Afzalimehr H., and Anctil F. 1999. Estimation of gravel-bed flow resistance. Journal of Hydraulic Engineering, 124 (10):1054-1058.
- Comiti F., Mao, L., Wilcox, A., Wohl, E.E., and Lenzi M.A. 2007. Field-derived relationships for flow velocity and resistance in high-gradient streams. Journal of Hydrology. 340:48- 62.
- Habibi M. 2006. Flow resistance of mountain streams. Technical Report. Soil conservation and Watershed Management Research Institute. Habibi M., 2006. Flow resistance of mountain streams. Technical Report. Soil conservation and Watershed Management Research Institute.
- Hessel R., Jetten V. and Guanghui Z. 2003. Estimating Manning's n for steep slopes. Catena, 54: 77-91.
- Maynard S.T. (2009). FLOW RESISTANCE OF RIPRAP, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.117, No. 6.

- Nian-Sheng Cheng; (2015); Resistance Coefficients for Artificial and Natural Coarse-Bed Channels: Alternative Approach for Large-Scale Roughness; *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 141, No. 2
- Richardson C. P., and Parr A. D. 1992. Friction and free-surface flow over porous media. *Journal of Hydraulic Engineering*. 117 (11): 1496-1512.
- Stephen A. Sefick, Latif Kalin Associate, Ely Kosnicki, Brad P. Schneid, Miller S., Chris J., Michael H., Jack W.;(2015); empirical Estimation of Stream Discharge Using Channel Geometry in Low-Gradient, Sand-Bed Streams of the Southeastern Plains; JAWRA- of the *Journal of the American Water Resources Association*, 14-0086-P
- Yang S.Q., and Tan S.K. 2008. Flow Resistance over mobile bed in an open-channel flow, *Journal of Hydraulic Engineering*, 134 (7):937-947.