

تأثیر فرم بستر در افزایش عمق جریان

مهدی حسن زاده، فرزین سلماسی*، علی حسین زاده دلیر، هادی اروغنی

گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

* ferzin.salmasi@gmail.com

چکیده

با انتقال رسوبات بستر در مجاری آبرفتی، اشکال منظم و متناوب مثلثی شکل در بستر رودخانه ایجاد می شود که فرم بستر نامیده می شوند. متناسب با مشخصات و رژیم جریان، ابعاد هندسی فرم بستر تغییر یافته و اثر متقابل آن در تغییر زبری بستر و افزایش عمق جریان (به ویژه برای فرم های شکنج و تلماسه) قابل ملاحظه است. از طرفی پیش بینی عمق جریان براساس زبری بستر در مدل سازی و طراحی سازه های هیدرولیکی حائز اهمیت می باشد. به این ترتیب پیش بینی مقاومت جریان و عمق متناظر با آن در مجاری با بستر متحرک به دلیل عدم قطعیت مربوط به تشکیل و تغییر فرم های بستر از چالش های طراحی و مدل سازی در این مجاری می باشد. به همین منظور ارائه رابطه ای دقیق، ساده و کاربردی برای تخمین حداکثر تراز جریان در حضور فرم بستر بسیار مهم و ضروری خواهد بود. بنابراین در این پژوهش با استفاده از ۴ منبع تحقیقاتی و ۲۹۲ مورد آزمایش ثبت شده، رابطه خط ساده و کاربردی برای پیش بینی تراز جریان در شرایط رژیم جریان پایین ارائه شده است. براساس رابطه مذکور همچنین ضریب ۱/۲۵ به عنوان ضریب ویژه دانشگاه تبریز نیز ارائه گردیده است که محاسبات مربوط به تخمین عمق جریان در حضور فرم بستر تلماسه و شکنج را بسیار ساده نموده و دارای دقت کافی برای محاسبات می باشد. ارزیابی دقت رابطه پیشنهادی برای ضریب زبری مانینگ در علوم آزمایشگاهی مناسب ارزیابی گردید.

کلیدواژه ها: فرم بستر تلماسه، فرم بستر شکنج، مقاومت جریان، ضریب مانینگ، ضریب ویژه دانشگاه تبریز

۱- مقدمه

حرکت رسوبات در رودخانه های آبرفتی تحت تأثیر آشفتگی جریان و در شرایط جریان پایدار، منجر به ایجاد اشکال موجی شکل متناوب و منظمی می شود که به عنوان فرم بستر شناخته می شوند. با تغییر دبی، رژیم جریان و اثر متقابل آن در نرخ انتقال رسوب و آشفتگی، مورفولوژی، نوع و ابعاد فرم بستر نیز تغییر می یابد. با تغییر مورفولوژی، مشخصات هیدرودینامیکی جریان تحت تأثیر قرار گرفته و با اتلاف انرژی ناشی از جدایی خط جریان، زبری در مقایسه با بستر تخت (صاف) افزایش می یابد. بنابراین شرایط هیدرولیکی در مجاری آبرفتی تابعی از دو عامل شرایط جریان و شرایط بستر می باشد که به دلیل تأثیر متقابل مورفولوژی بستر روی شرایط جریان، پیش بینی شاخص های هیدرولیکی در بسترهای متحرک به یک چالش علمی تبدیل گردیده است. از طرفی پیش بینی دقیق زبری بستر و تراز متأثر از آن در مدل سازی و طراحی سازه های هیدرولیکی، روندیابی سیلاب و مهندسی رودخانه حائز اهمیت می باشد. لذا شناخت فرآیندهای هیدرودینامیکی و مورفولوژیکی در مجاری آبرفتی با بستر متحرک مورد توجه محققین در حوزه علوم مهندسی رودخانه قرار گرفته و تحقیقات متعددی نیز جهت پیش بینی مقاومت جریان در حضور فرم بستر به ویژه تلماسه و شکنج صورت گرفته است. پژوهشگران با دو رویکرد اصلی، اثر فرم بستر در مقاومت جریان را مطالعه نموده اند. تعدادی از محققین، زبری بستر را به دو بخش زبری ذره و زبری فرم بستر تقسیم نموده اند و عوامل

مؤثر بر زبری فرم بستر را مطالعه نموده‌اند [۶-۱]. در مقابل در رویکرد دوم، مقاومت جریان در بسترهای متحرک به صورت کلی و بدون تفکیک به دو بخش ذره و فرم بستر مطالعه شده است [۱۲-۷]. تمام مطالعاتی که در قالب دو رویکرد انجام شده‌اند، تأثیر عوامل مختلف شامل پارامترهای هیدرولیکی، شکل و هندسه بستر، هندسه مجرا و مواد بستر را در تغییر پارامتر مقاومت جریان مورد سنجش و ارزیابی قرار داده و براساس آنالیز ابعادی و مطابق نتایج آزمایشگاهی یا برداشت‌های میدانی، روابط تجربی را استخراج و ارائه نموده‌اند.

انیشتین و بارباروسا [۱] سرعت برشی نسبی (v/u_*') را تابعی از شعاع هیدرولیکی مربوطه ذره (R') ، اندازه ذرات (D_{35}) و چگالی نسبی ذرات رسوبی (G_s) معرفی نموده و رابطه آن‌ها را به صورت نمودار نمایش داده است. انگولند [۲] شیب انرژی مربوط به فرم بستر را تابعی از عمق جریان (y) ، چگالی نسبی ذرات رسوبی (G_s) و عدد فرود فرض کرده است. در روش فان راین [۴] زبری بر اساس دانه‌بندی ذرات و هندسه فرم بستر (ارتفاع و طول) محاسبه می‌گردد. بر اساس تحقیقات کولوسیمو و همکاران [۱۳]، مقاومت جریان تابعی از عدد فرود، دانه‌بندی ذرات، عرض سطح مقطع و شعاع هیدرولیکی می‌باشد. وو و ونگ [۱۱] با آنالیز ابعادی، پارامتر زبری A را تابعی از پارامتر انتقال T و عدد فرود تعریف نموده و رابطه تجربی برای محاسبه پارامتر زبری ارائه کردند. یانگ و همکاران [۶] شیب فرم بستر (نسبت ارتفاع به طول فرم بستر) را عامل تأثیرگذار و اصلی در طول جدایی خط جریان، زبری فرم بستر و اتلاف انرژی مربوطه معرفی نموده و روابط تجربی برای محاسبه پارامترهای مذکور ارائه نموده‌اند. کومار و همکاران [۱۴] عدد فرود را عامل تأثیرگذار در محاسبه مقاومت جریان در رودخانه‌های آبرفتی معرفی نموده و رابطه تجربی براساس پارامترهای زبری ذرات، عدد رینولدز و عدد فرود ارائه نمودند. ثاقبیان و همکاران [۳] با استفاده از روش‌های هوش مصنوعی و بر اساس داده‌های آزمایشگاهی پارامترهای مختلف تأثیرگذار در زبری بستر را مورد بررسی قرار دادند. براساس مطالعات ایشان، عدد رینولدز در مقایسه با سایر پارامترهای هیدرولیکی دارای همبستگی بهتری با مقاومت جریان می‌باشد. لیو و همکاران [۱۰] با بررسی داده‌های میدانی رودخانه یانگ تسه، رابطه تجربی به صورت تابعی از عدد فرود و نسبت عمق جریان به اندازه میانه ذرات $\left(\frac{y}{D_{50}}\right)$ برای محاسبه ضریب زبری مانینگ ارائه نموده‌اند.

روابط تجربی که برای محاسبه پارامترهای زبری بستر یا مقاومت جریان ارائه شده‌اند عمدتاً به صورت روابط پیچیده توانی و بر اساس پارامترهایی نظیر عدد فرود، عمق جریان، ارتفاع و طول فرم بستر بوده و لذا محاسبه ضرایب مقاومت نیازمند اطلاعات مشخصات هیدرولیکی و مورفولوژیکی پس از تشکیل فرم بستر می‌باشد. لذا پیش‌بینی تغییرات پارامترهای جریان و بستر متحرک و اثر متقابل آن روی زبری بستر، نیازمند بکارگیری روش‌های آزمون و خطا خواهد بود.

در این پژوهش، رابطه تجربی و خطی استخراج شده است که بر مبنای اطلاعات اولیه شامل دبی جریان، شیب مجرا، شکل مقطع مجرا و دانه‌بندی رسوبات، بدون نیاز به آزمون و خطا و به صورت صریح، قادر به محاسبه عمق جریان پس از تشکیل فرم بستر تلماسه و شکنج می‌باشد. برای استخراج معادله مورد نظر، از داده‌های آزمایشگاهی مربوط به مطالعات گای و همکاران [۱۵]، بارتون و لین [۱۶]، ونگ و وایت [۱۷] و ویلیامز [۱۸] استفاده شده است.

۲- مواد و روش‌ها

بررسی مطالعات مربوط به مقاومت جریان در رودخانه‌های آبرفتی نشان می‌دهد که مقاومت جریان، تابعی از پارامترهای هیدرولیکی، مشخصات رسوبات، مشخصات هندسه مجرا و ابعاد هندسی فرم بستر می‌باشد. بنابراین مقاومت جریان را می‌توان به صورت معادله (۱) نمایش داد:

$$Re s = f (Hyd, Sed, Chan, Geo) \quad (1)$$

در رابطه فوق، Res به عنوان عامل مقاومت جریان شامل ضرایب زبری مانند ضرایب مانینگ، شزی، دارسی وایسباخ یا نمایه‌های هیدرولیکی نشان‌دهنده مقاومت نظیر عمق جریان می‌باشد. Hyd نشان‌دهنده عوامل هیدرولیکی شامل دبی، سرعت یا عمق جریان، عدد فرود، عدد رینولدز و ... می‌باشد. Sed به عنوان مشخصات رسوبات بستر نظیر شاخصه‌های مربوط به دانه‌بندی، اندازه میانه ذرات و وزن مخصوص رسوبات مطرح گردیده است. $Chan$ برای نمایش مشخصات هندسه بستر شامل شیب مجرا، عمق هیدرولیکی، شعاع هیدرولیکی، عرض بستر، شرایط پیچ رودخانه و ... بکار رفته است. Geo هندسه فرم بستر شامل ارتفاع، طول و شیب فرم بستر می‌باشد.

در میان پارامترهای موجود در معادله (۱)، عوامل هیدرولیکی، هندسه مجرا، مشخصات رسوب، متغیرهای مستقل هستند و هندسه فرم بستر شامل ارتفاع و طول فرم بستر به عنوان متغیر وابسته و تابعی از عوامل مستقل هستند که روابط مربوطه در مطالعات متعددی از جمله تحقیقات یلین [۱۹]، آلن [۲۰]، فان راین [۴]، ژولین و کلاسن [۲۱]، کریم [۲۲] مورد بررسی قرار گرفته است. به عبارت دیگر خواهیم داشت:

$$Geo = f(Hyd, Sed, Chan) \quad (2)$$

از معادلات (۱) و (۲) می‌توان نتیجه گرفت که مقاومت جریان تابعی از سه عامل اصلی و مستقل هیدرولیکی، مشخصات رسوبات و هندسه مجرا است (معادله ۳):

$$Res = f(Hyd, Sed, Chan) \quad (3)$$

می‌توان شرایطی را تصور کرد که در آن پارامترهای مستقل هیدرولیکی، هندسه مجرا و مشخصات ذرات رسوبی بستر ثابت باشد اما به نحوی مواد بستری تثبیت و از حرکت آن‌ها خودداری گردد. در این صورت، جریان در بستر تخت و صاف، بدون تغییر پارامترهای مؤثر مستقل مذکور و صرفاً تحت تأثیر زبری ذرات تشکیل خواهد گردید. به این ترتیب تفاوت مشخصات جریان در دو حالت با بستر متحرک و بستر تخت به شرح فوق‌الذکر بیانگر اثر فرم بستر در مقاومت جریان، زبری بستر و عمق جریان خواهد بود. در این تحقیق، از اندیس صفر (0) برای نشان دادن مشخصات جریان در بستر تخت استفاده شده است. عمق جریان یکنواخت در بستر تخت (y_0) با استفاده از رابطه مانینگ به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (4)$$

در رابطه فوق Q دبی جریان، V سرعت متوسط جریان، R شعاع هیدرولیکی، S شیب مجرا و n ضریب مانینگ می‌باشد. شعاع هیدرولیکی و شیب نیز از مشخصات هندسی مجرا می‌باشند. ضریب مانینگ، مطابق رابطه استریکلر به شرح ذیل تابعی از اندازه میانه ذرات (D_{50}) یا به عبارت دیگر تابعی از مشخصات ذرات رسوبی می‌باشد:

$$n = \frac{D_{50}^{1/6}}{21.1} \quad (5)$$

در معادله (۵)، اندازه ذرات برحسب متر می‌باشد. مطابق موارد فوق‌الذکر می‌توان نتیجه گرفت در شرایط بستر تخت، عمق جریان به عنوان یکی از نمایه‌های میزان زبری بستر یا مقاومت جریان، تابعی از متغیرهای مستقل هندسه مجرا، مشخصات رسوبات بستر و مشخصات جریان می‌باشد. بنابراین می‌توان مقاومت جریان در بستر تخت (Res_0) را به صورت معادله (۶) تعریف کرد:

$$Res_0 = f(Hyd, Sed, Chan) \quad (6)$$

لذا می‌توان نتیجه گرفت که مقاومت جریان در بستر متحرک و در حضور فرم بستر متناسب با مقاومت جریان در بستر تخت می‌باشد. به عبارت دیگر :

$$Res \propto Res_0 \quad (7)$$

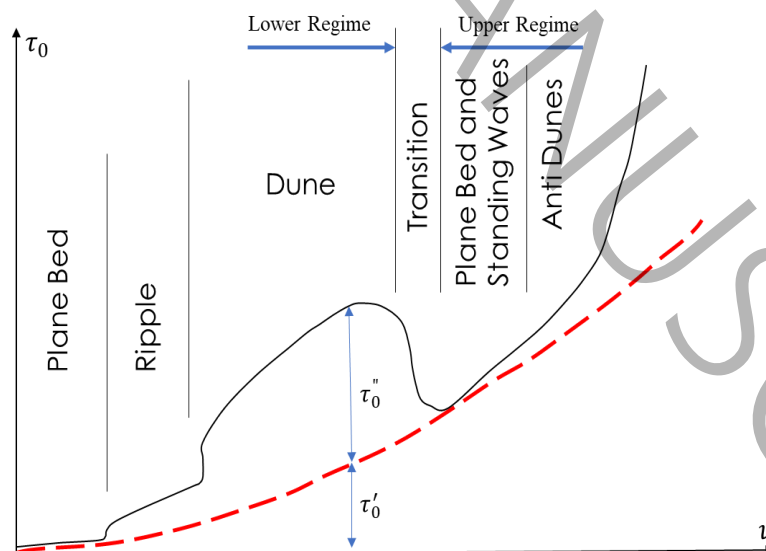
جریان در آبراهه‌های آبرفتی در یکی از حالت‌های رژیم جریان شامل رژیم پایین، انتقالی و بالا قرار دارد. متناسب با تغییر در رژیم، اشکال بستر و رفتار دینامیکی جریان نیز تغییر می‌یابد. کریم [۲۳] با تعریف عدد فرود حدی به صورت روابط (۸) و (۹)، مرز رژیم‌های جریان را مشخص نموده است. در روابط ارائه شده، F_t عدد فرود مربوط به حد فاصل رژیم جریان انتقالی و رژیم پایین و F_u عدد فرود مرزی بین رژیم جریان بالا و انتقالی می‌باشد.

$$F_t = 2.716 \left(\frac{y}{D_{50}} \right)^{-0.25} \quad (8)$$

$$F_u = 4.785 \left(\frac{y}{D_{50}} \right)^{-0.27} \quad (9)$$

مقاومت در رودخانه‌های آبرفتی در رژیم پایین جریان، به دلیل تشکیل فرم‌های بستر شکنج و تلماسه، جدایی خط جریان و تشکیل جریان برگشتی به حداکثر مقدار ممکن می‌رسد (شکل ۱). لذا در این تحقیق، مقاومت جریان مربوط به فرم‌های بستر رژیم پایین و ارتباط آن با مقاومت جریان در بستر تخت مورد بررسی قرار گرفته است.

در این تحقیق، برای تعیین ارتباط زبری بستر متحرک در حضور فرم بستر شکنج و تلماسه با زبری بستر تخت، عمق جریان به عنوان شاخص و نتیجه تغییرات مقاومت جریان برای مقایسه و تعیین رابطه ریاضی مورد استفاده قرار گرفته است. برای این منظور، از داده‌های آزمایشگاهی مربوط به مطالعات گای و همکاران [۱۵]، بارتون و لین [۱۶]، ونگ و وایت [۱۷] و ویلیامز [۱۸] استفاده شده است.



شکل ۱. تغییرات تنش برشی کل بستر در برابر سرعت جریان برای فرم بسترهای مختلف [24]

Figure 1. Changes of total bed shear stress bed against the flow velocity for different bed forms [24]

مجموع کل آزمایش‌های صورت گرفته در منابع مذکور، ۵۳۸ داده می‌باشد که در ۲۹۲ مورد، فرم بستر شکنج و تلماسه تشکیل گردیده و در این پژوهش نیز از آن‌ها استفاده شده است. از مجموع ۲۹۲ مورد آزمایش که در آن‌ها فرم بستر شکنج و تلماسه تشکیل شده است، ۲۴۱ مورد برای تعیین رابطه رگرسیونی مورد استفاده قرار گرفته و از ۵۱ مورد باقی‌مانده، برای صحت‌سنجی استفاده شده است.

روش کار به این صورت است که ضریب زبری مانینگ مطابق معادله (۵) و با استفاده از اندازه ذرات میانه رسوب محاسبه می‌شود. سپس براساس معادله (۴)، عمق جریان در بستر تخت، قابل محاسبه خواهد بود. در گام بعد، عمق متناظر با بستر تخت (y_0) با اعماق اندازه‌گیری شده در بستر متحرک (d) با یکدیگر مقایسه و رابطه رگرسیونی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی مذکور استخراج و سپس صحت‌سنجی خواهد گردید.

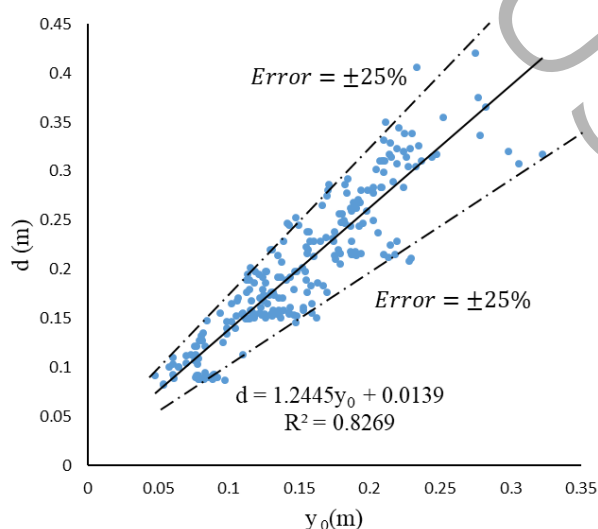
۳- نتایج و بحث

برای بررسی تأثیر فرم بستر بر مقاومت جریان از داده‌های آزمایشگاهی جدول ۱ استفاده گردیده و در شکل ۲ عمق جریان محاسبه شده در بستر تخت (y_0) با عمق جریان اندازه‌گیری شده (d) مقایسه شده است.

جدول ۱. اطلاعات آزمایشگاهی مورد استفاده در مقاله

Table 1. Experimental data used in this study

منبع	تعداد آزمایش	اندازه میانه ذرات (میلی متر)	شیب $\times 1000$	عرض فلوام (متر)	عمق (سانتی متر)	دبی (لیتر بر ثانیه)	تعداد آزمایشها با حضور ریبیل و دیون
گای [۱۵]	۲۲۸	۰/۹۳-۰/۱۹	۱۳/۶-۰/۰۷	۲/۴۳۸	۹-۴۰	۵۶/۶-۶۳۹	۱۵۸
بارتون و لین [۱۶]	۲۵	۰/۱۸	۲/۱-۰/۴۴	۱/۲۱۹	۹-۲۳/۷	۲۵/۵-۲۲۹	۱۹
ونگ و وایت [۱۷]	۱۰۸	۰/۷۶-۰/۰۷۶	۱۰/۷۳-۰/۰۱	۱/۲	۳۶/۵-۶/۲	۲۲۵-۴۰۹/۹	۴۰
ویلیامز [۱۸]	۱۷۷	۱/۳۵	۳۶/۷-۰/۰۶	۱/۱۹-۰/۰۷۵	۲۲/۵-۲/۴	۳۱۵/۸-۱۰/۲	۷۵



شکل ۲. اثر فرم بستر شکنج و تلماسه بر تغییرات عمق جریان

Figure 2. Effect of ripple and dune bed form on change of flow depth

مطابق شکل (۲)، عمق جریان در بستر تخت و متحرک دارای ارتباط رگرسیونی از نوع خطی هستند. رابطه (۱۰) اثر تشکیل فرم بستر تلماسه و شکنج در افزایش تراز جریان نسبت به بستر تخت را نشان می‌دهد. براساس این رابطه، تشکیل فرم بستر در رژیم جریان پایین منجر به افزایش حدود ۲۴ درصدی تراز جریان به اضافه ۱۴ میلیمتر می‌گردد.

$$d = 1.2445y_0 + 0.0139 \quad (10)$$

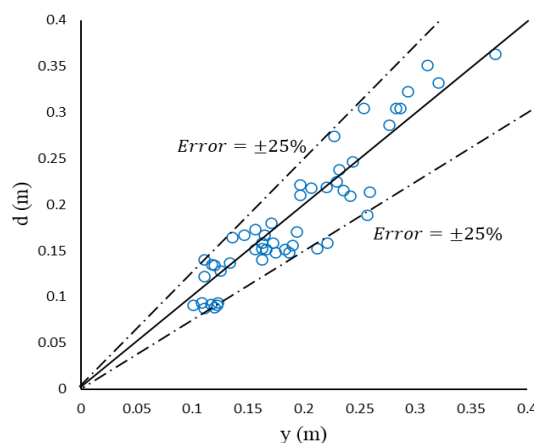
رابطه (۱۰)، مطابق شکل (۲) دارای دقت قابل قبول می‌باشد. از طرفی کاربرد آن نیز ساده است به نحوی که بدون آزمون و خطا و به صورت مستقیم قادر به محاسبه تراز جریان در بسترهای متحرک می‌باشد. رابطه (۱۰) نشان‌دهنده اثر فرم بستر تلماسه و شکنج در افزایش زبری بستر و عمق معادل آن می‌باشد که می‌توان با تقریب آن را به صورت رابطه (۱۱) بازنویسی نمود. دقت این رابطه در بخش بعدی بررسی خواهد گردید.

$$d \approx 1.25y_0 \quad (11)$$

براساس رابطه (۱۱)، تشکیل فرم بستر تلماسه و شکنج منجر به افزایش ۲۵ درصدی عمق جریان در بستر تخت می‌گردد. در ادامه به ارزیابی و صحت‌سنجی روابط (۱۰) و (۱۱) پرداخته خواهد شد. با توجه به دو ویژگی اساسی رابطه (۱۱) شامل سادگی و دقت پیش‌بینی، نسبت افزایش ۲۵٪ یک نسبت طلایی در برآورد عمق جریان در سطح مقطع مجاری مستطیلی با بستر متحرک محسوب می‌گردد. با توجه به اینکه این تحقیق در دانشگاه تبریز صورت پذیرفته است، ضریب ۱/۲۵ در رابطه (۱۱)، از این به بعد ضریب ویژه دانشگاه تبریز نامیده خواهد شد.

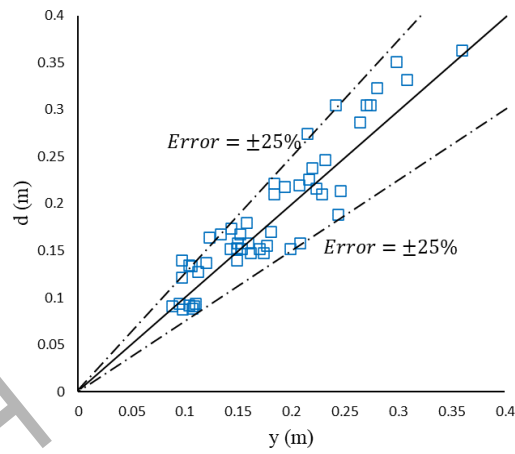
در این بخش به صحت‌سنجی و ارزیابی دقت رابطه خطی (۱۰) و ضریب ویژه دانشگاه تبریز در رابطه (۱۱) در پیش‌بینی عمق جریان در مجاری آبرفتی پرداخته شده است. به این منظور همانطور که قبلاً نیز اشاره گردیده است از مجموع ۲۹۲ داده آزمایشگاهی، ۵۱ مورد به صورت تصادفی انتخاب و عملکرد روابط مذکور در محاسبه عمق جریان به صورت شکل ۳ و ۴ مورد ارزیابی قرار گرفته است.

همچنین برای مقایسه دقت رابطه خطی و ضریب ویژه، عمق جریان در حضور فرم بستر تلماسه و شکنج با استفاده از روش‌های کریم [۲۳]، فان راین [۴] و سیمونز و ریچاردسون [۲۵] نیز محاسبه گردیده است. ارزیابی دقت روش‌های فوق‌الذکر در قالب شکل‌های ۵، ۶ و ۷ نمایش داده شده است. در کلیه شکل‌های اشاره شده y عمق محاسبه شده و d عمق مشاهده شده می‌باشد.



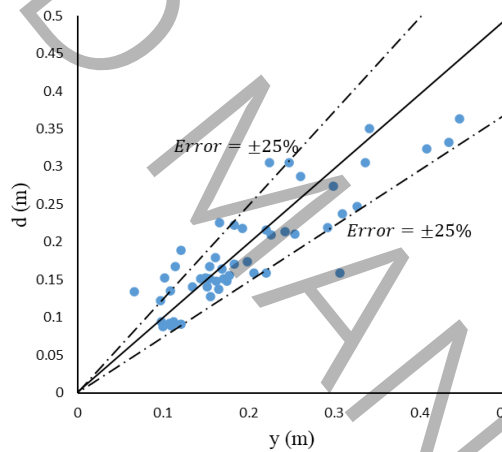
شکل ۳. ارزیابی دقت رابطه خطی جدید (رابطه (۱۰))

Figure 3. Accuracy evaluation of the new linear relationship (Eq. 10)



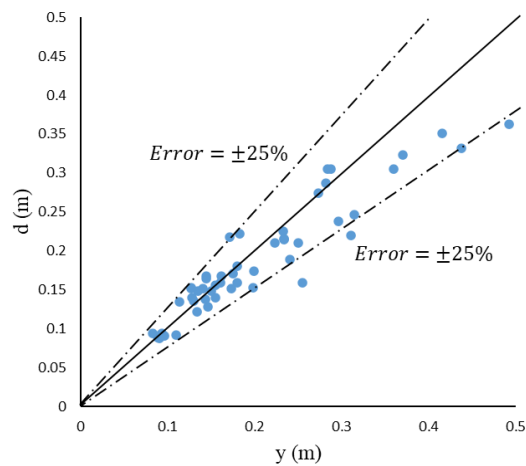
شکل ۴. ارزیابی دقت ضریب ویژه دانشگاه تبریز (رابطه (۱۱))

Figure 4. Accuracy evaluation of Tabriz University Specific Coefficient (Eq. 11)



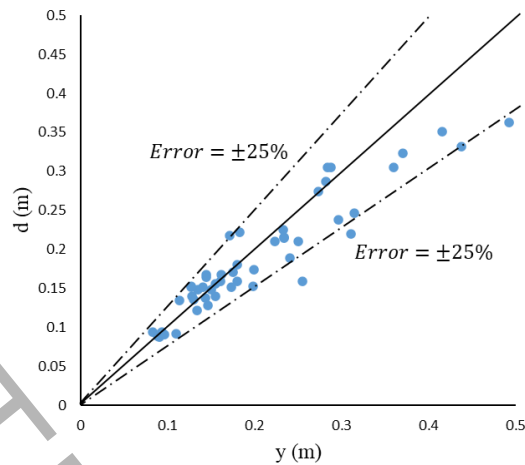
شکل ۵. ارزیابی دقت روش سیمونز و ریچاردسون [۲۵]

Figure 5. Accuracy evaluation of Simons and Richrdson Method [25]



شکل ۶. ارزیابی دقت روش فان راین [۴]

Figure 6. Accuracy evaluation of Van Rijn Method [4]



شکل ۷. ارزیابی دقت روش کریم [۲۳]

Figure 7. Accuracy evaluation of Karim Method [23]

برای بررسی دقیق‌تر عملکرد روابط جدید و مقایسه نتایج بدست آمده با روش‌های سیمونز و ریچاردسون [۲۵]، فان راین [۴] و کریم [۲۳] از شاخص‌های آماری ضریب همبستگی (R)، ضریب همبستگی خطی (DC) و میانگین مربع خطاها ($RMSE$) استفاده شده است که مطابق روابط (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) محاسبه می‌گردند.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (y_m - \bar{y}_m)(y_c - \bar{y}_c)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (y_m - \bar{y}_m)^2 (y_c - \bar{y}_c)^2}} \quad (12)$$

$$DC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_m - y_c)^2}{\sum_{i=1}^N (y_m - \bar{y}_m)^2} \quad (13)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_m - y_c)^2}{N}} \quad (14)$$

در روابط فوق، منظور از اندیس C ، مقادیر محاسبه شده و اندیس m اشاره به مقادیر اندازه‌گیری شده، دارد. نتیجه بررسی پارامترهای آماری و همچنین میزان دقت روابط جدید و روش‌های اشاره شده در محدوده‌های خطای ۱۰، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد به صورت خلاصه در جدول ۲ نشان داده شده است.

با ارزیابی عملکرد رابطه‌های (۱۰) و (۱۱) و مقایسه آن با نتایج سایر محققین در شکل ۳، ۴، ۵، ۶، ۷ نتایج زیر بدست می‌آید:
۱- در بین سه روش منتخب از سایر محققین، روش کریم [۲۳] و روش سیمونز و ریچاردسون [۲۵] به ترتیب بیش‌ترین و کمترین دقت را دارند.

۲- رابطه‌های جدید معرفی شده در این پژوهش دارای دقت مناسب می‌باشند به نحوی که خطای محاسباتی آن‌ها کمتر از روش سیمونز و ریچاردسون [۲۵] و دارای دقتی معادل دقت روش فان راین [۴] می‌باشد.

جدول ۲. صحت‌سنجی و ارزیابی دقت روابط (۹) و (۱۰) در تخمین عمق جریان و مقایسه آن با روش‌های سایر محققان

Table 2. Verification and evaluation of the accuracy of Eq. (10) and (11) in estimating the flow depth and comparing it with the methods of other researchers

روش	درصد داده های قرار گرفته در باندهای مختلف خطا (%)				پارامترهای آماری		
	±۱۰	±۲۰	±۲۵	±۳۰	R	DC	RMSE
سایمون و ریچاردسون [۲۵]	۲۹	۵۷	۷۱	۷۶	۰/۸۶۳	۰/۷۸۲	۰/۰۰۲۲
فان راین [۴]	۴۹	۸۲	۸۶	۹۳	۰/۹۳۸	۰/۸۴۴	۰/۰۰۱۶
کریم [۲۳]	۴۳	۸۶	۹۴	۹۸	۰/۹۱۷	۰/۹۱۸	۰/۰۰۰۸
رابطه خطی-رابطه (۱۰)	۴۵	۷۵	۸۲	۸۸	۰/۹۲۹	۰/۹۲۷	۰/۰۰۰۷
ضریب ویژه دانشگاه تبریز-رابطه (۱۱)	۳۹	۷۸	۹۰	۹۴	۰/۹۲۹	۰/۹۲۱	۰/۰۰۰۸

۳- علی‌رغم اینکه ضریب ویژه از رابطه (۱۰) اقتباس شده است، اما استفاده از رابطه (۱۱) صرفاً منجر به کاهش جزئی دقت در محدوده ۱۰ درصد گردیده و در سایر محدوده‌ها دقت محاسبات را افزایش داده است. به نحوی که در محدوده‌های بیشتر از ۲۰ درصد، دقت رابطه (۱۱) بیش‌تر از روش فان راین [۴] بوده و با خطای محاسباتی در روش کریم [۲۳] قابل مقایسه است.

۴- با توجه به بند فوق و با لحاظ مزیت سادگی استفاده از ضریب ویژه برای محاسبه عمق جریان در مجاری دارای فرم بستر تلماسه و شکنج، به نظر می‌رسد استفاده از ضریب ویژه دانشگاه تبریز ارجحیت بیش‌تری نسبت به رابطه خطی (۱۰) داشته باشد.

روابط (۱۰) و (۱۱) براساس داده‌های آزمایشگاهی در کانال‌های با هندسه مستطیلی استخراج شده‌اند و به این ترتیب مطابق رابطه مانینگ، تغییرات عمق جریان با تشکیل فرم بستر صرفاً متأثر از تغییر در زبری بستر خواهد بود. در حالی که در مجاری طبیعی، شکل مقطع جریان نامنظم بوده و تغییرات تراز جریان ناشی از تشکیل فرم بستر علاوه بر زبری، تابعی از شکل مقطع جریان نیز خواهد بود. بنابراین در مجاری روباز طبیعی بهتر است از نمایه‌های بی‌بعد مقاومت جریان نظیر ضرایب شزی، مانینگ و دارسی ویسباخ به عنوان شاخص‌های اختصاصی اثر تشکیل فرم بستر استفاده شود. به این منظور، ارائه راهکاری که بتوان براساس آن ضریب زبری بستر متحرک با فرم بستر تلماسه و شکنج را براساس ضریب مانینگ بستر تخت محاسبه نمود، ضروری به نظر می‌رسد. در این تحقیق، تغییرات ضریب مانینگ مورد مطالعه قرار گرفته است.

با فرض دقت مناسب روابط جدید ارائه شده در این تحقیق، براساس ضریب ویژه در رابطه (۱۱)، روش تحلیلی برای محاسبه ضریب مانینگ در مجاری آبرفتی طبیعی به شرح ذیل پیشنهاد و در بخش بعد برای آزمایش‌های صورت گرفته در کانال‌های با هندسه مستطیلی صحت‌سنجی خواهد گردید. لیکن ابعاد مختلف روش ارائه شده از جهت تکمیل، واسنجی و صحت‌سنجی برای آبراهه‌های طبیعی با سطح مقطع نامنظم در این پژوهش مورد بررسی مطالعه قرار نخواهد گرفت.

برای دستیابی به یک روش تحلیلی جامع برای محاسبه ضریب مانینگ مربوط به فرم بستر تلماسه و شکنج، ابتدا رابطه مانینگ برای فلولم مستطیلی بازنویسی می‌شود. با بازنویسی رابطه (۴) برای فلولم مستطیلی شکل با عرض مقطع B ، عمق جریان d ، شیب S و دبی جریان Q ، رابطه (۱۵) یا (۱۶) بدست می‌آید.

$$Q = \frac{1}{n} B d \left(\frac{B d}{B + 2d} \right)^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

$$n Q = B d \left(\frac{B d}{B + 2d} \right)^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

در روابط فوق، n ضریب زبری مانینگ در شرایط تشکیل فرم بستر تلماسه و شکنج می‌باشد. رابطه (۱۶) را همچنین می‌توان برای شرایط فرضی بستر تخت نیز مورد استفاده قرار داد.

$$n_0 Q = B y_0 \left(\frac{B y_0}{B + 2y_0} \right)^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

در رابطه فوق y_0 عمق جریان در شرایط بستر تخت فرضی و n_0 ضریب مانینگ بستر تخت می‌باشد که تمام عوامل مؤثر در تعیین ضریب زبری غیر از عامل فرم بستر در آن اعمال شده است و در شرایطی که فقط عامل زبری ذره مؤثر است، با استفاده از رابطه مانینگ-استریکلر (رابطه (۵)) محاسبه می‌شود. از تقسیم دو رابطه (۱۶) و (۱۷) بر هم خواهیم داشت:

$$\frac{n}{n_0} = \frac{d}{y_0} \times \left(\frac{d}{y_0} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{B + 2y_0}{B + 2d} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (18)$$

با استفاده از ضریب ویژه دانشگاه تبریز، معادله (۱۸) به صورت معادلات (۱۹) و (۲۰) قابل بازنویسی هستند:

$$\frac{n}{n_0} = 1.25 \times (1.25)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{B + 2y_0}{B + 2.5y_0} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (19)$$

$$\frac{n}{n_0} = 1.45 \left(\frac{B + 2y_0}{B + 2.5y_0} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (20)$$

رابطه (۲۰) براساس نتایج آزمایشگاهی در فلولم مستطیلی استخراج شده است و در بخش بعدی ارزیابی خواهد شد. سمت راست معادله (۲۰)، اثر تشکیل فرم بستر تلماسه و شکنج را در افزایش ضریب مانینگ نشان می‌دهد.

در فلولم مستطیلی با بستر تخت، دانه‌بندی و اندازه ذرات تنها عامل مؤثر روی ضریب مانینگ می‌باشد. اما در مجاری آبرفتی و طبیعی سایر عوامل شامل شکل سطح مقطع، پوشش گیاهی، زبری دیواره، مسیر جریان و ... نیز روی ضریب زبری مانینگ تأثیرگذار هستند. فرض مسئله این است که تمام عوامل مؤثر در مقاومت جریان در قالب ضریب زبری مانینگ برای بستر تخت لحاظ گردد در این صورت می‌توان از رابطه (۲۰) برای تعیین اثر زبری فرم بستر تلماسه و شکنج استفاده نمود. در اینصورت رابطه (۲۰) برای مجاری آبرفتی طبیعی با فرم بستر تلماسه و شکنج نیز قابل استفاده خواهد بود.

در استفاده از رابطه (۲۰) برای مجاری آبرفتی، فقط پارامتر عرض مقطع، متفاوت از فلولم مستطیلی است که پیشنهاد می‌شود به جای عرض مقطع (B)، از عرض سطح آب (T_0) در تراز عمق y_0 استفاده شود. به عبارت دیگر به جای رابطه (۲۰) رابطه زیر برای مجاری طبیعی قابل استفاده است:

$$\frac{n}{n_0} = 1.45 \left(\frac{T_0 + 2y_0}{T_0 + 2.5y_0} \right)^{2/3} \quad (21)$$

در مجاری طبیعی، عرض سطح آب متناسب با شکل نامنظم مقاطع، تابعی از عمق جریان است. در معادله (۲۱) عمق جریان در بستر تخت (y_0) و عرض سطح آب (T_0) متناسب با عمق و شکل مقطع مجرا مجهولات معادله هستند. لذا ابتدا عمق جریان در بستر تخت با استفاده از معادله مانینگ محاسبه گردیده و سپس عرض سطح جریان متناسب با آن براساس شکل مقطع جریان قابل محاسبه خواهد بود.

در بخش بعد به ارزیابی رابطه (۲۳) براساس داده‌های آزمایشگاهی در فلوم مستطیلی پرداخته خواهد شد. با این وجود، براساس حالت‌های حدی به شرح ذیل، حداقل و حداکثر مقدار $\frac{n}{n_0}$ قابل پیش‌بینی می‌باشد:

الف) عرض جریان در مقایسه با عمق جریان ناچیز باشد یا به عبارت دیگر جریان عمیق باشد در این صورت خواهیم داشت:

$$\lim_{T_0 \rightarrow 0} \frac{n}{n_0} = 1.45 \left(\frac{2y_0}{2.5y_0} \right)^{2/3} = 1.25 \quad (22)$$

ب) عمق جریان در مقایسه با عرض مجرا ناچیز باشد یا به عبارت دیگر مجرای عریض باشد در این صورت خواهیم داشت:

$$\lim_{y_0 \rightarrow 0} \frac{n}{n_0} = 1.45 \left(\frac{T_0}{T_0} \right)^{2/3} = 1.45 \quad (23)$$

بنابراین مطابق روابط (۲۲) و (۲۳)، فرم بستر شکنج و تلماسه باعث افزایش حداقل ۲۵ درصدی ضریب مانینگ در جریان عمیق و افزایش ۴۵ درصدی ضریب مانینگ در جریان عریض می‌گردد به عبارت دیگر رابطه (۲۴) صادق خواهد بود.

$$1.25 < \frac{n}{n_0} < 1.45 \quad (24)$$

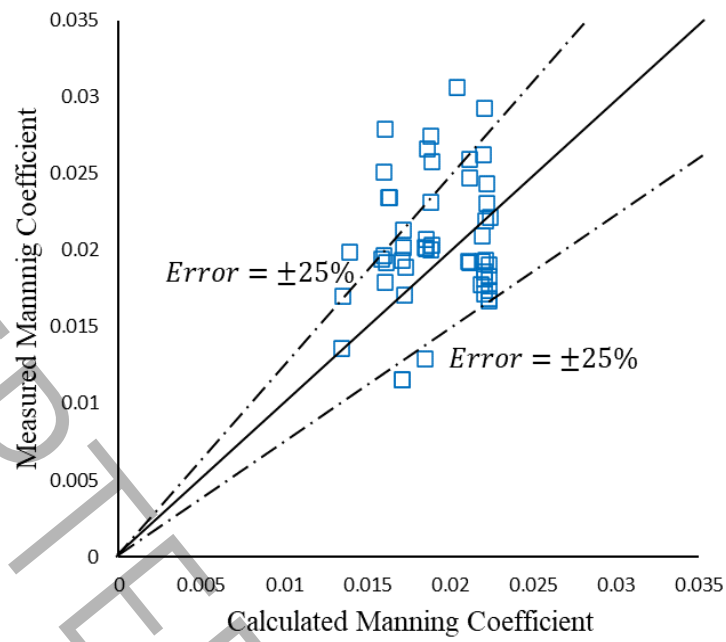
همانگونه که قبلاً شرح گردید ضریب زبری مانینگ به دو بخش زبری ذره (n_0) یا (n') و زبری فرم بستر (n'') قابل تفکیک است. لذا براساس رابطه (۲۴)، ضریب مانینگ مربوط به فرم بستر به صورت رابطه (۲۵) قابل پیش‌بینی می‌باشد.

$$0.25n_0 < n'' < 0.45n_0 \quad (25)$$

همانگونه که در بخش قبلی توضیح داده شد، عمق جریان در فلوم‌های مستطیلی و در شرایط آزمایشگاهی نمایه مناسبی از تغییر در مقاومت جریان می‌باشد. اما در آبراهه‌های طبیعی عمق جریان، تحت تأثیر شکل مقطع بوده و شاخص مناسبی برای سنجش مقاومت جریان نمی‌باشد. در این پژوهش روابط (۲۱) و (۲۴) برای محاسبه ضریب مانینگ پیشنهاد شده است که بررسی دقت روابط یاد شده در آبراهه‌های طبیعی خارج از موضوع این تحقیق می‌باشد.

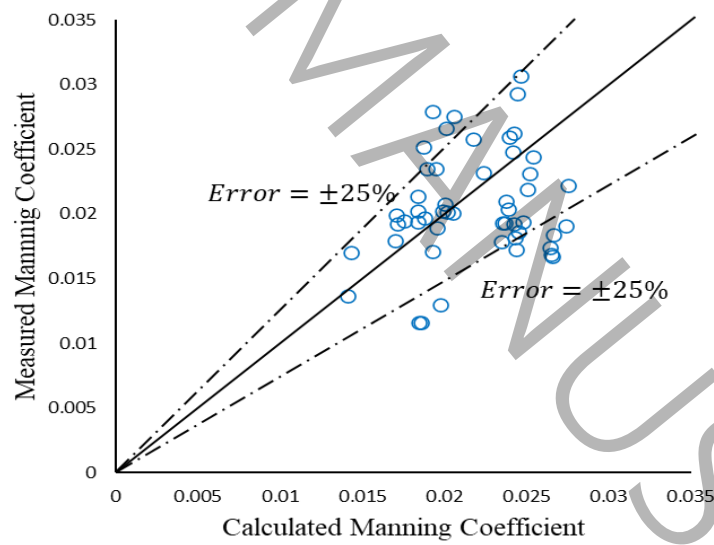
میزان دقت رابطه (۲۰) که از رابطه (۱۱) برای محاسبه ضریب مانینگ در فلوم‌های آزمایشگاهی با مقطع مستطیلی استخراج شده است، در شکل ۸ مورد ارزیابی قرار گرفته است. با مقایسه شکل ۴ و شکل ۸ ملاحظه می‌شود که میزان خطای رابطه (۲۰) در تخمین ضریب مانینگ بیش‌تر از خطای رابطه (۱۱) برای تخمین عمق جریان می‌باشد.

برای ارزیابی دقت سایر روش‌ها شامل رابطه خطی جدید، روش سیمونز ریچاردسون [۲۵]، روش فان راین [۴] و روش کریم [۲۳] صحت سنجی مقادیر تخمینی برای ضریب مانینگ در شکل ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است. توضیح اینکه مقادیر ضریب مانینگ در هر روش متناسب با عمق جریان محاسبه شده در روش مربوطه می‌باشد.



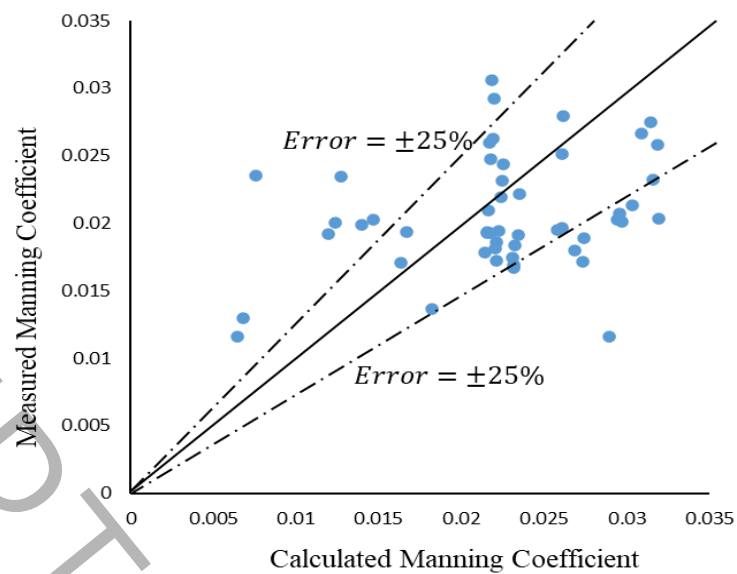
شکل ۸. صحت‌سنجی رابطه (۲۰) در تخمین ضریب مانینگ مربوط به فرم بستر

Figure 8. Verification of Eq. (20) to estimate bed form Manning coefficient



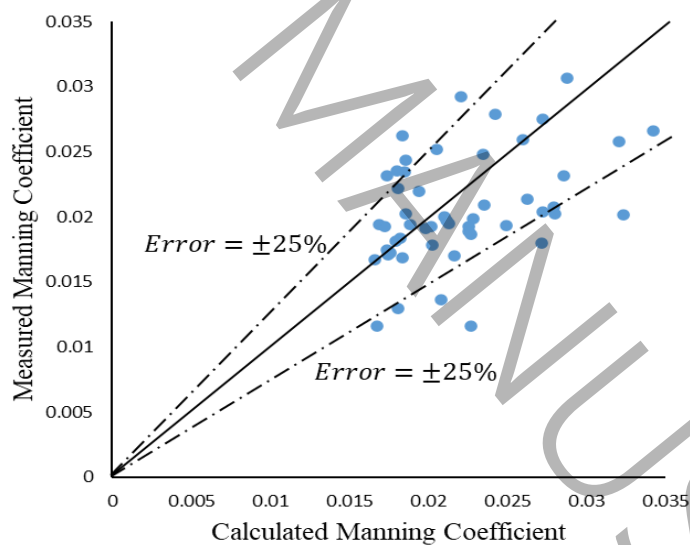
شکل ۹. صحت‌سنجی رابطه خطی (رابطه ۱۰) در تخمین ضریب مانینگ مربوط به فرم بستر

Figure 9. Verification of linear relation (Eq. 10) to estimate bed form Manning coefficient



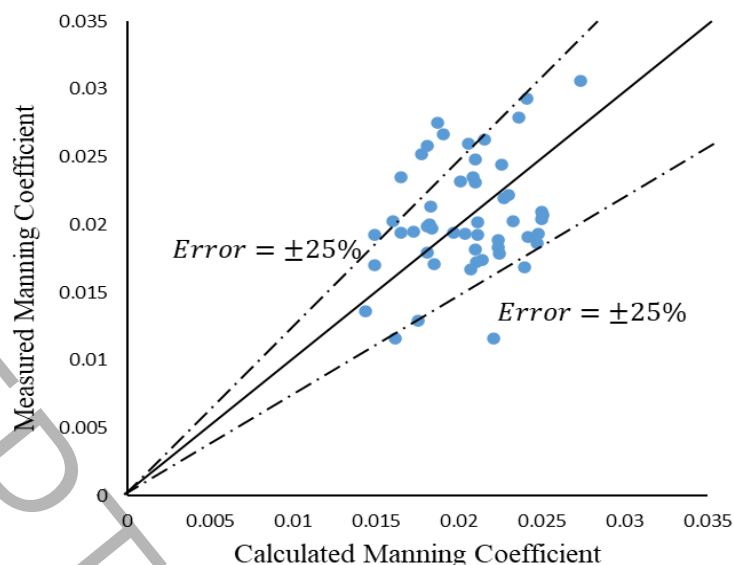
شکل ۱۰. صحت‌سنجی روش سیمونز و ریچاردسون [۲۵] در تخمین ضریب مانینگ مربوط به فرم بستر

Figure 10. Verification of Simons and Richardson [25] Method to estimate bed form Manning coefficient



شکل ۱۱. صحت‌سنجی روش فان راین [۴] در تخمین ضریب مانینگ مربوط به فرم بستر

Figure 11. Verification of Van Rijn [4] Method to estimate bed form Manning coefficient



شکل ۱۲. صحت‌سنجی روش کریم [۲۳] در تخمین ضریب مانینگ مربوط به فرم بستر

Figure 12. Verification of Karim [23] Method to estimate bed form Manning coefficient

همانطور که در شکل‌های ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌گردد در تمام روش‌ها، خطای محاسبه ضریب مانینگ از خطای مربوط به تخمین عمق جریان بیش‌تر شده است و این موضوع صرفاً مختص رابطه (۲۰) نمی‌باشد.

جدول ۳. صحت‌سنجی و ارزیابی دقت رابطه (۱۷) در تخمین ضریب مانینگ و مقایسه آن با سایر روش‌ها

Table 3. Verification and evaluation of the accuracy of Eq. (20) in estimating Manning coefficient and comparing it with the methods of other researchers

روش	درصد داده‌های قرار گرفته در باندهای مختلف خطا (%)				پارامترهای آماری		
	±۱۰	±۲۰	±۲۵	±۳۰	RMSE	DC	RMSE
سایمون و ریچاردسون [۲۵]	۱۶	۳۷	۴۷	۵۷	۰/۲۸۷	۰/۹۲۲	۰/۰۰۰۰۴
فان راین [۴]	۳۵	۵۷	۷۵	۸۰	۰/۴۱۵	۰/۹۵۹	۰/۰۰۰۰۲
کریم [۲۳]	۲۷	۵۷	۷۵	۸۸	۰/۲۸۳	۰/۹۶۷	۰/۰۰۰۰۲
رابطه خطی-رابطه (۱۰)	۳۳	۵۹	۶۷	۷۵	۰/۲۱۰	۰/۹۵۸	۰/۰۰۰۰۲
رابطه (۲۰)	۲۷	۵۹	۶۹	۷۵	۰/۱۵۳	۰/۹۶۰	۰/۰۰۰۰۲

در جدول ۳ خطای رابطه (۲۰) در محاسبه ضریب مانینگ با سایر روش‌ها منجمله رابطه خطی جدید (رابطه (۱۰)) مقایسه گردیده و ملاحظه می‌گردد که در تمام روش‌ها، کاهش دقت قابل ملاحظه‌ای نسبت به محاسبه عمق جریان (جدول (۳)) وجود دارد. علت این موضوع حساسیت ضریب مانینگ نسبت به تغییرات عمق جریان است. برای درک این موضوع، رابطه زیر در نظر گرفته می‌شود که در آن ضریب مانینگ (n) با فرض دبی و شیب ثابت تابعی از عمق جریان (y) می‌باشد.

$$n = \frac{1}{Q} \left(\frac{By}{B+2y} \right)^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (26)$$

اضافه می‌نماید اصولاً عمق جریان تابعی از ضریب زبری مانینگ است و فرض اینکه ضریب مانینگ تابعی از عمق جریان است صرفاً برای راحتی محاسبات است که در ادامه توضیح داده خواهد شد. برای فهم میزان تأثیرپذیری ضریب مانینگ از تغییرات عمق جریان و بالعکس، اگر از دو طرف رابطه (۲۶) مشتق گرفته شود، پس از عملیات جبری و ریاضی می‌توان نوشت:

$$\frac{\partial n}{n} = \frac{\partial y}{y} \left(\frac{12y^2 + 20y - 4By + 5B^2}{3(B+2y)^2} \right) \quad (27)$$

در مجاری عریض که عمق جریان (y) در مقایسه با عرض مجرا (B) ناچیز و قابل اغماض است خواهیم داشت:

$$\lim_{\frac{y}{B} \rightarrow 0} \frac{12y^2 + 20y - 4By + 5B^2}{3(B+2y)^2} = \frac{5}{3} \quad (28)$$

در مجاری عمیق که عرض مجرا در مقایسه با عمق جریان ناچیز است نیز خواهیم داشت:

$$\lim_{\frac{B}{y} \rightarrow 0} \frac{12y^2 + 20y - 4By + 5B^2}{3(B+2y)^2} = 1 + \frac{20}{12y} \quad (29)$$

در صورتی که عمق جریان به اندازه کافی بزرگ باشد، حد رابطه (۲۹) به سمت عدد یک میل خواهد نمود. از روابط (۲۸) و (۲۹) می‌توان نتیجه‌گیری نمود که با میزان معینی تغییر در عمق جریان محاسبه شده، ضریب مانینگ متناسب با آن خطای بزرگتری را نشان خواهد داد. مطابق رابطه (۳۰) این میزان در مقادیر حدی جریان عمیق به میزان نسبت تغییرات عمق و در جریان عریض به میزان $\frac{5}{3}$ نسبت تغییرات عمق جریان می‌باشد.

$$1 < \frac{\frac{\partial n}{n}}{\frac{\partial y}{y}} < \frac{5}{3} \quad (30)$$

به عبارت دیگر، عمق جریان دارای حساسیت کمتر به تغییرات ضریب مانینگ تخمینی داشته و خطای موجود در تخمین ضریب مانینگ در نتیجه نهایی برای محاسبه عمق جریان سرشکن شده و خطای کمتری در محاسبات عمق جریان ایجاد می‌نماید. بنابراین پیش‌بینی می‌شود رابطه (۱۸) در صورتی که برای مجاری طبیعی بکار گرفته شود به ویژه در مواردی که عرض مجرا نسبت به عمق زیاد باشد، نتایج دقیقی در عمق جریان تخمینی براساس ضریب زبری مانینگ محاسبه شده خواهد داشت.

۴- نتیجه‌گیری

۱- در این تحقیق رابطه‌ای خطی برای محاسبه عمق جریان در حضور فرم بستر تلماسه و شکنج برای کانال‌های آزمایشگاهی ارائه شده است. برتری این رابطه خطی نسبت به سایر روش‌های تخمین مقاومت جریان سادگی آن، عدم نیاز به آزمون خطا و استفاده از یک پارامتر (عمق جریان در بستر تخت) می‌باشد.

۲- رابطه خطی جدید ارائه شده برای محاسبه عمق جریان در بستر متحرک، به اطلاعات مربوط به ابعاد فرم بستر نیازی نداشته و در صورت تشخیص شرایط رژیم جریان پایین و تشکیل فرم بستر شکنج یا تلماسه قابل استفاده می‌باشد. از طرفی با توجه به اینکه حداکثر مقاومت جریان در شرایط تشکیل فرم بستر تلماسه و شکنج ایجاد می‌شود، برای لحاظ ضرایب اطمینان لازم

در پیش‌بینی حداکثر تراز جریان در رودخانه در شرایط عبور دبی طراحی، می‌توان از رابطه جدید پیشنهادی در این تحقیق بدون داشتن اطلاعات در زمینه رفتار مورفولوژی بستر استفاده نمود.

۳- صحت سنجی رابطه خطی نشان می‌دهد این رابطه در ۷۵ درصد موارد دارای خطای محاسباتی کمتر از ۲۰ درصد است که نشان دهنده دقت قابل قبول آن می‌باشد.

۴- براساس رابطه خطی مذکور، نسبت عمق جریان در حضور فرم بستر به عمق جریان در بستر تخت معادل $1/25$ می‌باشد. عدد $1/25$ ضریب ویژه دانشگاه تبریز نامیده شده است. صحت‌سنجی ضریب یاد شده در برآورد عمق جریان در حضور فرم بستر شکنج و تلماسه دقت قابل قبولی را نشان می‌دهد به نحوی که در ۷۸ درصد موارد خطای ضریب ویژه مذکور کمتر از ۲۰ درصد می‌باشد.

۵- با توجه به اینکه تغییرات عمق جریان علاوه بر شرایط جریان و زبری بستر به شکل مقطع نیز وابسته است، لذا تغییرات عمق جریان نمایه مناسبی برای تعیین سنجش میزان زبری بستر به ویژه در مجاری طبیعی نیست. بدین معنی که ضرایب مقاومت جریان منجمله ضریب سزی، مانینگ یا دارسی و سیسباخ باید مودر توجه قرار گیرد. بر همین اساس با استفاده از ضریب ویژه پیشنهادی برای محاسبه عمق جریان در بسترهای متحرک با فرم بستر تلماسه و شکنج، رابطه‌ای برای محاسبه ضریب زبری مانینگ براساس ضریب زبری بستر فاقد فرم بستر پیشنهاد گردیده و رابطه ارائه شده صحت سنجی گردید.

۶- ارزیابی دقت رابطه ارائه شده برای ضریب مانینگ نشان می‌دهد خطای محاسباتی این ضریب نسبت به خطای محاسبه عمق جریان افزایش داشته است. به نحوی که در ۵۹ درصد موارد خطای برآورد ضریب مانینگ معادل ۲۰ درصد می‌باشد.

۷- ضریب مانینگ با استفاده از عمق جریان برآوردی از طریق سایر روش‌ها شامل رابطه خطی ارائه شده در این تحقیق، روش سیمونز و ریچاردسون [۲۵]، روش فان راین [۴] و روش کریم [۲۳] نیز محاسبه و دقت تخمین ضریب مانینگ مورد ارزیابی قرار گرفت. براساس ارزیابی صورت گرفته در تمام روش‌ها میزان خطا در پیش‌بینی ضریب مانینگ دارای افزایش مشهود می‌باشد. به نحوی که در روش کریم [۲۳] که دارای دقت بسیار خوبی در برآورد عمق جریان می‌باشد، در ۵۷ درصد موارد خطای تخمین کمتر از ۲۰ درصد می‌باشد.

۸- با توجه به افزایش خطا در محاسبه ضریب مانینگ نسبت به عمق جریان در تمام روش‌ها مانند روش جدید ارائه شده در این تحقیق، موضوع به صورت ریاضی با آنالیز حساسیت ضریب مانینگ در مقابل تغییرات عمق جریان مورد بررسی قرار گرفت و مشخص گردید تغییرات نسبی ضریب مانینگ در هر صورت بیش‌تر از تغییرات نسبی عمق جریان می‌باشد. به عبارت دیگر خطای محاسبات مربوط به ضریب مانینگ در صورت تبدیل به عمق جریان سرشکن گردیده و پیش‌بینی می‌شود که دقت مناسبی در پیش‌بینی تراز جریان فراهم شود.

۹- با توجه به اینکه رابطه جدید برای محاسبه ضریب مانینگ براساس داده‌های آزمایشگاهی و فلوم‌های مقطع مستطیلی بدست آمده است، لذا در این تحقیق روشی مبتنی بر روش جدید برای بکارگیری در شرایط مجاری طبیعی پیشنهاد گردیده است. ارزیابی دقت روش اشاره شده خارج از موضوع این پژوهش بوده و پیشنهاد می‌گردد در تحقیق دیگری با استفاده از داده‌های میدانی و صحرایی از مجاری آبرفتی طبیعی دقت روش ارائه شده مورد ارزیابی قرار گیرد.

- [1] H.A. Einstein, Barbarossa, N.L., River channel roughness, Transactions of the American Society Civil Engineering, 117(1952) 1121–1132.
- [2] F. Engelund, Hydraulic resistance of alluvial streams, Journal of Hydraulic Engineering, 92(1966) 315-326.
- [3] S.M. Saghebian, Roushangar, K., Kirca, V.S.O., Ghasempour, R., Modeling total resistance and form resistance of movable bed channels via experimental data and a kernel-based approach, Journal of Hydroinformatics, 22(2020) 528-540.
- [4] L.C. Van-Rijin, Sediment transport, Part III: Bed forms and alluvial roughness, Journal of Hydraulic Engineering, 110 (1984) 1733–1753
- [5] W. White, Paris, E., Bettis, R., A new general method for predicting the frictional characteristics of alluvial streams, England, Walingford, Report No. 17, 1979.
- [6] S.Q. Yang, Tan, S.K., Lim, S.Y., Flow resistance and bed form geometry in a wide alluvial channel, Water Resources Research, 41(2005) 477–487.
- [7] B.R. Andharia, Patel, P.L., Manekar, V.L., and Porey, P.D., Prediction of friction factor and stage discharge relationship in alluvial streams, Journal of Hydraulic Engineering, 19(2013) 49-54.
- [8] B. Kumar, Flow resistance in alluvial channel, Water Resource, 38(2011) 745–754.
- [9] C.H. Li, Liu, J.M., Resistance of Alluvial Rivers, China, Report of Nanjing Hydraulic Research Institution. 1963 (In Chinese).
- [10] X. Liu, Xia, J., Zhou, M., Deng, Sh., Li, Zh., A new formula for predicting movable bed roughness coefficient in the Middle Yangtze River, Progress in Physical Geography, 46(2022) 441-457.
- [11] W.M. Wu, Wang. S.S.Y., Movable bed roughness in alluvial rivers, Journal of Hydraulic Engineering, 125(1999) 1309–1312.
- [12] G.L. Yu, Lim, S.Y., Modified Manning formula for flow in alluvial channels with sand beds, Journal of Hydraulic Research, 41(2003) 597–608.
- [13] C. Colosimo, Copertino, V.A., Veltri, M., Friction factor evaluation in gravel bed rivers, Journal of Hydraulic Engineering, 114(1988) 861-876.
- [14] B. Kumar, Rao, A.R., Metamodeling approach to predict friction factor of alluvial channel, Computers and Electronics in Agriculture, 70(2010) 144–150.
- [15] H.P. Guy, Simons, D.B., Richardson, E.V., Summary of alluvial channel data from flume experiments, US Government Printing Office, Geological Survey Professional Paper No. 462-I, 1966.
- [16] J.R. Barton, Lin., P.N., A study of the sediment transport in alluvial channel, Fort Collins, Colorado University, Rep. CEF 55JRB2, 1955.
- [17] S.Q. Wang, White, W.R., Alluvial resistance in transition regime, Journal of Hydraulic Engineering, 119(1993) 725–741.
- [18] P.G. Williams, Flume width and water depth effects in sediment transport experiments, US Government Printing Office, Geological Survey Professional Paper No. 562-H, 1970.
- [19] M.S. Yalin, Geometrical properties of sand waves, Journal of the Hydraulic, 90(1964).
- [20] J.R.L. Allen, Current ripples: Their relation to patterns of water and sediment motion, Geological Magazine, 106(1968) 614.
- [21] P.Y. Julien, Klassen, G.J., Sand dune geometry of large rivers during floods, Journal of Hydraulic Engineering, 121(1995) 657-663.
- [22] F. Karim, Bedform geometry in sand bed flows, Journal of Hydraulic Engineering, 125(1999) 1253-1261.
- [23] F. Karim, 1995. Bed configuration and hydraulic resistance in alluvial channel flows, Journal of Hydraulic Engineering, 121(1995) 15 – 25.

- [24] F. Engelund, Fredsoe, J., Sediment ripples and dunes, Annual Review of Fluid Mechanics, 14(1982) 13-37.
- [25] D.B. Simons, Richardson., E.V., 1966. Resistance to flow in alluvial channels, US Government Printing Office, Geological Survey Professional Paper No. 422-J, 1966.