

تعیین فاکتور اصطکاک شکل بستر رودخانه‌های درشت‌دانه در حضور لایه سپر

سید سعید اخروی¹ و سعید گوهری^{2*}

1- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب-سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان
2- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان

*s.gohari@basu.ac.ir

(دریافت مقاله: 96/7/25؛ پذیرش مقاله: 97/3/29)

چکیده - فاکتور اصطکاک نقش بنیادی و مؤثری در محاسبات هیدرولیکی ایفا می‌کند. در رودخانه‌های درشت‌دانه، فاکتور اصطکاک وابسته به اندازه ذرات و شکل بستر است. وجود دامنه وسیعی از اندازه‌های ذرات در این رودخانه‌ها و توسعه لایه سپر اثرات قابل توجهی بر فاکتور اصطکاک دارد. بدین منظور در این مطالعه به تعیین فاکتور اصطکاک شکل بستر در حضور لایه سپر پرداخته شد و معادله اصطکاکی مبتنی بر برآورد فاکتور اصطکاک ذره از اصطکاک کل بدست آمد. تحلیل معادله استخراج شده نشان داد که فاکتور اصطکاک مستقل از توزیع اندازه ذرات تشکیل‌دهنده بستر و حداکثر اندازه آن‌ها است و پارامتر اصلی کنترل‌کننده آن شیب خط انرژی می‌باشد. نتایج، حاصل از ارتباط فاکتور اصطکاک با آستانه حرکت و بازآرایی ذرات درشت‌دانه در پوشش سپر می‌باشد. از روش کلگان به منظور صحت‌سنجی معادله حاصل استفاده شد که نتایج حاکی از توافق 80 درصدی میان دو روش بود. همچنین، تعلق بخش اعظمی از فاکتور اصطکاک کل به فاکتور اصطکاک شکل بستر (40 درصد) نمایانگر تأثیر بالای شکل بستر بر مقاومت جریان است. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که تشکیل و توسعه لایه سپر با افزایش ضریب زبری سبب افزایش فاکتور اصطکاک و کاهش سرعت متوسط جریان شده و با کاهش پارامتر شیلدز بحرانی، افزایش پایداری بستر را به دنبال داشت. مشاهدات میدانی به منظور آزمون روش‌ها استفاده شده است.

کلیدواژگان: پارامتر شیلدز، رودخانه درشت‌دانه، شکل بستر، لایه سپر، فاکتور اصطکاک.

1- مقدمه

جریان مشکل است، اهمیت بالایی این پارامتر در تعیین دبی جریان به خصوص در زمان حداکثر جریان، نیاز به تعیین روشی به منظور تخمین سرعت جریان را هر چه بیشتر فرا می‌خواند. در این راستا از مدل مقاومت جریان بهره گرفته می‌شود. (Namaee et al., 2017). این مدل به طور وسیعی تحت تأثیر اندازه ذرات بستر، شکل بستر، موانع در مسیر جریان، هندسه کانال، شیب طولی و عمق جریان قرار می‌گیرد. محققان متعددی به اهمیت تعیین فاکتور اصطکاک برای ارزیابی آستانه حرکت و فرایند

محاسبه فاکتور اصطکاک برای تحلیل هیدرولیکی رودخانه اعم از طراحی کانال‌های پایدار، تخمین سرعت‌های جریان برای تعیین سیلاب طراحی، نوع حرکت جریان و رسوبات و تعیین ظرفیت سیلاب کانال بسیار اساسی است. محاسبه سرعت جریان در رودخانه‌های با بستر شنی-سنگی (رودخانه‌های درشت‌دانه با دامنه وسیعی از اندازه ذرات) معضل بزرگی برای دانشمندان و مهندسين امر می‌باشد. علیرغم اینکه در کانال‌های طبیعی اندازه‌گیری سرعت

بستر است. با این وجود، جریانی با سرعت بیشتر از آستانه حرکت لایه سپر در دوره بعدی سبب فروپاشی لایه سپر شده و تمامی ذرات را جابه‌جا می‌کند. بنابراین پیچیدگی در ویژگی‌های رودخانه‌های شنی-سنگی از نرخ انتقال رسوب انتخابی آن‌ها ناشی می‌شود.

شکل بستر در این رودخانه‌ها در چهار دسته (1) خوشه ذرات (2) توالی برآمدگی و فرورفتگی (3) توالی پله و استخر (4) تنداب و آبشار⁴ تقسیم‌بندی می‌شود. شکل‌های بستر دو دسته اول در رودخانه‌های درشت‌دانه و با شیب متوسط و دو دسته بعدی در رودخانه‌های کوهستانی با شیب زیاد معمول هستند. حضور یک سنگ بزرگ منفرد احاطه شده با ذرات ریزتر سبب تشکیل شکل بستر کوچک مقیاسی تحت عنوان خوشه ذرات می‌شود (Brayshaw et al., 1983; Billi, 1988). همچنین در رودخانه‌های با بستر شنی-سنگی، توالی برآمدگی و فرورفتگی‌ها نوعی دیگر از شکل بستر متداول بوده که با نواحی عمیق و کم‌عمق با بستر فرورفته و برآمده مشخص می‌شوند. این نوع شکل بستر در رودخانه‌های ماسه‌ای تشکیل نمی‌شود (Knighton, 1998). از مهمترین ویژگی‌های این شکل بستر، توزیع اندازه ذرات رسوب در برآمدگی و فرورفتگی‌ها است. برآمدگی‌ها عموماً با ذرات درشت‌دانه پوشیده می‌شوند و جریان در این مناطق دارای سرعت بالاتر و عمق کمتری است. در حالی که فرورفتگی‌ها مناطقی عمیق و با سرعت جریان پایین‌تری هستند و انتقال ذرات رسوب در قالب بار بستر متشکل از رسوبات ریزدانه و ماسه در آن شکل می‌گیرد. نتایج تحقیقات بر فاکتور اصطکاک در توالی برآمدگی و فرورفتگی‌ها نشان از اثر مستقیم نوسانات بستر بر ضریب اصطکاک می‌باشد (Prestegard, 1983; Griffiths, 1989). در این شکل بستر، جدایی جریان ناشی از گرادپان فشار معکوس با تولید آشفتگی‌های بزرگ مقیاس و اتلاف بخش اعظمی از انرژی جنبشی سبب افزایش مقاومت جریان می‌شود (Dey, 2014). روابط موجود برای تعیین فاکتور اصطکاک میزان دبی

انتقال رسوبات تأکید داشته‌اند (Meyer-Peter and Muller, 1948; Petit, 1989; Robert, 1997). در رودخانه‌های درشت‌دانه فاکتور اصطکاک نه تنها به اندازه ذره بلکه به شکل بستر نیز وابسته است. شکل بستر تأثیر بسزایی در فاکتور اصطکاک و انتقال رسوب در کانال‌های آبرفتی دارد (Garcia, 2008). علاوه بر این، اصطکاک ناشی از شکل بستر به عنوان منبع اصلی مقاومت مرزی شناخته شده و نقش اساسی در تعیین عمق جریان دارا می‌باشد (Brownlie, 1983). همچنین از لحاظ اکولوژیکی، شکل‌های بستر به دلیل تأثیرگذاری زیاد بر ویژگی‌های جریان و زیستگاه آبریزان از اهمیت بالایی برخوردار هستند. (Simons and Richardson, 1966) با بررسی ارتباط میان مقاومت جریان و شکل بستر در رودخانه‌های درشت‌دانه نشان دادند که بیشترین افزایش میزان مقاومت جریان در فرایند توسعه شکل بستر ناشی از تغییر اولیه شکل بستر صاف است که این امر نمایانگر اثر قابل توجه ایجاد شکل بستر در مقاومت جریان است.

برخلاف ویژگی‌های بستر در رودخانه‌های با بستر ماسه‌ای، رودخانه‌های بستر شنی-سنگی از درجه پیچیدگی بالاتری در طبیعت برخوردارند. رودخانه‌های بستر ماسه‌ای عموماً تشکیل یافته از دامنه کوچکی از اندازه ذرات هستند درحالی که رودخانه‌های با بستر درشت‌دانه شنی-سنگی، دامنه وسیعی از اندازه ذرات اعم از ماسه ریزدانه، سنگ‌های بزرگ و حتی تخته‌سنگ را پوشش می‌دهند. نرخ زمانی انتقال رسوبات غیریکنواخت به علت وابستگی به توزیع ذرات بستر و پخش و معلق شدن ذرات در جریان یک فرایند پیچیده است. در مخلوط رسوبات، مقاومت یک ذره به اندازه، شکل و نحوه قرارگیری آن در بستر وابسته است. به علت غیریکنواختی ذرات، معمولاً ذرات ریزدانه با سرعت بالاتری نسبت به ذرات درشت‌دانه منتقل می‌شوند و ذرات درشت‌دانه‌تر لایه سطحی باقی می‌مانند. فرایند درشت شدن ذرات بستر سبب توسعه بستر درشت‌دانه‌ای شده که به آن لایه سپر گفته می‌شود. ضخامت لایه سپر در طبیعت یک تا سه برابر اندازه متوسط ذرات آن لایه است (Froehlich, 1995). اگر چه ضخامت، تخلخل و توزیع اندازه ذرات لایه سپر تحت تأثیر جریان و تکامل

¹ Cluster² Riffle-Pool Sequence³ Step-Pool Sequence⁴ Rapids and Cascades

دیوار¹). امکان ایجاد روش‌های پیچیده براساس اندازه‌گیری توزیع سرعت به منظور تخمین فاکتور اصطکاک در طول رودخانه فراهم شده است. این تحقیق به هدف بهبود دقت تعیین فاکتور اصطکاک شکل بستر در رودخانه‌های درشت‌دانه صورت گرفته است. بر این اساس، اهداف پژوهش در ابتدا استفاده از ویژگی‌های قانون دیوار برای محاسبه فاکتور اصطکاک کل در رودخانه‌های درشت‌دانه سپر شده در حضور شکل بستر است. سپس اثرات متقابل فرایند توسعه لایه سپر با فاکتور اصطکاک جریان بررسی می‌شود. همچنین در این تحقیق سعی شده است که میزان تأثیرگذاری شکل بستر بر فاکتور اصطکاک به صورت کمی و کیفی بیان گردد. سرانجام نتایج حاصل از فاکتور اصطکاک شکل بستر بدست آمده از دو روش کلگان² و پارامتر شیلدز³ مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

2- روش تحقیق

2-1- تعیین فاکتور اصطکاک کل

از اولین روابط مقاومت جریان موجود رابطه مانینگ بوده که آن را با دو معادله معروف دیگر، شزی و داریسی-ویسباخ، می‌توان معادل ساخت (معادله (3)). در رابطه (3)، U سرعت متوسط جریان، C ضریب شزی، n ضریب مانینگ، f فاکتور اصطکاک داریسی-ویسباخ، S شیب خط انرژی، R شعاع هیدرولیکی و g شتاب گرانش است.

$$V = \frac{R^{2/3} S^{1/2}}{n} = C \sqrt{RS} = \sqrt{\frac{8gRS}{f}} \quad (3)$$

تمامی این معادلات بیانگر یک ضریب مقاومت می‌باشند اما به دلیل اینکه فاکتور اصطکاک پارامتر بی‌بعدی است، بسیاری از معادلات تجربی بر مبنای آن شکل گرفته‌اند. به عبارت دیگر معادله داریسی-ویسباخ شکل صحیح ابعادی معادله شزی است (Namaee et al. 2017). فاکتور اصطکاک عموماً با استفاده از معادله بی‌بعد داریسی-ویسباخ با فرض جریان یکنواخت محاسبه می‌شود. در رودخانه‌های کوهستانی به علت غیریکنواختی جریان و بستر، استفاده از این معادله با فرض مذکور گاهی دارای عدم قطعیت است.

سیلاب را در رودخانه‌های درشت‌دانه تا 100 درصد کمتر برآورد می‌کنند (Jarrett, 1991). دلیل این امر، پیچیده بودن تخمین فاکتور اصطکاک در رودخانه‌های شنی-سنگی به علت وجود شکل بستر است. به علاوه، آرایش بستر با تغییرات در شرایط جریان تغییر یافته و سبب پیچیده شدن تعیین فاکتور اصطکاک شکل بستر می‌شود. (Yang et al. 2005) با در نظرگیری اثر شکل بستر به محاسبه تنش برشی کل بستر پرداختند. سپس معادله توسعه یافته با نتایج 1540 مورد میدانی در رودخانه‌های درشت‌دانه مقایسه شد که حاکی از تطابق 70 درصدی بود. این موضوع نمایانگر تأثیر غیر قابل انکار شکل بستر بر مقاومت جریان است. بنابراین تخمین فاکتور اصطکاک تنها با استفاده از اصطکاک ناشی از ذرات غیر قابل اعتماد است.

با توجه به مطالب پیشین، فاکتور اصطکاک را می‌توان به دو بخش تقسیم نمود (Yalin, 1972; Yen, 1991).

$$f = f' + f'' \quad (1)$$

که در آن، f' و f'' نمایانگر فاکتور اصطکاک ذره و شکل بستر هستند. فاکتور اصطکاک ذره به علت اعمال تنش برشی بستر بر ذرات و فاکتور اصطکاک شکل بستر به دلیل افت انرژی در وجه پایین دست شکل بستر ایجاد می‌شود. (Fedele and Garcia, 2001) نشان دادند که فاکتور اصطکاک در کانال‌های آبرفتی در حضور شکل بستر تابعی غیرخطی از پارامتر شیلدز، اندازه ذره و عمق نسبی جریان است.

مرور منابع حاکی از آن است که فاکتور اصطکاک ذره عموماً با توجه به عدد رینولدز و زبری نسبی (d_{50}/R) محاسبه می‌شود. در رابطه زبری نسبی، d_{50} قطر میانه ذرات و R شعاع هیدرولیکی جریان به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته می‌شوند (Acaroglu, 1972; Van Rijn, 1982). (Van Rijn (1984) معادله (2) را برای محاسبه فاکتور اصطکاک ذره بیان نمود.

$$\left(\frac{1}{f}\right)^{0.5} = 2.03 \log \left(12.2 \frac{h}{d_{90}}\right) \quad (2)$$

در این رابطه h عمق جریان و d_{90} اندازه ذره‌ای است که 90 درصد ذرات از آن کوچکترند.

با توسعه مفهوم قانون لگاریتمی توزیع سرعت (قانون

¹ Law of the Wall

² Keulegan Method

³ Shields Parameter Method

روش کلگان (1)

کلگان در سال 1938 معادله (6) را برای محاسبه فاکتور اصطکاک ذره در کانال‌های روباز با استفاده از فاکتور اصطکاک دارسی-ویسباخ ارائه نمود (Keulegan, 1938). این معادله دارای ساختار یکسانی شبیه به معادله فاکتور اصطکاک لوله‌ها در جریان زبر هیدرولیکی است.

$$f = \left[2.21 + 2.03 \log \left(\frac{R}{k_s} \right) \right]^2 \quad (6)$$

Yen (1991) فهرستی از ضریب k_s گزارش شده را آماده و بررسی نمود. نتایج نشان داد که مقادیر k_s از $1.23d_{35}$ (Ackers and White, 1973) به $3d_{90}$ (Van Rijn, 1982) یا $6.63d_{50}$ (Hammond et al. 1984) تغییر می‌کند. با این وجود، k_s معادل با d_{50} بدون در نظرگیری هیچ ضریب تصحیحی، کاربردی‌ترین حالت با حداکثر تطابق با سایر روش‌های مستلزم پارامتر شیلدز بحرانی می‌باشد (Afzalimehr et al. 2010). Gessler (1990) استفاده از این معادله را برای محاسبه شرایط جریان در بستر رودخانه سپر شده پیشنهاد داده است.

روش پارامتر شیلدز (2)

با توجه به اهمیت حضور لایه سپر در تعیین فاکتور اصطکاک، ضرورت ایجاد مدلی به منظور در نظرگیری اثرات توسعه لایه سپر بر مقاومت جریان محسوس است. با توجه به تجربه محققین پیشین در تحلیل فرایند سپرشدگی بستر در رودخانه‌های درشت‌دانه و ارتباط متقابل آن با تنش برشی متوسط جریان، می‌توان انتظار داشت که زبری مؤثر لایه سپر توسعه یافته از مخلوط رسوبات، تابعی از متوسط تنش برشی بستری باشد که رسوبات آن در معرض جریان قرار گرفته و لایه سپر را ایجاد می‌کند (Proffitt, 1980; Gessler, 1990). با این وجود در مدل کامل فاکتور اصطکاک، زبری مؤثر بستر تابعی از متوسط تنش برشی بستر، ویژگی‌های فیزیکی رسوبات و آب و توزیع اندازه ذرات تشکیل دهنده بستر است. این مدل در رابطه بی‌بعد (7) بیان شده است.

$$\frac{\tau}{(\gamma_s - \gamma)k_s} = f\left(\frac{U_* k_s}{v}\right) \quad (7)$$

در این رابطه τ متوسط تنش برشی بستر، γ_s و γ به ترتیب وزن مخصوص رسوب و آب، v لزجت سینماتیکی و ρ چگالی مایع هستند. این مدل اثر صریح توزیع اندازه ذرات

به منظور دخیل نمودن اثرات غیریکنواختی جریان در معادله دارسی-ویسباخ باید سرعت برشی جریان $(U_* = \sqrt{gRS})$ در این معادله با استفاده از نیم‌رخ توزیع سرعت تخمین زده شود. بنابراین، فاکتور اصطکاک کل با استفاده از معادله (4) محاسبه شده است (Yalin, 1972).

$$\frac{U}{U_*} = \sqrt{\frac{8}{f}} \rightarrow f = 8 \left(\frac{U_*^2}{U^2} \right) \quad (4)$$

با توجه به کاربرد وسیع قانون توزیع سرعت جهانی در مطالعات متعدد میدانی و آزمایشگاهی، سرعت برشی بر طبق این قانون بدست آمده است. شکل عمومی قانون توزیع سرعت جهانی به صورت $\frac{u}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{y}{y_0}\right)$ می‌باشد (y_0 عمق معادل سرعت جریان صفر می‌باشد). از آنجایی که عبارت $y_0 = \frac{k_s}{30}$ برای جریان زبر هیدرولیکی ارائه شده است، قانون لگاریتمی توزیع سرعت معمولاً به صورت $\frac{u}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{30y}{k_s}\right)$ بیان می‌شود. که در این رابطه k_s زبری مؤثر نیکورادزه و κ ثابت جهانی ون کارمن¹ برابر با 0.4 می‌باشند. در این تحقیق، با استفاده از نیم‌رخ سرعت و بر اساس روش دو نقطه برای اندازه‌گیری سرعت جریان، سرعت برشی با تغییرات در شکل عمومی قانون دیوار محاسبه شده است (Julien, 1995; Afzalimehr, 2010).

$$\frac{U_2 - U_1}{U_*} = \frac{1}{\kappa} (\ln y_2 - \ln y_1) \Rightarrow U_* = \frac{\kappa(U_2 - U_1)}{\ln\left(\frac{y_2}{y_1}\right)} \quad (5)$$

در معادله (5)، U_1 و U_2 مقادیر سرعت جریان در 20 و 80 درصد عمق جریان از سطح آب بوده و y_1 و y_2 فواصل عمودی 20 و 80 درصد عمق جریان از سطح آب هستند.

2-2- تعیین فاکتور اصطکاک ذره

همان‌طور که گفته شد با تقسیم فاکتور اصطکاک کل به دو بخش فاکتور اصطکاک شکل بستر و فاکتور اصطکاک ذره، در ابتدا به محاسبه فاکتور اصطکاک ذره f' پرداخته می‌شود. نکته قابل توجه آن است که f' در حالت میدانی قابل اندازه‌گیری نیست و تنها با فرض آنکه بستر رودخانه دارای سطح زبر ساده باشد و بخشی از زبری به علت تنش برشی اعمال شده بر ذره است، قابل تخمین می‌شود (Julien et al. 2002).

¹Von Karman Constant

مقطع در بازه انتخابی با فاصله 10-15 متری انتخاب شدند. این مقاطع بر اساس شکل بستر انتخاب شده است. نیم‌رخ‌های سرعت در مرکز و هر دو سوی مقاطع جریان برداشت شد (شکل 1). سرعت‌ها به صورت نقطه‌ای و با دستگاه سرعت‌سنج رودخانه با محور افقی (مولینه مدل BFM002 با دقت $\pm 2.5\%$ یا $\pm 0.625 \text{ cm/s}$) برداشت شدند. زمان اندازه‌گیری سرعت برای هر نقطه تقریباً 50 ثانیه بود و این عمل در 3 تکرار صورت گرفت و سپس میانگین سرعت برای آن نقطه محاسبه شد. فاصله نقاط اندازه‌گیری 1 تا 2 سانتی‌متر در 20 درصد عمق نزدیک بستر و با فاصله 3 تا 5 سانتی‌متر در 80 درصد عمق جریان مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. همچنین سرعت متوسط جریان از رابطه $U = (U_{0.2} + U_{0.8})/2$ محاسبه شد.

روش مذکور برای دیگر رودخانه‌های درشت‌دانه موجود در این پژوهش نیز اعمال شده است. دو رودخانه دیگر مورد بررسی در این تحقیق به ترتیب رودخانه ماربر و زاینده‌رود بود. رودخانه ماربر از ارتفاعات رشته‌کوه دنا سرچشمه گرفته و در منطقه پادنا از توابع شهرستان سمیرم جریان دارد و به عنوان سرشاخه کوچکی از رودخانه کارون شناخته می‌شود. سرانجام بازه 50 متری خاصی از رودخانه زاینده‌رود پس از سد انحرافی چم‌آسمان به هدف مقایسه شرایط جریان و رسوب در توسعه لایه سپر انتخاب شد؛ در حالی که شرایط بستر رودخانه‌های ماربر و کاج نزدیک به یکدیگر نزدیک هستند. به طور کلی 24 مقطع در این مطالعه استفاده شده است. نیم‌رخ طولی حاصل از نقشه‌برداری بازه، طرح مسیر رودخانه‌های کاج و زاینده‌رود و تصاویر واقعی آن‌ها در شکل‌های 3 و 4 مشخص می‌باشند.

توزیع اندازه ذرات با استفاده از روش Wolman (1954) محاسبه شده است. در این روش در هر مقطع 100 ذره به صورت تصادفی برداشت شده و با اندازه‌گیری سه محور ذره، محور میانه به عنوان قطر ذره یادداشت می‌شود. این عمل در دو سمت یک مقطع بسته به شرایط جریان نیز تکرار می‌شود. به منظور تعیین درجه سپرشدگی بستر توزیع اندازه ذرات رسوبات لایه سطحی و زیرسطحی بستر رودخانه با توجه به تعریف (Froehlich 1995) در مقدمه مقاله، مشخص شده است (شکل 2).

لایه سپر را در نظر نمی‌گیرد. به دلیل آنکه فرایند آستانه حرکت ذرات در عددهای رینولدز ذره بیشتر از 200-150، مستقل از عدد رینولدز ذره می‌شود، موردی که در اندازه‌گیری‌های میدانی و آزمایش‌های محققین متعدد دیده شده است، رابطه (7) به صورت معادله (8) ساده می‌شود که مقدار ثابت آن در حقیقت همان میزان پارامتر شیلدز بحرانی (τ_{*cr}) است.

$$\text{مقدار ثابت} = \frac{\tau}{(\gamma_s - \gamma)k_s} \quad (8)$$

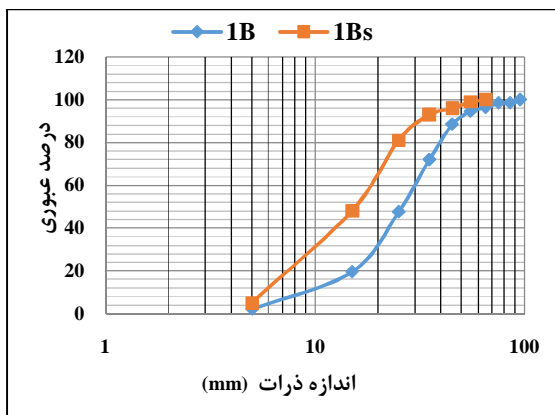
در صورتی که چنین مدلی نتایج معقول و منطقی داشته باشد، این امر به اثرات ارتباط مهم فیزیکی بین فرایند سپرشدگی بستر و فاکتور اصطکاک به دلیل لایه سپر دلالت دارد. زیرا صحت و کارایی مدل در دبی‌جریانی مدنظر است که سبب ایجاد تنش برشی گردد که به تولید لایه سپر می‌انجامد. مدل پیشنهادی با تفسیر فرایند سپرشدگی بستر به ارائه رابطه‌ای به منظور تخمین فاکتور اصطکاک ذره شده است که نتایج حاصل از آن در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرد.

2-3- تعیین فاکتور اصطکاک شکل بستر

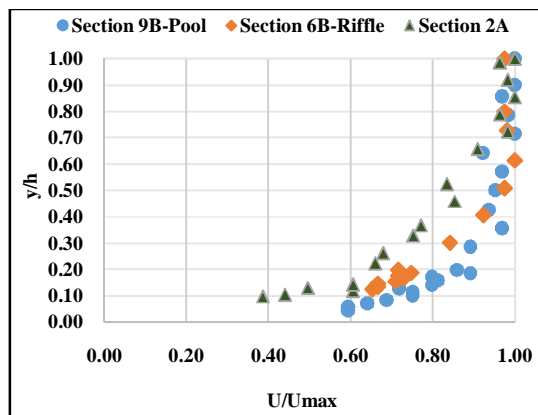
همان‌طور که بیان شد فاکتور اصطکاک شکل بستر از تفاضل فاکتور اصطکاک ذره از فاکتور اصطکاک کل بدست می‌آید (معادله (1)).

3- مطالعات میدانی

داده‌های جمع‌آوری شده در این پژوهش از سه رودخانه با کلاس‌های متفاوت ذرات درشت‌دانه (بستر شنی-سنگی) صورت گرفت. در ابتدا بازه 100 متری از رودخانه کاج از توابع استان چهارمحال و بختیاری در فلات مرکزی ایران مورد بررسی قرار گرفت. سرچشمه این رودخانه از کوهستان‌های منطقه کوهرنگ بوده و به سمت رودخانه کارون سرازیر می‌شود. عرض بستر جاری در رودخانه در این بازه از 14 تا 23 متر متغیر بود. بازه انتخابی تقریباً مستقیم، بدون پوشش گیاهی و با بستر درشت‌دانه پوشیده شده بود. نقشه‌برداری در طول مسیر و قرائت سطح آب و سطح بستر رودخانه با هدف ترسیم نیم‌رخ بستر رودخانه و سطح آب برداشت شد. به طور کلی 9



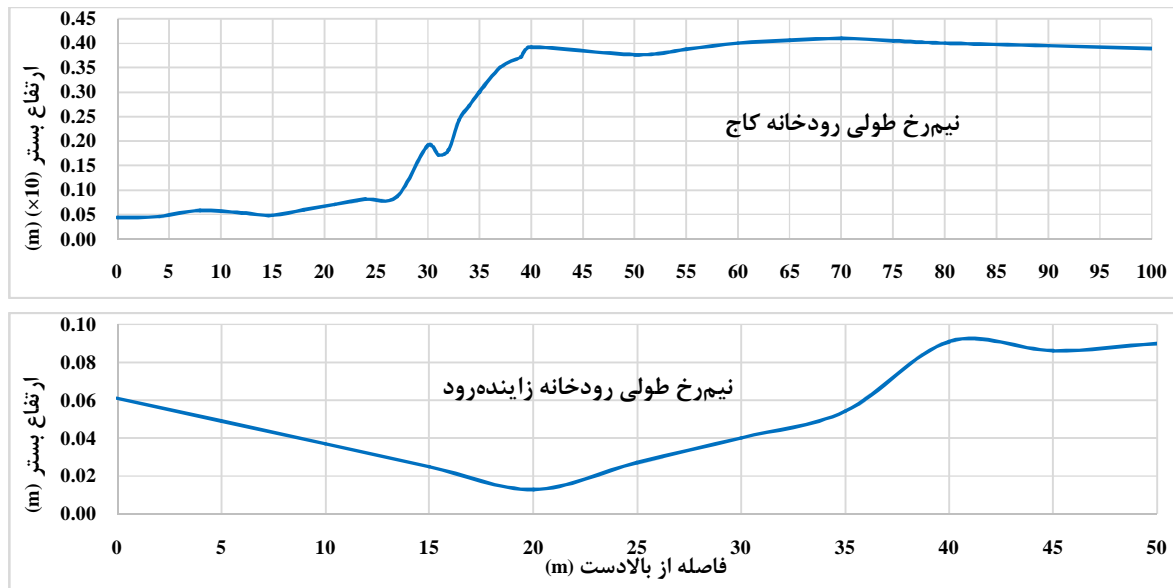
شکل 2 نمودار توزیع دانه‌بندی بستر (1B لایه سطحی و 1Bs لایه زیرسطحی)



شکل 1 نیم‌رخ توزیع سرعت در مقطعی از جریان



شکل 3 نمایش جغرافیایی مسیر بازه‌های انتخابی در رودخانه‌های کاج (تصویر سمت راست) و زاینده‌رود (تصویر سمت چپ)



شکل 4 نیمرخ طولی مسیر بازه‌های انتخابی در رودخانه‌های کاج و زاینده‌رود

میانگین آن همراه با میانگین سرعت جریان در هر مقطع در معادله 4 برای تعیین فاکتور اصطکاک کل (f) استفاده شد. همچنین فاکتور اصطکاک ذره (f') نیز با استفاده از معادله 6 مورد محاسبه قرار گرفت (روش 1). اما معادله 6 تنها به عمق جریان و اندازه میانه ذرات رسوب در هر مقطع وابسته است و نمایانگر برهمکنش میان جریان و رسوب بخصوص در فرایند سپردگی بستر جریان نیست. به همین دلیل، به منظور در نظرگیری اثرات مستقیم و غیرمستقیم توسعه لایه سپر بر فاکتور اصطکاک ذره، از مفهوم پارامتر شیلدز استفاده شد (روش 2).

نتایج اندازه‌گیری‌ها بر سه بازه رودخانه در جدول 2 نشان داد که فرض اندازه میانه ذرات (d_{50}) برای تخمین زبری مؤثر معقول به نظر می‌رسد. زیرا در اندازه‌گیری‌های صورت گرفته، پارامتر شیلدز آستانه اندازه زبری مؤثر تقریباً ثابت بود. مقدار میانگین آن 0,01796 با انحراف استاندارد 0,0142 می‌باشد (جدول 2). وجود این انحراف به آسانی و با عدد رینولدز و یا فرود قابل تشخیص نیست. با در نظرگیری مدل اصطکاکی برای تشکیل و توسعه لایه سپر و مقدار ثابت پارامتر شیلدز مذکور برای اندازه دانه مؤثر، با جایگذاری رابطه (8) در معادله (6)، معادله (9) برای محاسبه فاکتور اصطکاک ذره بدست خواهد آمد.

درجه سپردگی بستر با استفاده از نرخ d_{50s}/d_{50sub} و d_{max}/d_{50s} تعیین می‌شود (d_{max} بزرگترین اندازه ذره در نمودار توزیع اندازه ذرات بستر، d_{50s} و d_{50sub} به ترتیب قطر میانه ذرات لایه سطحی و زیرسطحی بستر هستند). انحراف معیار هندسی توزیع اندازه ذرات $(\sigma = \sqrt{(d_{84}/d_{16})})$ نیز در هر مقطع برآورد شد (d_{84} و d_{16} اندازه‌های هستند که 84 و 16 درصد ذرات از آن کوچکترند). جدول 1، وضعیت رسوبات سطحی و زیرسطحی در مقاطع هر سه رودخانه را به همراه شرایط هیدرولیکی جریان نشان می‌دهد.

4- نتایج و بحث

4-1- فاکتور اصطکاک

فاکتور اصطکاک به میزان قابل توجهی به سرعت متوسط جریان به لحاظ در نظرگیری ویژگی‌های کانال و شرایط جریان و اثرات آن بر نیمرخ‌های سرعت وابسته است. این موارد سبب مقاومت جریان و یا افت انرژی جریان می‌شوند (Bathurst, 2002). بنابراین، برای محاسبه دقیق فاکتور اصطکاک شکل بستر در ابتدا نیاز است تا فاکتور اصطکاک کل و ذره به درستی محاسبه شوند. بر این اساس، با استفاده از معادله 5 مقدار سرعت برشی برای نیمرخ‌های سرعت موجود در هر مقطع محاسبه شد و سپس مقدار

جدول 1 وضعیت هیدرولیکی جریان و رسوبات سطحی و زیرسطحی بستر رودخانه

$\frac{d_{max}}{d_{50s}}$	$\frac{d_{50s}}{d_{50sub}}$	σ	D_{16} (mm)	d_{90} (mm)	d_{84} (mm)	d_{50sub} (mm)	d_{50s} (mm)	Q (m ³ /s)	U (m/s)	S_f	محل مقطع	مقطع	
6,31	3,59	1,79	14,28	57,7	45,6	8,17	29,3	3,02	0,81	0,0015	0	1A	زاینده
5,31	2,14	2,02	29,67	142,59	121,33	25,5	54,66	2,56	0,67	0,0011	20	2A	رود
7,44	1,7	2,18	20,21	100,56	96,25	23	39	2,71	0,706	0,0011	50	3A	
3,8	1,52	1,72	14,6	46,5	43,3	16,5	25	4,66	0,581	0,0081	100	1B	
2,74	3,33	1,68	20,2	58	56,9	10,5	35	7,28	1,06	0,002	90	2B	
2,21	2,07	1,25	34,3	58,6	54	20,5	42,5	8,5	1,05	0,006	80	3B	
2,31	2,24	1,48	23,3	58	51	19	42,5	5,96	1,23	0,0028	70	4B	
3,91	2,87	1,97	10	46,5	38,75	8	23	5,42	0,761	0,0026	55	5B	کاج
2,5	1,79	1,46	32,3	75	69	28	50	9,16	0,932	0,0026	40	6B	
2,2	4,17	1,5	31,6	75	71,3	12	50	6,04	0,867	0,0025	30	7B	
3,78	2,79	1,82	12,5	48,6	41,5	8,2	23	5,45	0,545	0,0003	15	8B	
2,8	2,73	2,08	5	30,5	21,6	6,4	17,5	7,13	1,204	0,0041	0	9B	
2,63	1,9	1,25	35	65	55	21	40	9,64	1,206	0,0064	0	1C	
2,91	1,4	1,91	15	65	55	25	35	7,84	1,01	0,0086	10	2C	
3,14	1,6	1,91	15	65	55	22	35	6,14	0,928	0,0051	20	3C	
3,94	2,06	1,94	20	95	75	17	35	6,42	1,203	0,0016	30	4C	
4,83	1,71	1,18	25	45	35	10,5	18	8,77	1,334	0,0094	40	5C	
2,8	1,67	1,66	20	65	55	21	35	5,39	0,658	0,0038	50	6C	
2,15	1,81	1,27	45	115	105	36	65	8,89	0,85	0,0055	60	7C	ماربر
3,9	2,63	1,26	25	45	40	8	21	7,74	1,012	0,0043	70	8C	
2,05	1,77	1,46	35	78	75	31	55	5,72	0,702	0,0021	80	9C	
2,2	2,04	1,47	30	75	65	24,5	50	5,48	0,64	0,0022	90	10C	
4,06	1,45	1,09	25	35	30	11	16	3,67	0,735	0,0012	100	11C	
2,09	2,4	1,46	35	85	75	23	55	2,88	0,542	0,0002	110	12C	

لذا معادله (10) برای محاسبه فاکتور اصطکاک ذره در شرایط رودخانه‌های سپر شده و دارای شکل‌های بستر کوچک مقیاس (خوشه) شکل گرفته است. از طرف دیگر برای تخمین f' در ابتدا نیاز به محاسبه شیب خط انرژی با استفاده از معادله (11) است. بنابراین کاربرد معادله (10) در محاسبه f' وابسته به شرایط جریان در بالادست از طریق اندازه‌گیری dh/dx ، S و Fr است. پس از محاسبه فاکتور اصطکاک کل با معادله (4) و فاکتور اصطکاک ذره با معادلات (6) و (10)، می‌توان فاکتور اصطکاک شکل بستر (f') را با استفاده از معادله (1) محاسبه نمود. محاسبات نشان داد که f' تعیین شده با استفاده از معادله‌های (6) و (10) (روش 1 و 2) دارای اختلافی کمتر از 21 درصد می‌باشند.

$$f' = \left[2.21 + 2.03 \log \left(\frac{0.01796(Sg-1)}{S} \right) \right]^{-2} \quad (9)$$

با در نظر گرفتن میزان تنش برشی بستر و وزن مخصوص نسبی به ترتیب $(\tau = \gamma h S)$ و $Sg = \frac{\gamma_s}{\gamma} = 2.65$ ، معادله (9) به صورت معادله (10) ساده می‌شود. در معادله حاصل جانشینی شیب خط انرژی (S_f) به جای شیب بستر جریان (S) به منظور در نظرگیری اثرات غیریکنواختی جریان در تخمین فاکتور اصطکاک ذره لحاظ شده است. برای محاسبه شیب خط انرژی از رابطه سنت‌واننت¹ استفاده می‌شود (معادله (11)).

$$f' = \left[2.21 + 2.03 \log \left(\frac{0.02963}{S_f} \right) \right]^{-2} \quad (10)$$

$$S_f = S - \frac{dh}{dx} (1 - Fr^2) \quad (11)$$

¹ Saint-Venant

جدول 2 پارامترهای هیدرولیکی محاسباتی

τ_{*cr}	Re_* ($\times 10^3$)	Fr	f (2)	f (2)	f (1)	f (1)	f	τ (Pa)	U_* (m/s)	U (m/s)	مقطع
0,0109	2,106	0,45	0,02	0,043	0,01	0,053	0,063	5,17	0,072	0,81	1A زاینده رود
0,0051	3,678	0,33	0,043	0,038	0,019	0,062	0,081	4,53	0,067	0,67	2A
0,0061	2,414	0,38	0,023	0,039	0,002	0,059	0,061	3,84	0,062	0,706	3A
0,0108	1,655	0,25	0,015	0,089	0,063	0,041	0,104	4,38	0,066	0,581	1B
0,0166	3,395	0,45	0,02	0,047	0,021	0,046	0,067	9,41	0,097	1,06	2B
0,0153	4,364	0,56	0,002	0,075	0,017	0,06	0,077	10,55	0,1027	1,05	3B
0,0308	6,192	0,69	0,058	0,054	0,05	0,062	0,112	21,23	0,1457	1,23	4B
0,031	2,471	0,44	0,107	0,052	0,11	0,05	0,16	11,55	0,1075	0,761	5B کاج
0,011	4,65	0,52	0,028	0,052	0,013	0,067	0,08	8,65	0,093	0,932	6B
0,012	4,837	0,43	0,049	0,051	0,04	0,06	0,1	9,36	0,097	0,867	7B
0,0063	1,112	0,27	0,039	0,024	0,019	0,044	0,063	2,34	0,0484	0,545	8B
0,0456	1,989	0,59	0,007	0,064	0,031	0,04	0,071	12,93	0,1137	1,204	9B
0,0255	5,140	0,75	0,012	0,079	0,024	0,067	0,091	16,52	0,1285	1,206	1C
0,0243	4,112	0,8	0,018	0,092	0,031	0,079	0,11	13,81	0,1175	1,01	2C
0,0163	3,366	0,69	0,016	0,07	0,012	0,074	0,086	9,253	0,0962	0,928	3C
0,0188	3,614	0,47	0,015	0,044	0,016	0,043	0,059	10,663	0,1033	1,203	4C
0,1143	3,285	0,71	0,054	0,096	0,107	0,043	0,15	33,31	0,1825	1,334	5C
0,0191	3,644	0,39	0,139	0,062	0,14	0,06	0,2	10,841	0,1041	0,658	6C ماربر
0,0183	9,03	0,45	0,141	0,073	0,141	0,073	0,214	19,3	0,139	0,85	7C
0,0398	2,442	0,57	0,041	0,065	0,059	0,047	0,106	13,53	0,1163	1,012	8C
0,0119	5,677	0,31	0,124	0,049	0,115	0,058	0,173	10,66	0,1032	0,702	9C
0,0132	5,173	0,3	0,159	0,05	0,152	0,057	0,209	10,707	0,1034	0,64	10C
0,0152	1,003	0,41	0,018	0,04	0,015	0,043	0,058	3,936	0,0627	0,735	11C
0,0025	2,624	0,18	0,037	0,025	0,016	0,046	0,062	2,277	0,0477	0,542	12C

$$F = \frac{U}{\sqrt{gh}} = \sqrt{\frac{8S_f}{f}} = f(S_f) \quad (12)$$

تحلیل معادله 10 نتایج مهمی را در ارتباط با اثرات متقابل فرایند سپرشدگی بستر و فاکتور اصطکاک عرضه می‌کند. به دلیل فرایند تشکیل لایه سپر، فاکتور اصطکاک مستقل از توزیع اندازه ذرات تشکیل دهنده بستر و حداکثر اندازه آن‌ها می‌شود و تنها پارامتر کنترل‌کننده آن شیب خط انرژی است. البته چون پارامتر شیلدز کنترل‌کننده فاکتور اصطکاک است، وزن مخصوص رسوبات نیز به عنوان فاکتور کنترل‌کننده دیگر شناخته می‌شود. نتایج مذکور بوسیله ارتباط فاکتور اصطکاک با آستانه حرکت و بازآرایی ذرات درشت‌دانه در پوشش سپر توضیح داده می‌شود. نتایج حاصل از داده‌های وسیع میدانی برای مطالعه آستانه

البته چنین توافق مناسبی میان دو روش، به طور قابل ملاحظه‌ای به اختلاف بین پارامتر شیلدز آستانه مقطع و میزان میانگین آن‌ها (0,01796) وابسته است. نکته حائز اهمیت در این معادلات، در نظرگیری غیریکنواختی جریان به صورت مستقیم با اعمال شیب خط انرژی (S_f) در معادله (10) و غیرمستقیم با به کارگیری مفاهیم مکانیک سیالات و قانون توزیع جهانی سرعت برای محاسبه سرعت برشی از نیم‌رخ سرعت (Yen, 2002) و اثر آن در محاسبه f برای تعیین f است. یکی دیگر از نتایج مهم حاصل از معادله (10) آن است که عدد فرود در کانال‌های عریض (عمق جریان=شعاع هیدرولیکی) و در دبی تشکیل‌دهنده پوشش سپر تابعی از فقط شیب سطح آب خواهد بود.

4-2- شرایط جریان در برآمدگی و فرورفتگی

شکل 3 طرح مسیر بازه‌های انتخابی در رودخانه‌های کاج و زاینده‌رود و شکل 4 نیم‌خ طولی آن‌ها را نشان می‌دهند. در انتهای پایین‌دست بازه رودخانه کاج، سطح بستر 2824 متر، در طول بازه 2822 متر و سرانجام در ابتدا نیز به 2820,5 متر می‌رسد. این موضوع نمایشگر ایجاد فرورفتگی در ابتدای بازه و برآمدگی در بخش مرکزی است. نیم‌رخ‌های سرعت مقاطع دارای فرورفتگی و برآمدگی این رودخانه در شکل 1 مشخص شده است. در رودخانه کاج مقطع 6B برآمدگی و مقطع 9B نمایانگر فرورفتگی هستند. اگرچه که بازه مورد نظر در رودخانه ماربر نیز دارای مقاطع فرورفتگی و برآمدگی است، ولی به دلیل تمرکز پژوهش در مورد فاکتور اصطکاک شکل بستر، شرایط متوسط جریان در مقیاس بازه‌های مورد نظر در عوض بررسی جزئی نیم‌رخ‌های سرعت در طول شکل بستر اعمال شده است و تنها توپوگرافی رودخانه کاج به عنوان نمونه در مقایسه با رودخانه زاینده‌رود آمده است. همان‌طور که از شکل 1 مشخص است، سرعت در فرورفتگی رشد سریع‌تری داشته و میانگین سرعت و تنش برشی در مقطع به ترتیب 1/204 متر بر ثانیه و 12,93 پاسکال است در حالی که در برآمدگی این مقادیر به ترتیب 0,932 و 8,65 بوده که نتیجه همگرایی جریان در فرورفتگی است (جدول 2). نتایج مذکور در مطالعات میدانی وجود فرضیه واژگونی سرعت¹ و اثرات مرتبط با رسوب آن را در بازه رودخانه کاج تأیید نمودند (فرضیه واژگونی سرعت بیان می‌کند که در جریان‌های کم برآمدگی‌ها دارای سرعت بالاتر و شیب سطح آب زیاد، در مقابل فرورفتگی‌ها دارای سرعت کمتر و شیب سطح آب نسبتاً کم می‌باشند که با افزایش جریان این تعریف برعکس می‌شود). قطر میانه ذرات رسوبی در مقطع برآمدگی 50 میلی‌متر و در فرورفتگی 17/5 میلی‌متر می‌باشند که گواه درستی ذرات برآمدگی نسبت به فرورفتگی است (جدول 1). این درستی ذرات در برآمدگی حاکی از فرسایش ذرات در مقطع فرورفتگی و رسوب آن‌ها در مقطع برآمدگی است که خود نتیجه همگرایی جریان

حرکت در زمانی که عدد رینولدز ذره بیش از 100 می‌باشد، نشان داده است که مقادیر زیادی از پارامتر شیلدز بحرانی در محدوده $0.03 < \tau_{*cr} < 0.06$ نیست، اگرچه رابطه مشخصی برای پارامتر شیلدز بحرانی در این محدوده مشخص شده است (Lamb et al. 2008). به دلیل آنکه آستانه حرکت ذرات در رینولدز مذکور مستقل از عدد رینولدز ذرات شده است، میزان ثابتی از پارامتر شیلدز بحرانی در مطالعات حاصل شد (0,01796). Graf and Suszka (1987) نیز نشان دادند که در زمان تجاوز عدد رینولدز ذره از 500، پارامتر شیلدز تنها به شیب بستر وابسته است. با توجه به عدد رینولدز ذره $(Re_* = U_* d_{50} / \nu)$ ، در ناحیه مستقل نمودار شیلدز، $\tau_{*cr} = \frac{\tau}{\gamma(SG-1)d_{50}}$ در رسوبات کاملاً کروی شکل به طور قابل ملاحظه‌ای پایین‌تر قرار می‌گیرد. محققین مختلف پارامتر شیلدز بحرانی در این حالت را 0,01 برآورد نمودند (Coleman, 1967; Fenton and Abbott, 1977). در تحقیق حاضر نیز تنها در 4 مقطع جریان از 24 مقطع داده‌برداری شده از سه رودخانه میزان پارامتر شیلدز بحرانی از 0,03 تجاوز کرده است. نتایج مشابهی در رودخانه Oak از ایالت Oregon به عنوان رودخانه‌ای چندساله با سطوح سپر توسعه یافته حاصل شده است. در این رودخانه کوهستانی با $d_{50s}/d_{50sub}=2.7$ در 66 اندازه‌گیری میدانی برای نرخ انتقال بار بستر تنها در 20 مورد آن پارامتر شیلدز آستانه از میزان 0,03 تجاوز نموده است. این موضوع نمایانگر تشکیل و توسعه لایه سپر با فرایند انتقال انتخابی ذرات می‌باشد زیرا در مقادیر پارامتر شیلدز آستانه کمتر از 0,03 تشکیل لایه سپر با انتقال ذرات ریزدانه به پایین‌دست غالب می‌شود و با ایجاد لایه سپر و توسعه آن بر فاکتور اصطکاک تأثیر می‌گذارد (Diplas, 1987). در رودخانه‌های درشت‌دانه، افزایش درستی لایه سپر و توسعه شکل‌های بستر خوشه‌ای، نه تنها سبب افزایش پایداری بستر و فاکتور اصطکاک خواهد شد بلکه به کاهش میزان تنش برشی آستانه می‌انجامد. در حقیقت ساختارهای خوشه، خود نمایانگر سطح بستر پایدار بوده و به صورت مستقیم با نگهداری ذرات در خوشه و یا غیرمستقیم با کاهش سطح تماس ذرات مجاور آن سبب پایداری بستر و مقاومت جریان می‌شوند (Hendrick et al. 2010).

¹ Velocity Reversal Hypothesis

همچنین مطابق جدول 2، دامنه تغییرات عدد رینولدز ذره و عدد فرود به ترتیب، $9.03 \times 10^3 < Re_* < 1 \times 10^3$ و $0.8 < F_r < 0.18$ هستند. مقادیر عدد رینولدز ذره نمایانگر شرایط جریانی بوده که سبب تنش برشی آستانه خواهد شد. این مورد (رینولدزهای زیاد) در رودخانه‌های درشت‌دانه و جریان آشفته معمول بوده که سبب استقلال آستانه حرکت ذرات از عدد رینولدز ذره شده و در نتیجه نقش کنترلی آن در تخمین فاکتور اصطکاک مورد نظر قرار نمی‌گیرد (Yen, 1991).

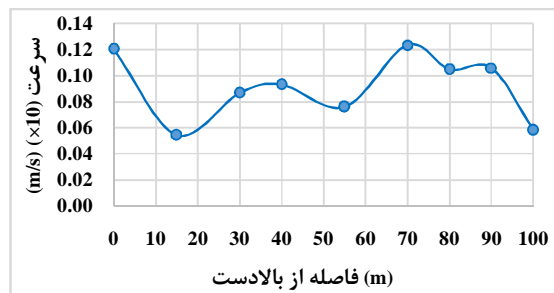
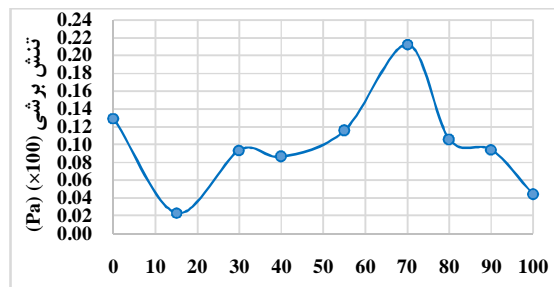
4-3- اثر توسعه لایه سپر بر فاکتور اصطکاک

ذرات بستر گاه‌ها دارای توزیع عمودی متفاوتی می‌باشند که وابسته به تأمین رسوبات قابل انتقال در بستر جریان، توزیع اندازه ذرات بستر و شرایط هیدرولیکی جریان است. با کاهش تأمین رسوبات از بالادست، لایه سپر بزرگتر می‌شود تا اینکه به حداکثر حالت درشتی خود برسد. این حالت در نرخ d_{50s}/d_{50sub} بیشتر از 7/5 مشاهده شده است. همچنین این شرایط سبب توسعه خوشه‌ها و ساختارهای وابسته می‌شود و به پایداری بستر در مقابل فرسایش کمک می‌کند (Church and Hassan, 2002). درجه سپرشدگی بستر با نرخ d_{50s}/d_{50sub} مشخص می‌شود. لایه سپر در جریان‌هایی که توانایی انتقال ذرات با میزان تأمین رسوبات در یک بازه معادل باشند، کمتر شکل می‌گیرد. این امر در رودخانه‌های شریانی معمول است. در این شرایط اندازه ذرات لایه سطحی و زیرسطحی تقریباً یکسان هستند ($d_{50s}/d_{50sub}=1$). زمانی که توانایی انتقال ذرات از میزان تأمین رسوبات فراتر رود، لایه سپر تشکیل شده که این شرایط در رودخانه‌های درشت‌دانه شنی-سنگی متعدد دیده می‌شود ($1 < d_{50s}/d_{50sub} < 3$). رودخانه‌های کوهستانی با توانایی انتقال زیاد و فقدان تأمین رسوب سبب تشکیل لایه سپری شده که تنها توسط سیلاب‌های بزرگ منطقه دچار تخریب می‌شود (Constantinescu et al. 2016) ($d_{50s}/d_{50sub} \geq 3$).

بر این اساس، تحلیل شرایط بسترهای رسوبی متفاوت سه رودخانه مجزا حاکی از آن بود که تمامی مقاطع مورد بررسی در این پژوهش در دسته رودخانه‌های سپر شده

در رودخانه کاج و تأیید فرضیه واژگونی سرعت است (اخروی و همکاران، 1392). البته همواره برآمدگی‌ها درشت‌دانه‌تر از فرورفتگی‌ها نیستند و محققین مختلف ادعان نمودند که پدیده واژگونی سرعت در هر دبی جریانی قابل مشاهده است و لزوماً در دبی‌های بالا اتفاق نمی‌افتد (Carling, 1991; Oreizi et al. 2014).

نیم‌رخ طولی تغییرات سرعت و تنش برشی در بازه رودخانه کاج در شکل 5 نیز حاکی از وجود حداکثر سرعت و تنش برشی در ابتدای بازه (منطقه فرورفتگی-9B) در جریان بالا است؛ اگرچه سرعت و تنش برشی به علت ارتفاع سطح آب کم در فاصله 70 متری از ابتدای بازه (منطقه برآمدگی) در جریان پایین نیز رخ داده است. بنابراین افزایش و کاهش جریان تأثیر بالایی بر شرایط هیدرولیکی در مناطق برآمده و فرورفته و در نتیجه فرضیه واژگونی سرعت دارد. به دلیل پیچان رودی بودن رودخانه کاج و قرارگیری توالی برآمدگی و فرورفتگی‌ها (شکل 3)، در تمامی تحلیل‌های صورت گرفته شرایط متوسط بازه مورد بررسی قرار گرفته است. مشاهدات میدانی نشان داده است که کمترین تنش برشی در نزدیکی سواحل رودخانه به خصوص در نواحی عمیق بازه ایجاد شده است.



شکل 5 نیم‌رخ طولی تغییرات تنش برشی و سرعت در رودخانه کاج

به عنوان نمونه مقطع 1A با $d_{50s}/d_{50sub}=3.59$ و $d_{max}/d_{50s}=6.3$ تقریباً به حد آستانه بستر سپر شده رسیده است. چنین شرایطی به دلیل قرارگیری مقطع در بازه پایین‌دست رودخانه سد زاینده‌رود و در شرایط تأمین رسوب بسیار کم بالادست شکل گرفته است. در این حالت بستر دارای درجه پایداری بالایی می‌باشد.

(Strom et al., 2004) اثرات وجود شکل‌های بستر خوشه را بر انتقال رسوبات و مقاومت جریان بررسی نموده است و نشان داد که این خوشه‌ها ممکن است با فرسایش بستر در حاشیه آن‌ها به تدریج فروپاشیده شوند. در این حالت ذره درشت منفرد به سمت پایین‌دست حرکت کرده و در نقطه‌ای دیگر ثابت می‌شود تا فرایند مذکور دوباره تکرار شود. بنابراین ارتباط متقابل شرایط هیدرولیکی جریان و انتقال رسوبات به صورت مستقیم و غیرمستقیم بر فاکتور اصطکاک جریان مؤثر واقع می‌شود. تحلیل این موضوع با ارتباط میان نرخ انتقال رسوب و تنش برشی بستر توضیح داده شد. مشاهدات میدانی و آزمایشگاهی نشان داده است که لایه سپر در طول تنش برشی بستر کم و یا متوسط و در رودخانه‌های درشت‌دانه شنی-سنگی ایجاد می‌شود (Diplas, 1987). نتایج تحقیق حاضر نشان داد که تنش برشی آستانه با تشکیل و توسعه لایه سپر، افزایش و کاهش قدرت اتصال ذرات بستر و افزایش و کاهش خوشه‌ها دچار تغییر می‌شود. با توسعه لایه سپر و افزایش زبری بستر، فاکتور اصطکاک افزایش و سرعت متوسط جریان کاهش می‌یابد که نتیجتاً به کاهش تنش برشی مرزی بستر و تغییر شرایط آستانه تنش شیلدز می‌انجامد. سرانجام کاهش تنش برشی با افزایش درجه آزادی به منظور ایجاد تعادل در میزان انتقال رسوبات ریزدانه و درشت‌دانه در راستای پایداری بستر عمل می‌کند.

نتایج جدول 2 نشانگر توافق مناسب (تقریباً 80 درصد) بین روش کلگان (1) با اعمال عمق جریان و اندازه ذره و روش پارامتر شیلدز (2) با اعمال شیب سطح آب برای محاسبه فاکتور اصطکاک ذره است. این نتایج در قالب مقایسه آماری فاکتور اصطکاک شکل بستر بدست آمده از روش توسعه یافته با پارامتر شیلدز و روش کلگان نیز قابل تفسیر است. مطابقت 80 درصدی مقادیر (f') محاسبه شده توسط دو روش مذکور در قالب ضریب همبستگی

قرار می‌گیرند و از 24 مقطع موجود در جدول 2، 21 مقطع در دسته دوم تقسیم‌بندی بالا و 3 مقطع در دسته سوم قرار می‌گیرد. علاوه بر این با توجه به تعریف غیریکنواختی توزیع ذرات بستر ($>1.4\sigma$) و دامنه تغییرات انحراف معیار هندسی ذرات ($1.09 < \sigma < 2.18$)، نتایج نشان داد که 75 درصد مقاطع بررسی شده دارای توزیع ذرات غیریکنواخت هستند که بیانگر اثر متقابل جریان و رسوبات می‌باشند. رودخانه‌های کاج و ماربر از رودخانه‌های کوهپایه‌ای بوده که به دلیل وجود غالب شکل‌های بستر برآمدگی و فرورفتگی و شرایط هیدرولیکی جریان مشابه برای بررسی فاکتور اصطکاک شکل بستر انتخاب شدند در حالی که؛ بازه مورد نظر در رودخانه زاینده‌رود به دلیل شرایط جریان پس از سد زاینده‌رود و توسعه لایه سپر و بسیار درشت‌دانه و ساختارهای خوشه‌ای متعدد، شرایط متفاوتی را عرضه می‌کند (شکل 6). این موضوع در مقادیر بالای d_{max}/d_{50s} در رودخانه زاینده‌رود نسبت به سایر مقاطع در رودخانه‌های کاج و ماربر قابل مشاهده است.

در رسوبات غیریکنواخت با ترکیبی از ذرات درشت‌دانه و ریزدانه، پایداری ذرات بزرگ و تعداد آن‌ها در بستر تعیین‌کننده تشکیل لایه سپر پایدار خواهد بود. حذف ذرات ریز از بستر سبب افزایش سطح تماس ذرات درشت منفرد با جریان می‌شود. این پدیده سبب تشکیل گودال فرسایش در جلوی ذره درشت منفرد و رسوب ذرات ریزتر در پشت آن خواهد شد. سپس ذره بزرگ منفرد به داخل گودال فرسایشی لغزیده و با کاهش سطح تماسش با جریان میزان پایداری بالاتری را دریافت می‌کند. با تجمع ذرات متوسط و ریزتر در اطراف آن، شکل خوشه‌های ذرات با اندازه‌های متنوع تشکیل می‌شود.



شکل 6 بستر سپر شده با ساختارهای خوشه‌ای در زاینده‌رود

در این مطالعه حدود 40 می‌باشد. بنابراین عدم در نظرگیری فاکتور اصطکاک شکل بستر رودخانه‌های درشت‌دانه در میزان کل فاکتور اصطکاک سبب ورود خطای زیادی در تخمین سرعت متوسط جریان خواهد شد.

5- نتیجه‌گیری

ساختار بستر جریان، قدرت جریان یا تنش برشی بستر و فرایند انتقال رسوب بار بستر در رودخانه‌های آپرفتی و یا شنی-سنگی به یکدیگر مرتبط می‌باشند و از اهمیت بالایی در برنامه‌های مدیریتی رودخانه برخوردار هستند. از این نظر فاکتور اصطکاک با در نظرگیری برهمکنش‌های مذکور نقش بنیادی در تحلیل و طراحی‌های هیدرولیکی ایفا می‌کند.

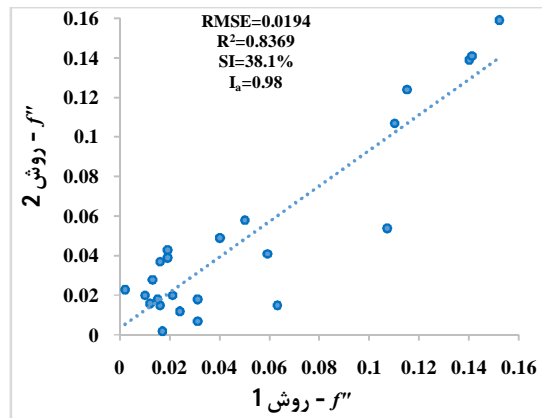
با توجه به غیرقابل اعتماد بودن تعیین فاکتور اصطکاک جریان در رودخانه‌های درشت‌دانه دارای شکل بستر، با استفاده از مفهوم پارامتر شیلدز و با در نظرگیری اثرات توسعه لایه سیر، معادله‌ای برای محاسبه فاکتور اصطکاک ذره (معادله 10) بدست آمد. نتایج محاسبات فاکتور اصطکاک شکل بستر از دو روش کلگان (1) و پارامتر شیلدز (2) حاکی از توافق مناسب (حدود 80 درصد) دو روش و تأیید کارایی معادله حاصل بود و اختلافات موجود را می‌توان در خطاهای اندازه‌گیری و اثرات ناشناخته‌ای نظیر، شکل و جهت قرارگیری ذرات جستجو نمود. همچنین درصد تأثیر بالای فاکتور اصطکاک شکل بستر در این مطالعه (حدود 40)، حاکی از تأثیر غیرقابل انکار شکل بستر بر مقاومت جریان است.

معادله (10) بر پایه اثرات فرایند سپردگی بستر بر فاکتور اصطکاک توسعه یافته است. نتایج این بررسی نشان داد که فاکتور اصطکاک ذره تنها به شیب بستر یا شیب خط انرژی و وزن مخصوص رسوبات وابسته است و مستقل از توزیع اندازه ذرات تشکیل‌دهنده بستر و حداکثر اندازه آن‌ها است. توضیح فیزیکی برای ورود پارامتر شیب در فاکتور اصطکاک ذره را می‌توان به علت تغییرات در شکل بستر رودخانه عنوان نمود که معمولاً در حال حرکت به سمت بالادست رخ می‌دهند.

در شکل 7 نشان داده شده است. علاوه بر این، محاسبه نمایه‌های تعیین کننده میزان اختلاف بین دو روش مانند خطای جذر میانگین مربعات (RMSE=0.0194)¹، نمایه پخشیدگی (SI=38.1%)² و نمایه میزان توافق (I_a=0.98)³ نیز گواه توافق بالای دو روش مذکور است (شاخص‌های مذکور در بخش فهرست علائم ارائه شده است). بر این اساس، وجود میزان خطای پایین، میزان پخشیدگی کم و درصد توافق بالای داده‌های بررسی شده در شکل 7 نشانگر آن است که تخمین فاکتور اصطکاک شکل بستر از روش پارامتر شیلدز دارای عملکرد مناسبی می‌باشد.

شایان ذکر است که روش پارامتر شیلدز از لحاظ تئوری نیز کارایی بالاتری دارد زیرا علاوه بر در نظرگیری تغییرات غیریکنواختی جریان، همزیستی جریان و لایه سیر را نیز در محاسبه فاکتور اصطکاک ذره و در نتیجه فاکتور اصطکاک شکل بستر وارد می‌کند. اگرچه شایان ذکر است که معادله کلگان از نقطه نظر مهندسی بسیار کاربردی است.

نتایج حاکی از مقادیر بالای فاکتور اصطکاک شکل بستر در بعضی از مقاطع جریان نظیر 2A، 4B، 5B، 7B، 8B، C6، C7، C9، 2A، C10 و C12 بوده و نمایانگر اهمیت بالای این پارامتر است.



شکل 7 مقایسه فاکتور اصطکاک شکل بستر از دو روش

به طور میانگین درصد تأثیر فاکتور اصطکاک شکل بستر

¹ Root Mean Square Error

² Scatter Index

³ Index of Agreement

U	سرعت متوسط جریان
U_*	سرعت برشی متوسط جریان
U_1	سرعت جریان در 20 درصد عمق
U_2	سرعت جریان در 80 درصد عمق
y_1	طول عمودی 20 درصد عمق جریان
y_2	طول عمودی 80 درصد عمق جریان
γ_s	وزن مخصوص رسوب
τ_{*cr}	پارامتر شیلدز بحرانی
γ	وزن مخصوص آب
κ	ثابت جهانی ون کارمن
ρ	چگالی آب
$\sigma = \sqrt{(d_{84}/d_{16})}$	انحراف معیار هندسی توزیع اندازه ذرات
τ	متوسط تنش برشی بستر
v	لزجت سینماتیکی آب

7- منابع

اخروی، س.س.، افضل‌مهر، ح.، نظیری، د. و شهرکی، ن. (1392). "ویژگی‌های پروفیل سرعت در توالی برآمدگی و فرورفتگی‌ها- منطقه مورد مطالعه: اردل از توابع شهرکرد". دوازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، تهران.

Acaroglu, E.R. (1972). "Friction factors in solid material systems". J. Hydr. Div. 98(HY4), 681-699.

Ackers, P. and White, W.R. (1973). "Sediment transport: New approach and analysis." J. Hydr. Div. 99(HY11), 2041-2060.

Afzalimehr, H. (2010). "Effect of flow non-uniformity on velocity and turbulence intensities in flow over a cobble-bed". Hydrol. Process. 24, 331-341.

Afzalimehr, H., Singh, V.P. and Fazel Najafabadi, E. (2010). "Determination of Form Friction Factor". J. Hydrol. Eng. 15(3):237-243.

Billi, P. (1988). "A note on cluster bedform behaviour in a gravel-bed river". Catena. 15(5):473-481.

Brayshaw, A.C., Frostick, L.E. and Reid, I. (1983). "The hydrodynamics of particle clusters and sediment entrainment in coarse alluvial channels". Sedimentology. 30(1):137-143.

Bathurst J.C. (2002). "At-a-site variation and minimum flow resistance for mountain rivers". J. Hydrol. 269, 11-26.

Brownlie, W.R. (1983). "Flow depth in sand-bed

نتایج اندازه‌گیری‌ها نیز نشان داد که پارامتر شیلدز آستانه اندازه زبری مؤثر (d_{50}) تقریباً ثابت است (0,01796) زیرا با تشکیل و توسعه لایه سپر و افزایش زبری بستر، فاکتور اصطکاک افزایش و سرعت متوسط جریان کاهش می‌یابد که نتیجتاً رودخانه برای ایجاد تعادل درجه آزادی بستر را برای فرسایش افزایش می‌دهد که این سبب کاهش تنش برشی مرزی بستر و تغییر در پارامتر شیلدز آستانه بستر می‌شود. داده‌های موجود در این پژوهش برای توسعه و تحلیل معادلات، دامنه وسیعی از دبی، عمق، شیب و زبری مؤثر ذرات را پوشش می‌دهند.

6- فهرست علائم

C	ضریب شزی
d_{50}	قطر میانه ذرات
d_{50s}	قطر میانه ذرات لایه سطحی بستر
d_{50sub}	قطر میانه ذرات لایه زیرسطحی بستر
d_{90}	اندازه ذره‌ای است که 90 درصد ذرات از آن کوچکترند
d_{max}	بزرگترین اندازه ذره بستر
dh/dx	تغییرات سطح آب در یک بازه
Fr	عدد فرود جریان
f	فاکتور اصطکاک کل
f'	فاکتور اصطکاک ذره
f''	فاکتور اصطکاک شکل بستر
g	شتاب گرانش
h	عمق جریان
$I_a = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_{o,i} - x_{m,i})^2}{\sum_{i=1}^n (x_{o,i} - \bar{x}_{o,i} + x_{m,i} - \bar{x}_{m,i})^2}$	نمایه میزان توافق
k_s	زبری مؤثر نیکوردازه
n	ضریب مانینگ
R	شعاع هیدرولیکی جریان
$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{obs,i} - x_{model,i})^2}{n}}$	خطای جذر میانگین مربعات
$Re_* = (U_* d_{50}/v)$	عدد رینولدز ذره
S_f	شیب خط انرژی
S	شیب بستر
$Sg = \frac{\gamma_s}{\gamma} = 2.65$	وزن مخصوص نسبی
$SI = 100 \frac{\sqrt{(1/n) \sum_{i=1}^n (x_{o,i} - x_{m,i})^2}}{\bar{x}_{o,i}}$	نمایه پخشیدگی

- movement of loosely packed gravel in a tidal channel". *J. Sedimentology*, 31:51-62.
- Hendrick, R.R., Lisa, L. and Papanicolaou, A.N. (2010). "The role of hydrologic processes and geomorphology on the morphology and evolution of sediment clusters in gravel-bed rivers". *Geomorphology*, 114:483-496.
- Jarrett, R. D. (1991). "Hydraulic of mountain rivers". *Channel flow resistance: Centennial of Manning's formula*, B. C. Yen, ed., Water Resources, Littleton, Colo., 287-298.
- Julien P.Y. (1995). "*Erosion and Sedimentation*". Cambridge University Press, UK.
- Julien, P.Y., Klaassen, G.J., Ten Brinke, W.B.M. and Wibers, A.W.E. (2002). "Case study: Bed resistance of Rhine river during 1008 flood". *J. Hydraul. Eng.* 128(12):1042-1050.
- Keulegan, G. H. (1938). "Laws of turbulent flow in open channel". *J. Res. Natl. Bur. Stand.* 1151(21): 707-741.
- Knighton, D.A. (1998). "*Fluvial forms and processes: a new perspective*". Arnold, London.
- Lamb, M.P. Dietrich, W.E. and Venditti, J.G. (2008). "Is the critical Shields stress for incipient sediment dependent on channel-bed slope? ". *J. Geophy. Res.* 113, F02008.
- Meyer-Peter, E. and Muller, R. (1948). "Formulas for bed-load transport". *Proc., 3rd Meeting of IAHR, Stockholm, Sweden*, 39-64.
- Namaee, M.R., Sui, J. and Whitcombe, T. (2017). "A revisit of different models for flow resistance in gravel-bed rivers and hydraulic flumes". *Intl. J. River Basin Management.* 15(3):277-286.
- Oreizi, Z., AfzaliMehr, H., Singh, V.P. and Okhravi, S.S. (2014). "Investigation of Particle-Size Distribution and Friction Factor for a Gravel-Bed river: Marbar". *J. River Eng.* 2(3):1-38.
- Petit, F. (1989). "The evaluation of grain stress from experiments in a pebble-bedded flume". *Earth Surf. Processes Landforms*, 14:499-508.
- Prestegard, K.L. (1983). "Bar resistance in gravel bed streams at bankfull stage". *Water Resour. Res.* 19:472-476.
- Proffitt, G.T. (1980). "Selective transport and armoring of nonuniform alluvial sediments," thesis presented to the University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy.
- channels". *J. Hydraul. Eng.* 109(7):959-990.
- Carling, P.A. (1991). "An appraisal of the velocity-reversal hypothesis for stable pool-riffle sequences in the river severn, England". *Earth Surf. Processes Landforms.* 16(1):19-31.
- Church, M. and Hassan, M.A. (2002). "Mobility of bed material in Harris Creek". *Water Resour. Res.* 38(11):1237, doi:10.1029/2001WR000753.
- Coleman, N.L. (1967). "A theoretical and experimental study of drag and lift forces acting on a sphere resting on a hypothetical stream bed". *Proc., 12th Congress of the Int. Association for Hydraulic Research, Vol. 3, Fort Collins, Colo.,* 185-192.
- Constantinescu, G., Garcia, M. and Hanes, D. (2016). *River Flow*. ISBN 9781138029132- CAT# K27572.
- Dey, S. (2014). "*Fluvial hydrodynamics (hydrodynamic and sediment transport phenomena)*". Springer, pp. 508-511.
- Diplas, P. (1987). "Bed load transport in gravel-bed streams". *J. Hydraul. Eng.* 113(3):277-291.
- Fedele, J.J. and Garcia, M.H. (2001). "Alluvial roughness in streams with dunes: A boundary-layer approach". *River, coastal and estuarine morphodynamics*, G. Seminara and P. Blondeaux, eds., Springer, Berlin, 37-60.
- Fenton, J.D. and Abbott, J.E. 1977. "*Initial movement of grains on a stream bed: The effect of relative protrusion*". *Proc. R. Soc. London, Ser. A,* 352, 523-537.
- Froehlich, D.C. (1995). "Armor-limited clear-water contraction scour at bridges". *J. Hydraul. Eng.* 21(6):490-493.
- Garcia, M.H. (2008). "*Section 2: Sediment transport and morphodynamics*". ASCE manual of practice 110: Sedimentation engineering, M. H. Garcia, Reston, Va., 2.21-2.63.
- Gessler, J. (1990). "Friction factor of armored river beds". *J. Hydraul. Eng.* 116(4):531-542.
- Graf, W.H. and Suszka, L. (1987). "Sediment transport in steep channels". *J. Hydrosoci. Hydr. Eng.* 5(1):11-26.
- Griffiths, G.A. (1989). "Flow resistance in gravel channels with mobile beds". *J. Hydraul. Eng.* 115(3):340-355.
- Hammond, F.D., Heathershaw, A.D. and Langhorne, D.N. (1984). "A comparison between shields threshold criterion and the Henderson

- Wolman, M.G. (1954). "A method of sampling coarse river-bed material". EOS, Transactions American Geophysical Union 35, 951-956.
- Yalin, M.S. (1972). *Mechanics of sediment transport*, 2nd Ed., Pergamon, Oxford, N.Y.
- Yen B. C. (2002). "Open channel flow resistance". J. Hydraul. Eng. 128:20-39.
- Yen, B.C. (1991). "Hydraulic resistance in open channels". *Channel flow resistance: Centennial of Manning's formula*, B. C. Yen, ed., Water Resource, Highlands Ranch, Colo., 1-135.
- Yang, S.-Q., Tan, S.-K. and Lim, S.-Y. (2005). "Flow resistance and bed form geometry in a wide alluvial channel". Water Resour. Res. 41, W09419, doi:10.1029/2005WR004211
- Robert, A. (1997). "Characteristics of velocity profiles along riffle-pool sequences and estimates of bed shear stress". J. Geomorphology, 19,89-98.
- Simons, D.B. and Richardson, E.V. (1966). "Physiographic and hydraulic studies of rivers: resistance to flow in alluvial channels". U. S. Geol. Surv, Page, 422-J.
- Strom, K., Papanicolaou A.N., Evangelopoulos, N. and Odeh, M. (2004). "Microforms in gravel bed rivers: formation, disintegration, and effects on bed load transport". J. Hydraul. Eng. 130(6):554-567.
- Van Rijn, L.C. (1982). "Equivalent roughness of alluvial bed". J. Hydr. Div., 108HY10, 1215-1218.
- Van Rijn, L.C. (1984). "Sediment transport. Part III: Bed forms and alluvial roughness". J. Hydraul. Eng. 110(12): 1733-1754.