

Investigation of Three-parameter Flow Resistance Model in Coarse-Bed Rivers (Case Study: Deryuk River)

MASOUD NADERI^{1*}, HOSEIN AFZALI MEHR¹, SINA SOHRABI¹

1. Department of Water and Environment, Faculty of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

(Received: Feb. 14, 2021- Revised: Apr. 5, 2021- Accepted: Apr. 26, 2021)

ABSTRACT

The most common approach adopted for flow resistance in open-channel hydraulic is the Manning equation. Since the Manning roughness coefficient considers the water depth and flow velocity as constant and the flow conditions in rivers are non-uniform, it is necessary to adjust this equation by considering the geometric and hydraulic characteristics of the rivers. Accordingly, this paper presents a three-parameter flow resistance model, which is a more general form of the Manning equation. The parameters of this model were calibrated by using measurements of 8 sections of a coarse bed-river, Deryuk in Mazandaran province, which has vegetation on its banks. Shear speed was calculated using three methods of boundary-layer characteristics; parabolic law, two-point and the implicit approach, Darcy-Weisbach. The results showed that the Darcy-Weisbach implicit method has high accuracy in estimating flow resistance. Also, the validity of the results was confirmed by comparing the flow discharge calculated by the model with the measured flow discharge. The results showed that the three-parameter model in 75% of the sections had a better estimate than the Manning equation. Also, the average error percentage of the proposed model was 24%, while this value was calculated 32% for the Manning equation.

Keywords: Darcy-Weisbach Equation, Boundary Layer Characteristics, Flow Resistance Model, Manning Equation.

*Corresponding Author's Email: masoudms7373@gmail.com

بررسی مدل مقاومت جریان سه پارامتری در رودخانه‌های درشت‌دانه (مطالعه موردی: رودخانه دریوک)

مسعود نادری^{۱*}، حسین افضل‌ی مهر^۱، سینا سهرابی^۱

۱- گروه آب و محیط‌زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۲۶ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۱/۱۶ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۲/۶)

چکیده

رایج‌ترین رویکرد اتخاذ شده برای مقاومت جریان در هیدرولیک کانال‌های باز معادله مانینگ می‌باشد. از آنجاکه ضریب زبری مانینگ عمق آب و سرعت جریان را ثابت در نظر می‌گیرد و شرایط جریان در رودخانه‌ها غیریکنواخت است؛ ضروری است این معادله با در نظر گرفتن مشخصات هندسی و هیدرولیکی رودخانه‌ها تعدیل گردد. بر این اساس در این مقاله یک مدل مقاومت جریان سه پارامتری که شکل کلی‌تری از معادله مانینگ است، ارائه می‌شود. پارامترهای این مدل با استفاده از اندازه‌گیری‌های ۸ مقطع از رودخانه درشت‌دانه دریوک در استان مازندران که دارای پوشش گیاهی در سواحل خود می‌باشد، واسنجی شدند. با کاربرد سه روش مشخصات لایه‌مرزی، قانون سه‌می و دونقطه‌ای و روش ضمنی دارسی-ویسیاخ، سرعت برشی محاسبه گردید. نتایج نشان داد که روش ضمنی دارسی-ویسیاخ از دقت بالایی در برآورد مقاومت جریان برخوردار است. همچنین صحت نتایج از طریق مقایسه دبی محاسبه شده به وسیله مدل با مقدار دبی اندازه‌گیری شده تأیید شد. نتایج نشان داد که مدل سه پارامتری در ۷۵ درصد مقاطع برآورد بهتری نسبت به معادله مانینگ دارد. همچنین میانگین درصد خطای مدل ارائه شده ۲۴ درصد بود در حالی که این مقدار برای معادله مانینگ ۳۲ درصد محاسبه شد.

واژه‌های کلیدی: رودخانه دریوک، رابطه دارسی-ویسیاخ، مشخصات لایه‌مرزی، مدل مقاومت جریان.

مقدمه

تنش برشی بستر یک عامل بسیار مهم در برآورد پارامترهای هیدرولیکی، طراحی سازه‌های هیدرولیکی و مطالعات مهندسی رودخانه است. در رودخانه‌ها تنش برشی بستر در تعیین فرسایش موضعی بستر، ضریب زبری، تعیین پارامترهای رسوب بار بستر^۱ و بار معلق^۲ اهمیت دارد. این پارامتر یکی از عوامل اصلی و دشوار اندازه‌گیری است؛ که برآورد آن توأم با خطا در مطالعات مهندسی رسوب می‌باشد. برخی روش‌های تعیین مقاومت جریان از تئوری مکانیک سیالات به دست آمده‌اند (López et al., 2005; lane et al., 2005; López et al., 2009; Özgen et al., 2015). هر چند هنوز یک مدل مناسب برای رودخانه‌های ایران بر اساس مبانی تئوریک لایه‌مرزی و توزیع سرعت جریان در دسترس نیست؛ به طوری که اکثر مدل‌ها کاملاً تجربی بوده و اثر ساختار جریان در آن‌ها دیده نشده است. مهم‌ترین پارامترهای هیدرولیکی مؤثر در محاسبه مقاومت جریان؛ سرعت جریان، سرعت برشی، ضریب اصطکاک و تنش برشی جریان می‌باشند (López and Garcia, 1996; Stone and Hotchkiss, 2007). تخمین دقیق تنش برشی بستر به‌ویژه در رودخانه‌های کوهستانی کار دشواری است. در مطالعات

آزمایشگاهی از لوله‌های پندتل-پیتوت (Ahmed and Rajaratnam, 1998; shamloo et al., 2001) یا صفحات برشی (Rankin and Hires, 2000) برای اندازه‌گیری تنش برشی بستر استفاده می‌شود؛ در حالی که در مطالعات میدانی اندازه‌گیری‌های مستقیم به ندرت انجام می‌شود و روش‌های غیرمستقیم مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

رایج‌ترین روش برای برآورد تنش برشی بستر متوسط بازه کاربرد رابطه (۱) می‌باشد (Babaeyan-Koopaei et al., 2002):

$$\frac{\tau_0}{\rho} = gRS_f \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن τ_0 تنش برشی بستر، ρ جرم مخصوص آب، g شتاب گرانش، R شعاع هیدرولیکی و S_f شیب انرژی است. باین حال این روش برای برآوردهای موضعی مناسب نیست. با فرض اینکه شعاع هیدرولیکی برابر با عمق جریان آب است و با جایگزین کردن شیب انرژی S_f از معادله مانینگ، رابطه (۱) به رابطه (۲) تبدیل می‌شود:

$$\frac{\tau_0}{\rho} = \frac{gn^2v^2}{h^{\frac{1}{3}}} \quad (\text{رابطه ۲})$$

در این رابطه، n ضریب مانینگ، v سرعت جریان و h عمق

اساس داده‌های اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی و رودخانه‌ای واسنجی نشده است. علاوه بر این برای واسنجی این پارامترها اثر پوشش گیاهی در نظر گرفته نشده است؛ که ضروری است مورد توجه قرار گیرد.

حضور پوشش گیاهی در بستر رودخانه‌ها، پارامترهای اصلی مقاومت جریان مانند سرعت و تنش برشی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و موجب تغییر ساختار جریان، افزایش مقاومت کلی جریان و افزایش پایداری دیواره‌های رودخانه می‌شود؛ علاوه بر این پوشش گیاهی موجب مقاومت جریان موضعی با کاهش سرعت می‌شود که هم‌زمان با آن تنش برشی برای انتقال و فرسایش کاهش می‌یابد (Thorne, 1990; Carollo *et al.*, 2002). تحقیقات فراوانی پیرامون اثر متقابل پوشش گیاهی و جریان از طریق پوشش گیاهی مصنوعی و در فلولم آزمایشگاهی انجام شده است (به طور مثال Shahmohammadi *et al.*, 2018; D'Ippolito *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2019; Afzalimehr *et al.*, 2019; Setayesh and Afzalimehr, 2021; Yamasaki *et al.*, 2021 اما مطالعات اندکی بر روی توده‌های گیاهی طبیعی در رودخانه‌ها صورت گرفته است (به عنوان مثال: Sukhodolov and Sukhodolova, 2012).

سرعت برشی و تنش برشی بستر موضعی را می‌توان از رابطه مبتنی بر مشخصات لایه‌مرزی به صورت زیر محاسبه کرد (Afzalimehr and Anctil, 2000a):

$$u_* = \frac{(\delta_* - \theta)v_{max}}{C\delta_*} \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$\tau_0 = \rho u_*^2 \quad (\text{رابطه ۷})$$

که در آن δ_* و θ به ترتیب ضخامت جابه‌جایی لایه‌مرزی و ضخامت اندازه حرکت هستند و از طریق روابط ۸ و ۹ محاسبه می‌شوند، v_{max} سرعت بیشینه در یک پروفیل سرعت و C مقدار ثابتی است که مقدار آن در رودخانه‌های شنی ایران مانند گاماسیاب، زاینده‌رود، بابل رود و کاج و رودخانه‌های شنی کانادا برابر ۴/۴ به دست آورده شده است.

$$\delta_* = \int_0^h \left(1 - \frac{v}{v_{max}}\right) dy \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$\theta = \int_0^h \frac{v}{v_{max}} \left(1 - \frac{v}{v_{max}}\right) dy \quad (\text{رابطه ۹})$$

این روش مستلزم اندازه‌گیری نیمرخ سرعت جریان به طور گسترده در بازه‌های رودخانه می‌باشد.

توزیع سرعت در ناحیه داخلی و خارجی پروفیل سرعت متفاوت است، به گونه‌ای که در کانال باز توزیع سرعت در ناحیه خارجی از قانون سهمی پیروی می‌کند (Hinze, 1975). بر این اساس Afzalimehr and Anctil (1999) برای محاسبه سرعت برشی رابطه زیر را ارائه کرده‌اند:

$$u_* = \frac{\Omega v_{max}}{\lambda} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

جریان می‌باشد. رابطه (۲) نشان‌دهنده رایج‌ترین رویکرد اتخاذ شده در اکثر بسته‌های نرم‌افزار هیدرودینامیکی است. معادله مانینگ یک روش قابل اعتماد در رودخانه‌ها نیست؛ زیرا ضریب مانینگ بر اساس ثابت در نظر گرفتن عمق آب و سرعت جریان شکل گرفته است که با توجه به غیریکنواختی جریان و موانع موجود در رودخانه‌ها متفاوت از شرایط واقعی است (Ferguson, 2010). به طور کلی جریان در رودخانه‌ها شبه یکنواخت در نظر گرفته می‌شود زیرا حضور شن روی بستر سبب عدم تخت شدن بستر می‌گردد. برای حل این مشکل یک بستر مجازی تعریف می‌شود که در آن $y=0$ و $v=0$ می‌باشد. همچنین یکی از فرضیات داده‌های این مطالعه نبود شکل بستر در بازه مورد مطالعه می‌باشد. همچنین (Afzalimehr *et al.*, 1999) نشان دادند که کاربرد ضریب مانینگ با فرض جریان یکنواخت در رودخانه توأم با خطای ۵۰۰ درصد می‌باشد.

(Bellos *et al.*, 2018) یک مدل مقاومت جریان سه پارامتری جدید برای کانال‌های باز پیشنهاد دادند که در آن تنش برشی متناسب با سرعت جریان و معکوس با عمق آب به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\tau_0}{\rho} = \frac{v^A}{Bh^C} \quad (\text{رابطه ۳})$$

در رابطه بالا A ، B و C سه پارامتر مدل مقاومت جریان هستند. برای $A=2$ ، $B=1/gn^2$ و $C=1/3$ این مدل با مدل مقاومت جریان سنتی (رابطه ۲) که بر اساس معادله مانینگ است یکسان می‌شود؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مدل مقاومت جریان سنتی یک حالت خاص از مدل مقاومت پیشنهادی است که سه پارامتر را به جای یک پارامتر شامل می‌شود. این مدل برای تمام ویژگی‌های جریان و زبری معتبر است و پیشنهاد شده است که به طور گسترده جایگزین معادله مانینگ در مدل‌های شبیه‌سازی سیل شود. با ترکیب رابطه (۱) و (۳) دبی جریان را می‌توان به صورت رابطه زیر محاسبه کرد:

$$Q = A_w (gBR^{C+1}S_f)^{\frac{1}{A}} \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در آن Q دبی جریان و A_w مساحت مقطع عرضی است. در رابطه (۴) برای محاسبه شیب انرژی (S_f) می‌توان از رابطه سنت-ونانت به صورت زیر استفاده کرد:

$$S_f = S_0 - \frac{dh}{dx} (1 - Fr^2) \quad (\text{رابطه ۵})$$

در این رابطه S_0 و Fr به ترتیب شیب بستر و عدد فرود جریان هستند.

سه پارامتر مدل مقاومت جریان ذکر شده (A, B, C) بر اساس داده‌های تصادفی از یک توزیع احتمال یکنواخت عمق آب و سرعت جریان و ارتفاع زبری واسنجی شده است؛ با این حال بر

حالت عدم حضور این موارد برابر با 0.4 می‌باشد. در این پژوهش نیز از مقدار 0.4 استفاده شده است. $u_{0.8}$ و $u_{0.2}$ به ترتیب سرعت اندازه‌گیری شده در فواصل 0.2 و 0.8 عمق جریان از سطح آب و $Z_{0.2}$ و $Z_{0.8}$ نیز برابر با عمق آب در فاصله $0.2h$ و $0.8h$ از سطح آب می‌باشد. (Bagheri et al. (2013) دقت این روش در رودخانه‌های قله‌سنگی را $85/6$ درصد گزارش کرده‌اند.

مواد و روش‌ها

عوامل متعددی در انتخاب یک بازه مناسب در رودخانه مدنظر می‌باشند که مهم‌ترین آن‌ها امنیت پژوهشگر و اهداف پژوهش هستند. بر این اساس عمق متوسط بازه انتخابی بهتر است کمتر از 50 سانتی‌متر باشد و همچنین سرعت جریان باید در حدی باشد که داده‌برداری با خطا و نوسانات کم صورت گیرد.

با توجه به نکات بالا و پس از کیلومترها پیمایش در رودخانه‌های استان مازندران، در نهایت یک بازه 28 متری از رودخانه دربوک انتخاب شد. رودخانه دربوک در نزدیکی روستای نمارستاق و در دشت دربوک واقع است. نمارستاق در بخش لاریجان شهرستان آمل در استان مازندران قرار دارد. بازه مورد مطالعه در مختصات جغرافیایی با عرض جغرافیایی 36 درجه و 4 دقیقه و 47 ثانیه شمالی و طول جغرافیایی 52 دقیقه و 3 درجه و 26 ثانیه شرقی با ارتفاع 2363 متر از سطح دریا قرار دارد. شکل (۱) موقعیت جغرافیایی بازه انتخابی را نشان می‌دهد. این بازه دارای پوشش گیاهی از نوع نیمه مستغرق در دیواره‌های کناری و سواحل می‌باشد. برای این بازه در مجموع 8 مقطع عرضی مورد برداشت قرار گرفت. در هر مقطع در 3 محور رودخانه دانه‌بندی بستر، سرعت جریان در عمق و نقشه‌برداری توپوگرافی بستر برداشت شد.

در این پژوهش از روش ولمن برای تعیین قطر میانه ذرات رسوب استفاده شد (Wolman, 1954). بر این اساس سه مقطع 0.5 در 0.5 مترمربع در ابتدا، میانه و انتهای بازه انتخاب شدند. در هر یک از این مقاطع 100 دانه به صورت تصادفی توسط کولیس اندازه‌گیری و میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده برای هر ذره محاسبه گردید. با توجه به مقادیر به دست آمده و مرتب‌سازی آن‌ها، منحنی دانه‌بندی ذرات بستر به صورت شکل (۲) رسم شد. بر اساس شکل (۲)، قطر میانه ذرات بستر (d_{50}) برابر 33 میلی‌متر بوده و رودخانه مورد مطالعه از نوع شنی و قله‌سنگی می‌باشد. همچنین پارامتر انحراف معیار هندسی ذرات ($\sigma_g = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}}$) برابر $1/44$ به دست آمد و چون این مقدار از $1/5$ کوچک‌تر است، پس دانه‌بندی بازه مورد مطالعه یکنواخت می‌باشد.

که در آن Ω شیب خط رگرسیونی بین مقادیر $\frac{v}{v_{max}}$ و $(1 - \frac{z+0.2d_{50}}{h+0.2d_{50}})^2$ در هر نیمرخ سرعت می‌باشد، v سرعت در عمق Z از سطح مینا، d_{50} قطر میانه ذرات بستر و λ ثابتی است که به نقطه جدایی لایه داخلی و خارجی جریان (x) در نیمرخ سرعت بستگی دارد و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\lambda = \frac{2.5}{2x(1-x)} \quad \text{(رابطه ۱۱)}$$

روش دیگر برای برآورد تنش برشی بستر، به طریق ضمنی توسط روش داریسی-ویسباخ است که به صورت رابطه (۱۲) تعریف می‌شود:

$$\tau_0 = \frac{f}{8} \rho v_m^2 \quad \text{(رابطه ۱۲)}$$

که در آن v_m سرعت میانگین در نیمرخ سرعت و f ضریب اصطکاک داریسی-ویسباخ می‌باشند. بر این اساس Bellos et al. (2018) یک رابطه برای تخمین ضریب اصطکاک که برای تمام رژیم‌های جریان (از آرام تا آشفته) معتبر است و به خصوصیات جریان (عمق آب و سرعت جریان) و ارتفاع زبری بستگی دارد به صورت زیر ارائه کردند:

$$\text{(رابطه ۱۳)}$$

$$f = \left(\frac{24}{R_h}\right)^\alpha \times \left[\frac{0.86e^{W(1.35R_h)}}{R_h}\right]^{2(1-\alpha)b} \times \left\{\frac{1.34}{[\ln(12.21\frac{h}{k_s})]^2}\right\}^{(1-\alpha)(1-b)}$$

که در آن R_h عدد رینولدز جریان است با فرض اینکه طول مشخصه جریان برابر با عمق آب (h) می‌باشد و k_s ارتفاع زبری است. مقادیر مختلفی برای k_s توسط محققان ارائه شده است به عنوان مثال Van Rijn (1982) مقدار $3d_{90}$ ، Hammond et al. (1984) مقدار $6.63d_{50}$ و López and Barragen (2008) مقدار $2.4d_{90}$ ارائه کردند. در این مطالعه از مقدار پیشنهاد شده توسط López and Barragen (2008) استفاده شده است. پارامترهای α ، b و $W(1.35R_h)$ به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\alpha = \frac{1}{1 + \left(\frac{R_h}{678}\right)^{8.4}} \quad \text{(رابطه ۱۴)}$$

$$b = \frac{1}{1 + \left(\frac{R_h}{150\frac{h}{k_s}}\right)^{1.8}} \quad \text{(رابطه ۱۵)}$$

$$\text{(رابطه ۱۶)}$$

$$W(1.35R_h) = \ln(1.35R_h) - \ln[\ln(1.35R_h)] + \frac{\ln[\ln(1.35R_h)]}{\ln(1.35R_h)} + \frac{\ln[\ln(1.35R_h)]^2 - 2\ln[\ln(1.35R_h)]}{2[\ln(1.35R_h)]^2}$$

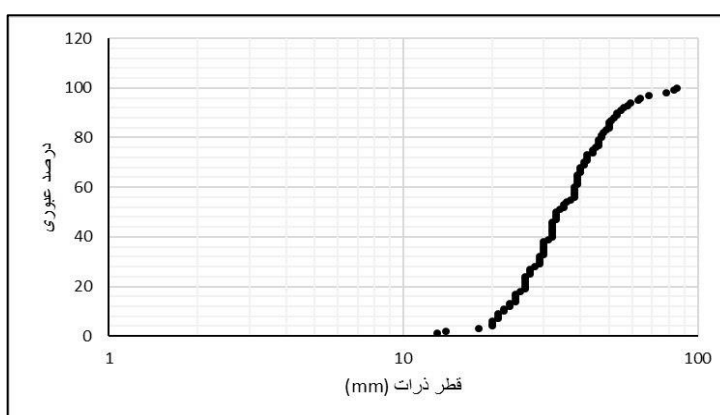
یکی از ساده‌ترین روش‌ها برای برآورد سرعت برشی بستر، روش دونقطه‌ای می‌باشد. این روش بر مبنای قانون لگاریتمی سرعت به دست آمده است و به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود (Julien, 2010; Afzalimehr, 2010b):

$$u_* = \frac{k(u_{0.2} - u_{0.8})}{\ln\frac{z_{0.2}}{z_{0.8}}} \quad \text{(رابطه ۱۷)}$$

Fazlollahi and Afzalimehr (2014); Emadzadeh et al. (2010) نشان دادند که ثابت ون کارمن در شرایط انتقال رسوب کمتر از 0.4 ، در حضور شکل بستر بیش از 0.4 می‌باشد و در



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی بازه مورد مطالعه



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی بازه انتخابی

نقشه‌برداری شد و پس از عملیات نقشه‌برداری داده‌های دوربین نقشه‌برداری استخراج و نقشه توپوگرافی و نقشه‌های سه‌بعدی بازه محاسبه و ترسیم شدند. شکل (۳) نحوه نقشه‌برداری و نقشه توپوگرافی بازه انتخابی را نشان می‌دهد.

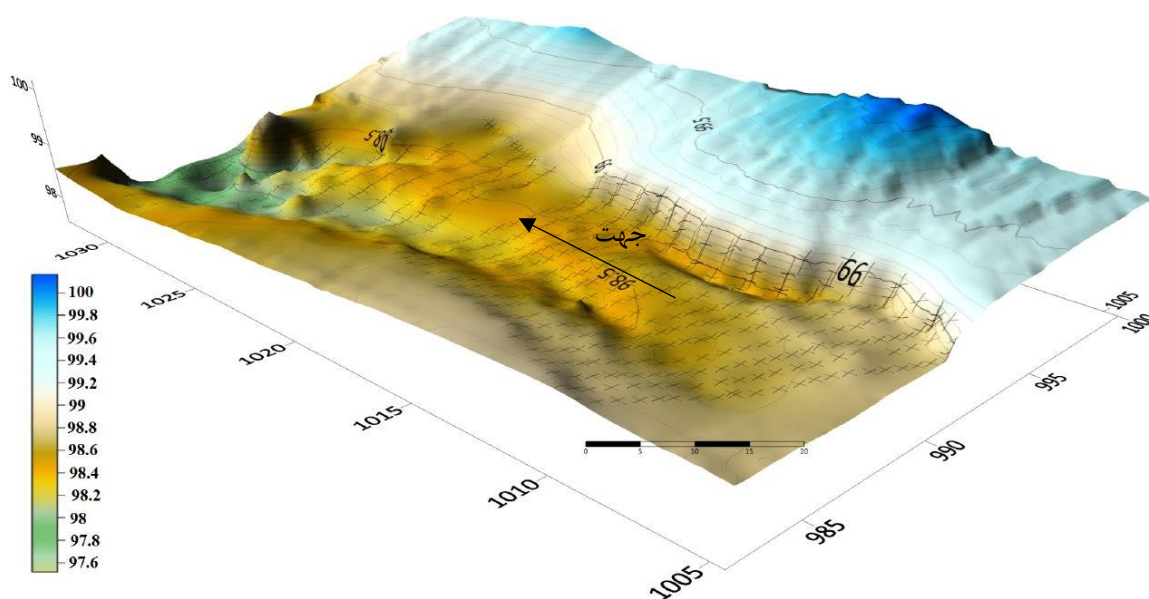
جدول (۱) خلاصه آماری از میانگین داده‌های برداشت‌شده و محاسبه‌شده در ۸ مقطع را نشان می‌دهد. در این جدول W عرض و A مساحت مقطع عرضی جریان را نشان می‌دهند. بررسی بیش از ۱۰۰ بازه در رودخانه‌های ایران حاکی از آن بوده که محدوده عدد فرود در رودخانه‌های کوهستانی در محدوده $0/12$ تا $0/56$ می‌باشد که در این مطالعه نیز این محدوده تأیید شد.

جدول ۱- خلاصه آماری از داده‌های برداشت‌شده و محاسبه‌شده

پارامتر	مقدار
$h(m)$	$0/28$
$W(m)$	$8/25$
$v(\frac{m}{s})$	$0/80$
$A(m^2)$	$1/43$
$Q(m^3/s)$	$1/25$
Fr	$0/28$

برای برداشت سرعت در هر نقطه، از یک دستگاه سرعت-سنج مولینه پروانه‌ای استفاده گردید. کالیبره این دستگاه توسط آزمایشگاه هیدرولیک مرکز تحقیقات آب ایران انجام شده است. در هر مقطع بین ۳ تا ۵ پروفیل و در هر پروفیل به‌طور میانگین ۱۲ نقطه در عمق اندازه‌گیری شد. هر چند با توجه به قطر مولینه حداقل بین کف بستر تا ۳ سانتی‌متر بالای آن قابل اندازه‌گیری نبود. زمان داده‌برداری برای هر نقطه ۲۰ ثانیه در نظر گرفته شد و برای کاهش خطا اندازه‌گیری در هر نقطه با سه تکرار صورت گرفت. میانگین این سه داده به‌عنوان مقدار سرعت در نقطه موردنظر در نظر گرفته شد. دامنه عمق جریان در مقاطع انتخابی برای اندازه‌گیری سرعت بین ۱۸ تا ۳۵ سانتی‌متر بود. در عمق نزدیک بستر تراکم نقاط داده‌برداری بیشتر در نظر گرفته شد.

در این پژوهش به‌منظور تعیین شکل بستر رودخانه، عمق جریان در نقاط مختلف، شیب طولی و مقاطع عرضی، نقشه‌برداری توسط یک دستگاه دوربین لایکا صورت گرفت. برای این منظور بازه انتخابی از طریق طناب‌هایی با ابعاد $0/4$ متر در راستای طولی و $0/4$ متر در راستای عرضی رودخانه شبکه‌بندی شد و سپس نقشه‌برداری انجام شد. در این مطالعه بیش از ۱۲۰۰ نقطه



شکل ۳- نحوه نقشه برداری و توپوگرافی بازه انتخابی

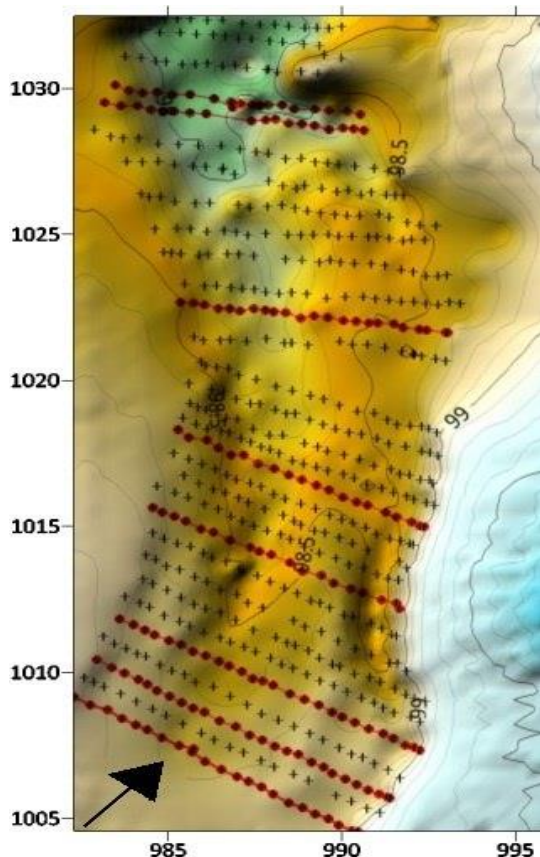
نتایج و بحث

نیمرخ‌های سرعت در بازه انتخابی

در مجموع ۲۹ نیمرخ سرعت در ۸ مقطع عرضی اندازه‌گیری شد. در شکل (۴) موقعیت این نیمرخ‌ها و نقاط نقشه‌برداری شده نشان داده شده است که مقاطع قرمز رنگ نشان‌دهنده مقاطع اندازه‌گیری سرعت و مقاطع مشکی رنگ (علامت +) مقاطع نقشه‌برداری شده را نشان می‌دهد. ترتیب شماره‌گذاری مقاطع اندازه‌گیری سرعت از بالا دست به سمت پایین دست می‌باشد، لازم به ذکر است که برای نمایش بهتر شکل، مقاطع نقشه‌برداری شده به صورت یکی در میان نشان داده شده است و نیمی از مقاطع نمایش داده نشده است. همچنین در شکل (۵) نیمرخ‌های سرعت در مقاطع شماره ۳ و ۷ ارائه شده است. تعداد نیمرخ‌های سرعت در نواحی با پوشش گیاهی، بیشتر در نظر گرفته شده است. به همین دلیل تعداد نیمرخ سرعت در مقطع شماره ۷ (شکل ۵-ب)

در نزدیک ساحل راست که در آن پوشش گیاهی متراکم وجود داشت، بیشتر است. از شکل (۵) مشخص است که نیمرخ‌های سرعت به صورت S شکل می‌باشند که این شکل در سایر مجاری شنی و قلوه‌سنگی گزارش شده است (Bathurst, 1988; jarrett, 1990; Afzalimehr and Subhasish, 2009; Afzalimehr et al., 2010).

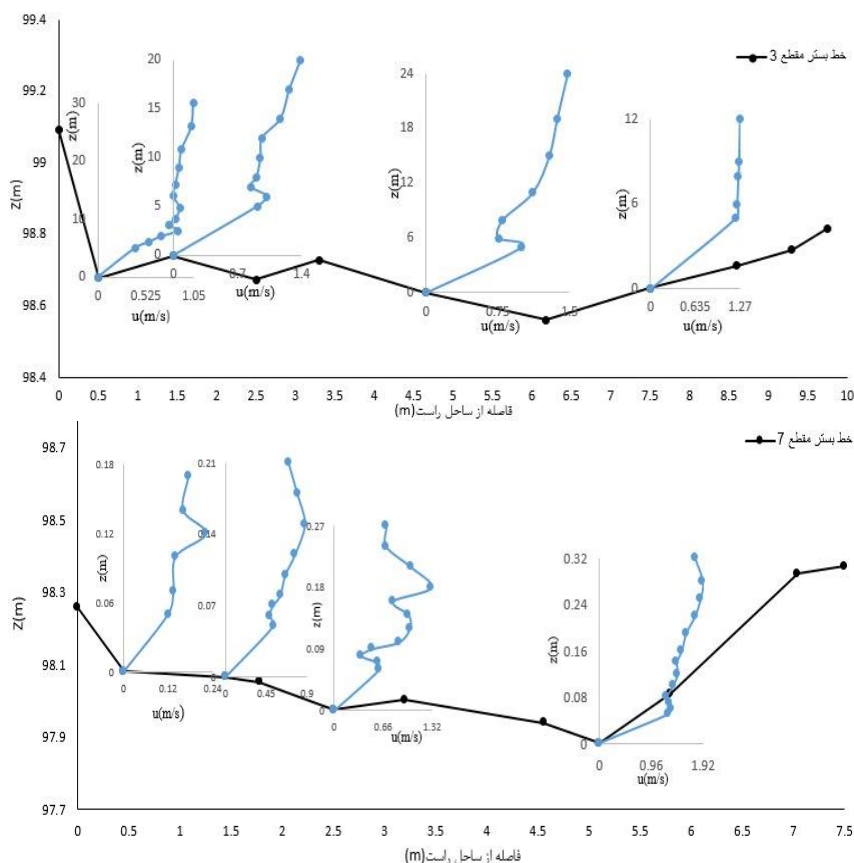
در شکل (۵_الف) نیمرخ سرعت در مقطع شماره ۳ ارائه شده است. در این مقطع بیشترین عمق تقریباً در محور مرکزی مقطع قرار دارد. نیمرخ‌های سرعت در ابتدا روند افزایشی دارند و در نزدیکی $\frac{z}{h} \approx 0.35$ نقطه برگشت نیمرخ سرعت می‌باشد که از آن به بعد نیمرخ سرعت روند کاهشی می‌یابد، سپس در نزدیکی $\frac{z}{h} \approx 0.5$ نیمرخ سرعت به روند افزایشی خود برمی‌گردد. علت آن بر اساس تئوری لایه‌مرزی حضور دو لایه عمده در هر عمق جریان است: لایه داخلی که از بستر شروع می‌شود و لایه خارجی تحت تأثیر گرادیان فشار نامطلوب که سبب برگشت نیمرخ سرعت



شکل ۴- موقعیت نیمرخ‌ها و نقاط نقشه‌برداری شده در بازه انتخابی

جریان می‌شود. این شکل در سایر مجاری شنی و قلوه‌سنگی گزارش شده است (Afzalimehr and Dey, 2009; Afzalimehr and Rennie, 2009; Afzalimehr and Ramazani, 2019). با مقایسه نیمرخ سرعت در محور ۱/۵ متری از ساحل راست با نیمرخ سرعت در محور ۱/۵ متری از ساحل چپ مشخص می‌شود که سرعت در نزدیکی بستر محور ۱/۵ متری از ساحل راست کمتر از ۱/۵ متری از ساحل چپ است که دلیل آن وجود یک تکه سنگ در مقابل محور ۱/۵ متری از ساحل راست می‌باشد که موجب انحراف جریان از عمق‌های نزدیک به بستر این محور گردید. همچنین وجود پوشش گیاهی در ساحل راست نیز دلیل دیگر این اختلاف سرعت می‌باشد.

شکل (۵_ب) نیمرخ سرعت در مقطع شماره ۷ را نشان می‌دهد. در ساحل راست این مقطع پوشش گیاهی متراکم وجود داشت که موجب تغییر شکل نیمرخ سرعت می‌شود. به همین دلیل در نیمرخ‌های نزدیک به ساحل راست، حداکثر سرعت در زیر سطح آب می‌باشد که دلیل آن تقویت جریان‌های ثانویه ناشی از پوشش گیاهی است (Afzalimehr et al., 2010; Afzalimehr et al., 2016).



شکل ۵- نیمرخ‌های سرعت الف) در مقطع شماره (۳) ۳/۳۸ متری از شروع بازه ب) در مقطع شماره (۷) ۲۳/۹۵ متری از شروع بازه

مقایسه روش‌های محاسبه تنش برشی بستر

در مطالعات میدانی به دلیل محدودیت‌های عملیاتی، تعداد نقاط داده برداری شده در ناحیه داخلی ($0 < \frac{z}{h} < 0.2$) کم می‌باشد، بنابراین استفاده از قانون کلارز یا همان قانون لگاریتمی برای برآورد تنش برشی بستر دقت لازم را ندارد، که در این پژوهش این روش مورد استفاده قرار نگرفت. همچنین از رابطه ۱ به دلیل اینکه برای برآوردهای موضعی مناسب نیست، استفاده نشده است. با توجه به نکات بالا، سه روش، مشخصات لایه مرزی^۱، قانون سهمی^۲ و دونقطه‌ای^۳ برای برآورد تنش برشی در بازه مورد مطالعه

انتخاب شدند. جدول (۲) مقادیر تنش برشی به دست آمده با این سه روش را نشان می‌دهد. در این جدول نام محورها به صورت (فاصله از ساحل راست به متر - شماره مقطع) می‌باشد. به عنوان مثال D1_1.6 به معنای محور موجود در مقطع شماره ۱ و با فاصله ۱/۶ متر از ساحل راست بیان می‌شود. همچنین اندیس-های BL ، TM و TP به ترتیب نشان دهنده مقدار پارامتر مورد نظر با استفاده از روش‌های مشخصات لایه مرزی، قانون سهمی و دونقطه‌ای می‌باشد.

جدول ۲- پارامترهای هیدرولیکی و تنش برشی بستر به دست آمده از روش‌های مختلف در محورهای مقاطع انتخابی

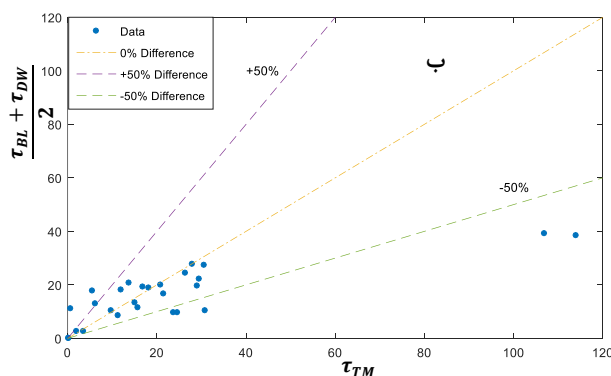
نام محور	h (m)	$\frac{v}{m}$ ($\frac{m}{s}$)	f	$u_{*}(BL)$ ($\frac{m}{s}$)	$u_{*}(TM)$ ($\frac{m}{s}$)	$u_{*}(TP)$ ($\frac{m}{s}$)	τ_{DW} ($\frac{N}{m^2}$)	τ_{BL} ($\frac{N}{m^2}$)	τ_{TM} ($\frac{N}{m^2}$)	τ_{TP} ($\frac{N}{m^2}$)
D1_1.6	۰/۲۰	۰/۹۴۳۶	۰/۱۵۵۴	-۰/۱۵۲۳	-۰/۱۴۴۳	-۰/۱۴۷۵	۱۷/۳۰	۲۳/۲۰	۲۰/۸۲	۲۱/۷۷
D1_3.2	۰/۲۰	۰/۷۲۷۴	۰/۱۵۵۴	-۰/۱۷۷۹	-۰/۱۱۶۴	-۰/۱۷۵۵	۱۰/۲۸	۳۱/۶۵	۱۳/۵۵	۳۰/۸۲
D1_4.7	۰/۳۰	۰/۹۳۶۳	۰/۱۲۰۰	-۰/۱۴۲۰	-۰/۱۴۶۳	-۰/۲۵۲۵	۱۳/۱۵	۲۰/۱۶	۲۱/۴۰	۶۳/۷۸
D1_6.3	۰/۳۲	۰/۹۸۹۴	۰/۱۱۵۵	-۰/۱۸۶۶	-۰/۱۶۲۰	-۰/۳۱۷۲	۱۴/۱۳	۳۴/۸۲	۲۶/۲۴	۴۷/۱۹
D1_7.9	۰/۱۸	۰/۶۸۶۵	۰/۱۶۷۲	-۰/۱۰۴۴	-۰/۱۷۵۰	-۰/۱۱۵۷	۹/۸۵	۱۰/۹۰	۳۰/۶۳	۱۳/۴۰
D2_1.6	۰/۲۴	۰/۶۴۷۶	۰/۱۳۷۴	-۰/۱۷۱۴	-۰/۱۰۹۳	-۰/۱۶۴۹	۷/۲۲	۲۹/۳۸	۱۱/۹۵	۲۷/۲۰
D2_5	۰/۳۵	۰/۷۷۱۲	۰/۱۰۹۷	-۰/۱۷۴۹	-۰/۱۲۹۴	-۰/۱۸۵۵	۸/۱۵	۳۰/۵۹	۱۶/۷۴	۳۴/۴۳
D2_8	۰/۱۷	۰/۶۷۴۳	۰/۱۷۴۲	-۰/۰۹۷۳	-۰/۱۵۶۹	-۰/۱۱۳۲	۹/۹۰	۹/۴۷	۲۴/۶۲	۱۲/۸۱
D3_0.5	۰/۲۰	۰/۴۹۹۰	۰/۱۲۰۰	-۰/۱۲۷۱	-۰/۱۵۳۴	-۰/۱۲۰۹	۳/۷۴	۱۶/۱۵	۲۳/۵۳	۱۴/۶۲
D3_1.45	۰/۲۰	۰/۹۲۸۳	۰/۱۵۵۴	-۰/۱۵۰۹	-۰/۱۶۹۹	-۰/۱۴۴۶	۱۶/۷۴	۲۲/۷۷	۲۸/۸۷	۲۰/۹۳
D3_4.65	۰/۳۳	۱/۰۲۵۳	۰/۱۴۱۶	-۰/۱۶۱۳	-۰/۱۷۱۱	-۰/۱۲۷۴	۱۸/۶۱	۲۶/۰۲	۲۹/۲۸	۱۶/۲۲
D3_7.5	۰/۱۱	۰/۹۵۰۱	۰/۲۴۵۱	-۰/۱۴۴۹	-۰/۷۲۲۶	-۰/۲۰۷۷	۲۷/۶۵	۲۱/۰۰	۵۲۲/۱۵	۴۳/۱۷
D4-0.75	۰/۳۲	۰/۷۱۹۵	۰/۱۱۵۵	-۰/۱۱۵۸	-۰/۰۹۸۰	-۰/۱۷۱۳	۷/۴۷	۱۳/۴۱	۹/۶۰	۲۹/۳۶
D4_2.2	۰/۲۲	۱/۰۹۰۲	۰/۱۴۵۸	-۰/۱۸۲۱	-۰/۱۷۴۶	-۰/۲۰۷۳	۲۱/۶۷	۳۳/۱۶	۳۰/۴۹	۴۲/۹۷
D4_3.8	۰/۲۰	۱/۳۹۷۸	۰/۱۵۵۴	-۰/۱۷۴۷	-۰/۶۴۶۴	-۰/۱۲۳۴	۳۷/۹۶	۳۰/۵۲	۴۱۷/۸۳	۱۵/۲۴
D4_5.6	۰/۱۲	۰/۶۹۹۴	۰/۲۲۷۸	-۰/۰۹۲۲	-۰/۰۲۲۶	-۰/۱۲۵۱	۱۳/۹۳	۸/۵۰	۰/۵۱	۱۵/۶۶
D5_1.25	۰/۲۶	۰/۴۱۲۷	۰/۱۳۱۰	-۰/۰۵۰۹	-۰/۰۵۸۹	-۰/۰۳۶۶	۲/۷۹	۲/۵۹	۳/۴۷	۱/۳۴
D5_3.65	۰/۲۶	۱/۴۱۳۳	۰/۱۳۱۰	-۰/۲۱۰۱	-۰/۳۳۷۴	-۰/۱۷۴۱	۳۲/۷۰	۴۴/۱۰	۱۱۳/۸۴	۳۰/۳۲
D5_5.9	۰/۱۰	۰/۶۴۹۷	۰/۲۶۶۴	-۰/۱۱۰۲	-۰/۰۷۸۸	-۰/۱۶۶۲	۱۴/۰۵	۱۲/۱۴	۶/۲۰	۲۷/۶۵
D6_1.2	۰/۱۶	۰/۶۷۰۵	۰/۱۸۲۱	-۰/۱۲۲۰	-۰/۰۷۴	-۰/۲۰۷۴	۱۰/۲۳	۱۶/۵۹	۱۴/۸۸	۴۳/۰۲
D6_3.5	۰/۲۶	۱/۰۶۴۳	۰/۱۳۱۰	-۰/۱۹۲۱	-۰/۱۶۹۷	-۰/۲۳۵۸	۱۸/۵۵	۳۶/۹۰	۲۷/۸۰	۵۵/۶۰
D6_5.8	۰/۱۵	۰/۳۷۲۹	۰/۱۹۱۰	-۰/۰۴۹۸	-۰/۰۴۴۵	-۰/۰۱۶۰	۳/۳۲	۲/۴۸	۱/۹۸	۰/۲۶
D7_0.5	۰/۱۷	۰/۱۱۵۱	۰/۱۷۴۲	-۰/۰۳۰۴	-۰/۰۰۲۰	-۰/۰۳۶۲	۰/۲۹	۰/۰۹	۰/۰۱	۱/۳۱
D7_1.45	۰/۲۱	۰/۶۱۱۸	۰/۱۵۰۴	-۰/۱۰۱۱	-۰/۱۰۶۳	-۰/۱۱۱۱	۷/۰۴	۱۰/۲۲	۱۱/۳۰	۱۲/۳۵
D7_2.5	۰/۲۷	۰/۷۴۱۵	۰/۱۲۷۹	-۰/۱۶۴۴	-۰/۰۷۴۲	-۰/۱۲۲۰	۸/۷۹	۲۷/۰۳	۵/۵۱	۱۴/۹۰
D7_5.1	۰/۱۸	۱/۴۵۸۲	۰/۱۶۷۲	-۰/۱۸۵۸	-۰/۳۳۱۲	-۰/۲۰۳۳	۴۴/۴۵	۳۴/۵۲	۱۰۶/۷۰	۴۱/۳۳
D8_1.8	۰/۳۱	۰/۸۹۹۶	۰/۱۱۷۷	-۰/۱۶۲۹	-۰/۱۳۴۷	-۰/۱۹۶۲	۱۱/۱۹	۲۶/۵۴	۱۸/۱۴	۳۸/۴۹
D8_2.2	۰/۲۳	۰/۱۳۳۲	۰/۱۴۱۶	-۰/۰۲۰۵	-۰/۰۰۷۰	-۰/۰۲۸۳	۰/۳۱	۰/۴۲	۰/۰۵	۰/۸۰
D8_6.3	۰/۳۰	۰/۸۱۰۱	۰/۱۲۰۰	-۰/۱۱۵۹	-۰/۱۲۴۸	-۰/۱۲۸۰	۹/۸۴	۱۳/۴۳	۱۵/۵۸	۱۶/۳۹

به گونه‌ای که در ۸۰ درصد محورها مقدار تنش برشی بستری که با استفاده از روش داریسی-ویسباخ به دست آمده است کوچک‌تر از روش‌های دونقطه‌ای و قانون سهمی می‌باشد، این مقدار در مقایسه با روش مشخصات لایه مرزی ۶۹ درصد می‌باشد. میانگین درصد اختلاف نسبی بین دو روش قانون سهمی و مشخصات

علاوه بر سه روش فوق، در جدول (۲) نتایج کاربرد روش ضمنی داریسی-ویسباخ نیز برای مقایسه با سایر روش‌ها ارائه شده است که با اندیس DW نشان داده شده است. بر اساس داده‌های جدول (۲)، در اکثر محورها روش داریسی-ویسباخ در مقایسه با سه روش دیگر برآوردهای کمتری را برای تنش برشی بستر دارد

تنش برشی بستر محاسبه شده از دو روش قانون سهمی و دونقطه-ای، با میانگین تنش برشی بستر حاصل از روش مشخصات لایه مرزی و داریسی-ویسباخ مقایسه شده است. در این شکل خطوط $+50\%$ و -50% مرزهایی برای اختلاف 50% درصد بین مقادیر دو روش مورد بررسی هستند. در مهندسی رودخانه معمولاً از حدود اطمینان 50% درصد برای بررسی مناسب بودن برازش بین مقادیر اندازه گیری شده و محاسبه شده پارامترهای مقاومت جریان استفاده می گردد به همین دلیل در شکل (۶) از مرزهای 50% درصد استفاده شده است که در این حالت داده هایی که بین مرزهای 50% درصد قرار می گیرند اختلاف کمتر از 50% درصد بین دو روش را نشان می دهند. به طور مثال Wu et al. (2004); Lee and Julien (2006); Afzalimehr et al (2010) از چنین حدود اطمینانی استفاده کردند.

با مقایسه روش دونقطه ای با میانگین دو روش داریسی-ویسباخ و مشخصات لایه مرزی در شکل (۶_الف) مشخص می شود که 17 نقطه از 29 نقطه در بین دو مرز قرار دارند یعنی حدود 63% درصد موارد، اختلاف بین این دو روش کمتر از 50% درصد می باشد. در حالی که این مقدار برای روش قانون سهمی در شکل (۶_ب) حدود 59% درصد می باشد. لازم به ذکر است که برای نمایش بهتر شکل، داده های مربوط به دو محور $D3_7.5$ و $D4_3.8$ در شکل (۶_ب) به دلیل مقدار زیاد تنش برشی آورده نشده اند.



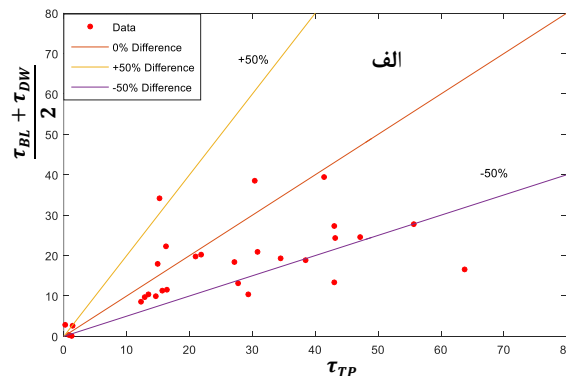
شکل ۶- مقایسه مقادیر تنش برشی بستر محاسبه شده از روش دونقطه ای (الف) و روش قانون سهمی (ب) با میانگین مقادیر محاسبه شده آن با روش مشخصات لایه مرزی و روش داریسی-ویسباخ

باید از برازش غیرخطی چند متغیره استفاده کرد. پس از محاسبه تنش برشی بستر با استفاده از چهار روش ذکر شده، پارامترهای ثابت (A, B, C) مدل مقاومت جریان سه پارامتری از طریق بهترین برازش بین نتایج به دست آمده از هر روش و نتایج حاصل از مدل مقاومت جریان سه پارامتری تعیین شد. این کار با استفاده از جعبه ابزار برازش منحنی نرم افزار متلب انجام شد. نتایج این برازش

لایه مرزی برای پارامتر تنش برشی بستر برابر 181% درصد می باشد که نشان دهنده تطابق ضعیف این دو روش در رودخانه دریوک است که از نوع درشت دانه دارای پوشش گیاهی است؛ این در حالی است که Afzalimehr and Singh (2009) با مطالعه نیمرخ سرعت در رودخانه های قله سنگی بدون پوشش گیاهی هماهنگی خوب این دو روش را ذکر کرده اند.

با توجه به جدول (۲) دامنه تغییرات تنش برشی بستر در روش قانون سهمی بیشتر از سه روش دیگر می باشد و همچنین با توجه به مقادیر تنش برشی بستر به دست آمده از روش قانون سهمی برای بازه انتخابی، مشخص است که این روش برای محور-هایی که عمق کمتر از 15 سانتی متر دارند (محورهای $D3_7.5$, $D4_5.6$ و $D5_5.9$) دارای اختلاف زیادی نسبت به سایر روش ها می باشد.

به دلیل بزرگ بودن عدد رینولدز در این رودخانه مقادیر α و b در روابط 14 و 15 تقریباً برابر با صفر می باشد که این امر باعث می شود ترم های اول و دوم در رابطه 13 تقریباً برابر با 1 شود؛ بنابراین مقدار ضریب اصطکاک تنها به عمق جریان و ضخامت زبری وابسته می شود. به همین دلیل در جدول (۲) محورهایی که عمق یکسانی دارند ضریب اصطکاک برابری دارند. در روش مشخصات لایه مرزی و روش داریسی-ویسباخ از تمام نقاط اندازه گیری سرعت استفاده می شود که دقت استفاده از این روش ها را بالا می برد. به همین دلیل از میانگین این دو روش به عنوان مرجع استفاده شده است و در شکل (۶) مقدار



واسنجی کردن مدل مقاومت جریان سه پارامتری:

مدل مقاومت جریان ارائه شده در رابطه ۳ دارای ۲ متغیر مستقل (عمق h و سرعت جریان v)، ۱ متغیر وابسته (تنش برشی بستر τ_0) و سه پارامتر ثابت (A, B, C) می باشد. در این رابطه τ_0 نسبت به متغیرهای مستقل خود از نوع غیرخطی می باشد و چون تعداد متغیرهای مستقل آن بیشتر از ۱ می باشد، پس برای واسنجی آن

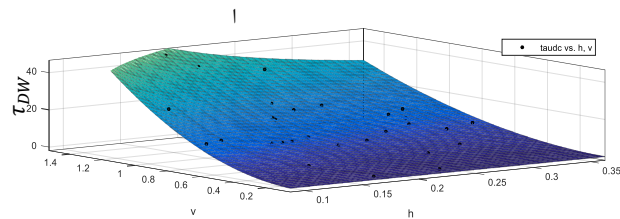
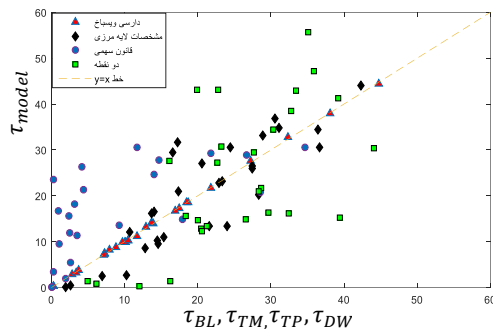
در جدول (۳) آمده است.

با توجه به جدول (۳)، روش دارسی-ویسباخ دارای بیشترین ضریب تعیین (R^2) و کمترین جذر میانگین مربع خطا ($RMSE$) است همچنین این روش دارای کمترین مقدار شاخص NOF می‌باشد که نشان‌دهنده آن است که استفاده از روش دارسی-ویسباخ برای واسنجی مدل مقاومت جریان سه پارامتری، دقت بالاتری نسبت به سایر روش‌ها دارد. شکل (۷_الف) سطح برازش شده بر داده‌های به‌دست‌آمده از روش دارسی-ویسباخ را

نشان می‌دهد و در شکل (۷_ب) تنش برشی به‌دست‌آمده از روش ذکر شده با تنش برشی به‌دست‌آمده از مدل مقاومت جریان سه پارامتری مقایسه شده است. بر اساس شکل (۷_ب) پراکندگی داده‌ها نسبت به خط توافق کامل ($y=x$) در روش‌های دارسی-ویسباخ و مشخصات لایه‌مرزی کمتر است، که نشان‌دهنده برازش بهتر این دو روش نسبت به روش‌های قانون سهمی و دونقطه‌ای می‌باشد.

جدول ۳- نتایج کالیبراسیون مدل مقاومت سه پارامتری با استفاده از چهار روش موردنظر

روش	A	B	C	model	R^2	RMSE	NOF
دارسی-ویسباخ	۱/۹۷۲	۱۶۰/۹	۰/۷۱۵۲	$\frac{\tau_0}{\rho} = \frac{v^{1.972}}{160.9h^{0.7152}}$	۰/۹۹۹۶	۰/۰۰۰۲۳۲۲	4.7×10^{-6}
مشخصات لایه‌مرزی	۱/۱۵۲	۱۷/۸۷	-۰/۵۰۳۰	$\frac{\tau_0}{\rho} = \frac{v^{1.152}}{17.87h^{-0.5030}}$	۰/۷۳۰۸	۰/۰۰۶۲۳۸	1.1×10^{-4}
قانون سهمی	۴/۳۱۴	۳۹۴۲۰	۴/۵۲۲	$\frac{\tau_0}{\rho} = \frac{v^{4.314}}{39420h^{4.522}}$	۰/۶۱۴۴	۰/۰۷۳۹۵	1.8×10^{-3}
دونقطه‌ای	۰/۸۱۰۵	۱۷/۷۵	-۰/۳۸۹۸	$\frac{\tau_0}{\rho} = \frac{v^{0.8105}}{17.75h^{-0.3898}}$	۰/۳۳۴۹	۰/۰۱۳۶۷	2.7×10^{-3}



شکل ۷- الف) سطح برازش شده بر داده‌های به‌دست‌آمده از روش دارسی-ویسباخ (ب) مقایسه تنش برشی به‌دست‌آمده از چهار روش ذکر شده با تنش برشی به‌دست‌آمده از مدل مقاومت جریان سه پارامتری

دبی آن قسمت به دست آمد. سپس با جمع این دبی‌ها مقدار دبی کلی عبوری از هر مقطع محاسبه شد.

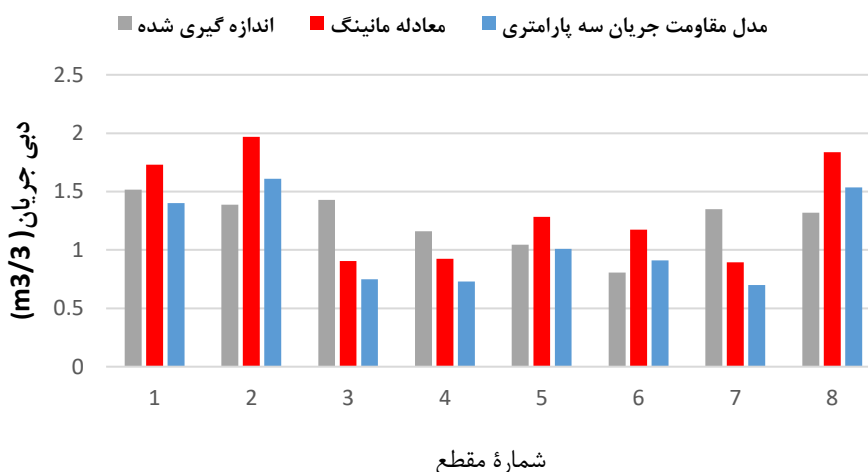
با توجه به اینکه رابطه استریکلر ($n = 0.0474d_{50}^{1/6}$) برای رودخانه‌های شنی با دانه‌بندی یکنواخت کاربرد فراوانی دارد و رودخانه مورد مطالعه نیز دارای دانه‌بندی یکنواخت بوده و از نوع شنی است پس از روش استریکلر برای محاسبه ضریب زبری مانینگ استفاده شد. همچنین روش واسنجی و اعتبارسنجی به روشی که Afzalimehr and anctil, (1998); Julien and Wargadalam, (1995); Lee and Julien, (2006) انجام داده‌اند، در این پژوهش نیز صورت گرفته است، یعنی داده‌ها به سه بخش، بخشی برای توسعه مدل، بخشی برای واسنجی و بخشی برای اعتبارسنجی تقسیم شدند. درواقع با جمع‌آوری داده‌های بیش از یک هزار رودخانه طی ۲۵ سال گذشته این روش

از آنجاکه امکان اندازه‌گیری مستقیم تنش برشی بستر در پژوهش‌های میدانی وجود ندارد، بنابراین امکان محاسبه دقت مدل از طریق مقایسه مقدار تنش برشی بستر محاسبه شده با مقدار اندازه‌گیری شده وجود ندارد؛ بنابراین برای اطمینان از کارایی مدل و محاسبه دقت مدل، می‌توان مقدار دبی جریان محاسبه شده از طریق مدل (رابطه ۴) را با دبی جریان اندازه‌گیری شده مقایسه کرد. در شکل (۸) مقدار دبی محاسبه شده از طریق معادله مانینگ و دبی محاسبه شده از طریق مدل سه پارامتری واسنجی شده با روش دارسی-ویسباخ، با مقدار دبی اندازه‌گیری شده مقایسه شده است. لازم به ذکر است که برای اندازه‌گیری دبی جریان در هر مقطع، ابتدا سرعت متوسط مربوط به هر نیمرخ از طریق رابطه $V = \frac{1}{h} \int_0^h v dy$ محاسبه شد و سپس با ضرب سرعت متوسط هر نیمرخ در مساحت مربوط به آن نیمرخ مقدار

بکار برده شد.

است و میانگین درصد خطای این مدل در حدود ۲۴ درصد است در حالی که این مقدار برای معادله مانینگ حدود ۳۲ درصد است؛ که نشان دهنده دقت بیشتر مدل سه پارامتری نسبت به معادله مانینگ می باشد.

با توجه به شکل (۸)، معادله مانینگ در تمامی مقاطع مقادیر بیشتری را برای دبی جریان نسبت به مدل سه پارامتری نشان می دهد. همچنین مدل سه پارامتری در ۶ مقطع از ۸ مقطع مورد مطالعه برآورد دقیق تری نسبت به معادله مانینگ ارائه داده



شکل ۸- مقایسه بین دبی به دست آمده از مدل با دبی به دست آمده با معادله مانینگ و دبی اندازه گیری شده

نتیجه گیری

نتایج به دست آمده از محاسبه تنش برشی بستر در ۲۹ محور مورد مطالعه نشان داد که دامنه تغییرات روش سهمی بیشتر از سه روش دیگر می باشد و همچنین مقادیر تنش برشی به دست آمده با استفاده از روش قانون سهمی در محورهای با عمق کمتر از ۱۵ سانتی متر نشان دهنده مقادیر نامتعارف در رودخانه های شنی است و اختلاف زیادی با سایر روش ها دارد.

مقایسه روش قانون سهمی با روش مشخصات لایه مرزی حاکی از اختلاف نسبی ۱۸۱ درصدی این دو روش بود که نشان دهنده تطابق ضعیف این دو روش در بازه های دارای پوشش گیاهی نیمه مستغرق در رودخانه های درشت دانه است.

نتایج این پژوهش می تواند برای برآورد تنش برشی بستر در رودخانه های کوهستانی، بهسازی مدل های هیدرولیکی و به کارگیری آن به جای معادله مانینگ به ویژه در شبیه سازی سیل مورد استفاده قرار گیرد که حاصل آن برآورد مناسب تر دبی جریان و توجیه مناسب هزینه طرح های مهندسی رودخانه باشد.

"هیچ گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

تنش برشی بستر یک پارامتر اساسی در مطالعات مهندسی رودخانه است و برآورد آن از اهمیت قابل توجهی در مدل های هیدرولیکی برخوردار است. بر این اساس در این مطالعه به برآورد تنش برشی بستر در بازه ۲۸ متری از رودخانه دریوک مازندران با استفاده از چهار روش و مقایسه نتایج آن ها پرداخته شد. همچنین پارامترهای مدل مقاومت جریان سه پارامتری (A,B,C) بر اساس این چهار روش واسنجی شدند. نتایج نشان داد که روش داریسی-ویسباخ برای واسنجی پارامترهای مدل از دقت بالاتری نسبت به سه روش دیگر برخوردار است.

صحت مدل واسنجی شده از طریق مقایسه دبی محاسبه شده به وسیله مدل با دبی محاسبه شده با معادله مانینگ و مقدار دبی اندازه گیری شده تأیید شد. نتایج نشان داد که مدل واسنجی شده در ۶ مقطع از ۸ مقطع انتخابی، برآورد بهتری نسبت به معادله مانینگ دارد. همچنین میانگین درصد خطای مدل، ۲۴ درصد محاسبه شد در حالی که این مقدار برای معادله مانینگ ۳۲ درصد به دست آمد.

REFERENCES

- Afzalimehr, H. and Ramazani R., (2019). Validation of Double- Averaged Velocity Method for Decelerating Flow in Coarse-bed Rivers. Iranian Journal of Hydraulics. 14(2): 47-67.
- Afzalimehr, H., Barahimi, M. Sui j. (2019). Non-

uniform flow over cobble bed with submerged vegetation strip. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Water Management 172(2): 86–101.

Afzalimehr H., Rennie, C.D. (2009) Determination of

- bed shear stress using boundary layer parameters in a gravel-bed river. *Hydrological Sciences Journal*, 54(1): 147-159.
- Afzalimehr, H. (2010). "Effect of non-uniformity of flow on velocity and turbulence intensities over a cobble-bed." *Hydrological Processes: An International Journal*, 24(3), 331-341.
- Afzalimehr, H., Abdolhosseini, M., & Singh, V. P. (2010a). Hydraulic geometry relations for stable channel design. *Journal of Hydrologic Engineering*, 15(10), 859-864.
- Afzalimehr, H., and Ancil, F. (1999). "Velocity distribution and shear velocity behaviour of decelerating flows over a gravel bed." *Canadian Journal of Civil Engineering*, 26(4), 468-475.
- Afzalimehr, H., and Ancil, F. (2000). "Accelerating shear velocity in gravel-bed channels." *Hydrological sciences journal*, 45(1), 113-124.
- Afzalimehr, H., and Dey S. (2009). "Influence of bank vegetation and gravel bed on velocity and Reynolds stress distributions." *International Journal of Sediment Research*, 24(2), 236-246.
- Afzalimehr, H., and Singh, V. P. (2009). "Influence of meandering on the estimation of velocity and shear velocity in cobble-bed channels." *Journal of Hydrologic Engineering*, 14(10), 1126-1135.
- Afzalimehr, H., and Subhasish, D. (2009). "Influence of bank vegetation and gravel bed on velocity and Reynolds stress distributions." *International Journal of Sediment Research*, 24(2), 236-246.
- Afzalimehr, H., Fazel Najfabadi, E., and Singh, V. P. (2010b). "Effect of vegetation on banks on distributions of velocity and Reynolds stress under accelerating flow." *Journal of Hydrologic Engineering*, 15(9), 708-713.
- Afzalimehr, H., Levesque, B., Molls, T., Zhao, G., and Molls, F. (1999). "Friction Slope in Depth-Averaged Flow." *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(5), 549-549.
- Afzalimehr, H., Moradian, M., Gallichand, J., and Sui, J. (2016). "Effect of adverse pressure gradient and different vegetated banks on flow." *River Research and Applications*, 32(5), 1059-1070.
- Ahmed, F., and Rajaratnam, N. (1998). "Flow around bridge piers." *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(3), 288-300.
- Babaeyan-Koopaei, K., Ervine, D., Carling, P., and Cao, Z. (2002). "Velocity and turbulence measurements for two overbank flow events in River Severn." *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(10), 891-900.
- Bagheri, S., Afzalimehr, H., and Fazel Najaf Abadi, E. (2013). "The Application of Two-point Method for Estimation of Flow Hydrodynamic Parameters in Mountainous Cobble-Bed Rivers." *Water and Soil*, 27(2), 363-372. (In Farsi).
- Bathurst, J. (1988). Velocity profile in high-gradient, boulder-bed channels. Proc. Intl Conf. on Fluvial Hydraulics, IAHR, May, Budapest, Hungary, pp. 29-34.
- Bellos, V., Nalbantis, I., and Tsakiris, G. (2018). "Friction modeling of flood flow simulations." *Journal of Hydraulic Engineering*, 144(12), 04018073.
- Carollo, F. G., Ferro, V., and Termini, D. (2002). "Flow velocity measurements in vegetated channels." *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(7), 664-673.
- D'Ippolito, A., Lauria, A., Alfonsi, G., and Calomino, F. (2019). "Investigation of flow resistance exerted by rigid emergent vegetation in open channel." *Acta Geophysica*, 67(3), 971-986.
- Emadzadeh A Chiew Y. M. and Afzalimehr H (2010) Effect of accelerating flow on incipient motion in a gravel-bed stream. *Journal of Advances in Water Resources* 33, 1094-1104.
- Fazlollahi, A. Afzalimehr, H. (2014). Validation of Spatially Averaging Method for using the Law of the Wall over a pool. *Iranian Journal of Hydraulic*, Vol. 8, No. 2, pp. 19-28.
- Ferguson, R. (2010). "Time to abandon the Manning equation?" *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(15), 1873-1876.
- Hammond, F., Heathershaw, A., and Langhorne, D. (1984). "A comparison between Shields' threshold criterion and the movement of loosely packed gravel in a tidal channel." *Sedimentology*, 31(1), 51-62.
- Hinze, J. (1975). "Turbulence 2'nd edition." MacGraw Hill, New-York.
- Jarrett, R. D. (1990). "HYDROLOGIC AND HYDRAULIC RESEARCH IN MOUNTAIN RIVERS 1." *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 26(3), 419-429.
- Julien, P. Y., and Wargadalam, J. (1995). "Alluvial channel geometry: Theory and applications." *J. Hydraul. Eng.*, 121_4_, 312-325.
- Julien, P.Y., 2010. Erosion and Sedimentation. 2nd edition. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 371 p.
- Lane, S., Hardy, R., Ferguson, R., and Parsons, D. (2005). "A framework for model verification and validation of CFD schemes in natural open channel flows." *Computational Fluid Dynamics: Applications in Environmental Hydraulics*; Bates, PD, Lane, SN, Ferguson, RI, Eds.
- Lee, J. S., & Julien, P. Y. (2006). Downstream hydraulic geometry of alluvial channels. *Journal of hydraulic engineering*, 132(12), 1347-1352.
- Liu, X.-D., Tang, L.-C., Han, Y., Chen, J., and Yang, S.-Q. (2019). "Experimental study on flow resistance over rigid vegetated channel." *IEEE Access*, 7, 93974-93985.
- López Alonso, R., Barragán Fernández, J., and Colomer, M. (2009). "Flow resistance equations for mountain rivers." *Investigación agraria. Sistemas y recursos forestales*, 2009, vol. 18, núm. 1, p. 81-91.
- López, F., and Garcia, M. H. (1996). "Turbulence Structure in Cobble-bed Open-channel Flow (HES 52)."
- López, R., and Barragán, J. (2008). "Equivalent roughness of gravel-bed rivers." *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(6), 847-851.

- Özgen, I., Teuber, K., Simons, F., Liang, D., and Hinkelmann, R. (2015). "Upscaling the shallow water model with a novel roughness formulation." *Environmental Earth Sciences*, 74(11), 7371-7386.
- Rankin, K. L., and Hires, R. I. (2000). "Laboratory measurement of bottom shear stress on a movable bed." *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 105(C7), 17011-17019.
- Setayesh P., and Afzalimehr, H (2021). Effect of reedy emergent side vegetation in gravel-bed streams on bed shear stress patch scale analysis. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering* (in press).
- Shahmohammadi, R., Afzalimehr, H., and Sui, J. (2018). "Impacts of turbulent flow over a channel bed with a vegetation patch on the incipient motion of sediment." *Canadian Journal of Civil Engineering*, 45(9), 803-816.
- Shamloo, H., Rajaratnam, N., and Katopodis, C. (2001). "Hydraulics of simple habitat structures." *Journal of Hydraulic Research*, 39(4), 351-366.
- Stone, M. C., and Hotchkiss, R. H. (2007). "Turbulence descriptions in two cobble-bed river reaches." *Journal of hydraulic engineering*, 133(12), 1367-1378.
- Sukhodolov, A. N., and Sukhodolova, T. A. (2012). "Vegetated mixing layer around a finite-size patch of submerged plants: Part 2. Turbulence statistics and structures." *Water Resources Research*, 48(12).
- Thorne, C. R. (1990). "Effects of vegetation on riverbank erosion and stability." *Vegetation and erosion*.
- van Rijn, L. C. (1982). "Equivalent roughness of alluvial bed." *Journal of the Hydraulics Division*, 108(10), 1215-1218.
- Wolman, M. G. (1954). "A method of sampling coarse river-bed material." *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 35(6), 951-956.
- Wu, B., Molinas, A., & Julien, P. Y. (2004). Bed-material load computations for nonuniform sediments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(10), 1002-1012.
- Yamasaki, T. N., Jiang, B., Janzen, J. G., & Nepf, H. M. (2021). Feedback between vegetation, flow, and deposition: a study of artificial vegetation patch development. *Journal of Hydrology*, 126232.