

## اثرات فرآیند توسعه لایه سپر بر مقاومت جریان در رودخانه‌های درشت‌دانه

سید سعید اخروی<sup>۱</sup> و سعید گوهری<sup>۲</sup>

تاریخ ارسال: ۱۳۹۶/۰۷/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۱۵

مقاله: پژوهشی-کاربردی

### چکیده

در رودخانه‌های درشت‌دانه فاکتور اصطکاک به عنوان نمایه مقاومت جریان، وابسته به اندازه ذرات و شکل بستر است. وجود دامنه وسیعی از اندازه‌های ذرات در این رودخانه‌ها سبب توسعه لایه سپر و ساختارهای خوشه ذرات شده که اثرات قابل توجهی بر فاکتور اصطکاک دارند. در این مطالعه به بررسی اثرات ارتباط فیزیکی بین فرآیند سپرشدگی بستر و فاکتور اصطکاک به دلیل لایه سپر پرداخته شده است. بدین منظور با لحاظ نمودن ویژگی‌های قانون لگاریتمی توزیع سرعت، فاکتور اصطکاک کل تعیین شد. سپس فاکتور اصطکاک ذره با روش‌های کلگان و پارامتر شیلدز محاسبه شد و نتایج حاصل مورد مقایسه قرار گرفت. در پایان فاکتور اصطکاک ناشی از شکل بستر از تفریق فاکتور اصطکاک ذره از کل بدست آمد. تحلیل نتایج نشان داد که فاکتور اصطکاک مستقل از توزیع ذرات تشکیل‌دهنده بستر بوده و پارامتر اصلی کنترل‌کننده آن شیب خط انرژی است. این نتایج غیرقابل انتظار حاصل از ارتباط فاکتور اصطکاک با آستانه حرکت و بازآرایی ذرات درشت‌دانه در پوشش سپر می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که تشکیل و توسعه لایه سپر همراه با ایجاد خوشه ذرات با افزایش زبری نسبی بستر و کاهش استغراق نسبی جریان سبب افزایش میزان مقاومت جریان و پایداری بستر می‌شود. مشاهدات میدانی حاکی از تغییر شرایط آستانه تنش شیلدز در رودخانه‌های درشت‌دانه به منظور ایجاد تعادل در نرخ انتقال ذرات درشت و ریز می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: استغراق نسبی، پارامتر شیلدز، لایه سپر، فاکتور اصطکاک، مقاومت جریان

۱- دانشجوی دکتری مهندسی سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان، همدان، ایران،

S.okhravi94@basu.ac.ir ، ۰۹۱۳۱۸۶۴۱۴۹

۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان، همدان، ایران، ۰۹۱۲۶۳۳۵۲۹۱، [S.gohari@basu.ac.ir](mailto:S.gohari@basu.ac.ir)

(مسئول مکاتبه)

## مقدمه

به علت شهرنشینی و توسعه امکانات تفریحی در سال‌های اخیر در مناطق کوهستانی، بازسازی رودخانه‌ها در این مناطق توجه مهندسين هیدرولیک را به خود جلب کرده است. رودخانه‌های این مناطق به رودخانه‌هایی با جریان آشفته و سرعت زیاد، بستر نامنظم همراه با ذرات درشت‌دانه شناخته می‌شوند. رودخانه‌های کوهستانی عموماً دارای پروفیل‌های طولی نامنظم، توپوگرافی متغیر کانال و مقاومت هیدرولیکی زیاد و بسیار متغیر هستند. سطوح بستر این رودخانه‌ها گاهی به صورت انباشت رسوبات خوشه‌ای بوده و همراه با محیط فیزیکی متغیر این مناطق، دارای پیامدهای مستقیم بیولوژیکی هستند به طوری که حیوانات آبی در هر مرحله از زندگی خود ترجیح به استفاده از رسوبات خاص با اندازه‌های مختلف و رژیم‌های هیدرولیکی خاص رودخانه را دارند (Buffington and Montgomery, 1999).

برخلاف ویژگی‌های بستر در رودخانه‌های بستر ماسه‌ای، رودخانه‌های بستر شنی-سنگی (رودخانه‌های درشت‌دانه با دامنه وسیعی از اندازه ذرات) از درجه پیچیدگی بالاتری در طبیعت برخوردارند. رودخانه‌های بستر ماسه‌ای عموماً تشکیل یافته از دامنه کوچکی از اندازه ذرات هستند درحالی که، رودخانه‌های شنی سنگی دامنه وسیعی از اندازه ذرات اعم از ماسه ریزدانه، سنگ‌های بزرگ و حتی تخته‌سنگ را پوشش می‌دهند. با توجه به نرخ زمانی انتقال رسوبات غیریکنواخت و با در نظرگیری مفهوم انتقال انتخابی بخشی از ذرات رسوب در اثر جریان مشخص، زمانی که میزان انتقال ذرات بستر از میزان رسوبات وارد شده توسط جریان بیشتر شود، رسوبات سطحی بستر شروع به فرسایش خواهند کرد. در نتیجه ذرات ریزدانه با سرعت بالاتری نسبت به ذرات درشت‌دانه منتقل می‌شوند و ذرات باقی‌مانده معمولاً دارای اندازه بزرگی خواهند بود. فرآیند درشت شدن ذرات بستر زمانی متوقف می‌شود که لایه کاملی از ذرات درشت‌دانه سطح بستر را پوشانده باشند و از انتقال ذرات ریزدانه مدفون جلوگیری کنند.

بستر جریان در این حالت به مانند بستری زره شده از ذرات درشت تبدیل می‌شود که به آن لایه سپر گفته می‌شود. ضخامت لایه سپر در طبیعت یک تا سه برابر اندازه متوسط ذرات آن لایه است (Froehlich, 1995). این سطوح درشت‌دانه در قالب لایه سپر ایستا و متحرک دسته‌بندی می‌شوند. لایه سپر ایستا با انتقال تنها ذرات ریزتر توسط جریان و در حالت فقدان تأمین رسوب از بالادست، تشکیل می‌شود (Church et al., 1998). این حالت معمولاً در بازه‌های رودخانه‌های پایین‌دست دریاچه و یا سد رخ می‌دهد. در حالی که، لایه سپر متحرک، زمانی تشکیل شده که مخلوط رسوبات با دانه‌بندی متنوع از بالادست تأمین شوند. جداسازی سینماتیکی و یا نفوذ ذرات ریزتر به داخل بستر عامل اصلی درشت شدن سطح بستر در سپر متحرک می‌باشد (Mao et al., 2011). Strom et al. (2004) اثرات ساختارهای کوچک مقیاس شکل بستر در رودخانه‌های درشت‌دانه نظیر خوشه‌ها (سنگ بزرگ منفرد احاطه شده با ذرات ریزتر) بر انتقال رسوبات و مقاومت جریان را بررسی نمودند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که ساختارهای خوشه‌ای به صورت مستقیم با نگهداری ذرات در خوشه و یا غیرمستقیم با کاهش سطح تماس ذرات مجاور آن سبب پایداری بستر می‌شوند. محققین مختلف سعی بر تخمین کمی ویژگی‌های رودخانه‌های کوهستانی اعم از توزیع مکانی دبی جریان، قدرت جریان، هندسه کانال پایین‌دست، ریخت‌شناسی کانال و آستانه حرکت رسوبات آن‌ها را داشته‌اند (Dey and Kumar, 2002; Sui et al., 2010). در حالی که هنوز محاسبه مقاومت جریان به عنوان متغیر اثرگذار به عنوان چالشی در رودخانه‌های درشت‌دانه باقی مانده است. دلیل این امر را می‌توان در ریخت‌شناسی متغیر کانال با اندازه زبری و شرایط هیدرولیکی این گونه رودخانه‌ها جستجو نمود.

بر اساس تحقیقات بنیادی، استفاده از ضریب اصطکاک داری-ویسباخ در کانال‌های روباز برای نمایش مقاومت جریان پیشنهاد شده است (Namaee et al. 2017). محاسبه فاکتور اصطکاک داری-ویسباخ

لگاریتمی دارای کم برآورد هستند. علاوه بر این، روابط موجود برای تعیین فاکتور اصطکاک میزان دبی سیلاب را در رودخانه‌های درشت‌دانه تا ۱۰۰ 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. بدین دلیل تخمین فاکتور اصطکاک تنها با استفاده از اصطکاک ناشی از ذرات غیرقابل اعتماد است. با توجه به مطالب پیشین، فاکتور اصطکاک را می‌توان به دو بخش تقسیم نمود (Yen, 1991).

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

در معادله ۱،  $f'$  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 (Van Rijn, 1982).

با توسعه مفهوم قانون لگاریتمی توزیع سرعت (قانون دیوار)، امکان ایجاد روش‌های پیچیده براساس اندازه‌گیری توزیع سرعت به منظور تخمین فاکتور اصطکاک در طول رودخانه فراهم شده است. این تحقیق

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = \Phi_1(F_r, F_p, Re^*, \frac{h}{d_{84}}, \eta, N) \quad (3)$$

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 معضل بزرگی برای دانشمندان و مهندسين امر می‌باشد. به همین دلیل مدلسازی جریان با استفاده از مدل مقاومت جریان صورت می‌گیرد. 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. 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). از شکل‌های بستر رایج در رودخانه‌های با بستر شنی-سنگی، برآمدگی و فرورفتگی‌ها هستند. نتایج تحقیقات بر فاکتور اصطکاک در توالی برآمدگی و فرورفتگی‌ها نشان از اثر مستقیم نوسانات بستر بر ضریب اصطکاک می‌باشد (Griffiths, 1989).

به طور کلی دو نوع از معادلات برای مقاومت جریان بر پایه مشاهدات میدانی و آزمایشگاهی شکل گرفته است. اولین نوع آن به صورت نیمه تحلیلی و بر پایه تئوری لایه مرزی بوده (نیمه لگاریتمی) و دومین نوع به صورت کاملاً تجربی و بر اساس رگرسیون (قانون et al., 2016) شکل گرفته است (Constantinescu). اگرچه معادلات نیمه لگاریتمی مقاومت جریان برای تخمین سرعت متوسط جریان در زبری کوچک مقیاس ( $h/d_{84} > 4$ ) قابل کاربرد است ولی برای زبری بزرگ مقیاس ( $h/d_{84} < 1.4$ ) کارایی ندارد ( $h$  عمق جریان و  $d_{84}$  اندازه ذره‌ای است که ۸۴ درصد ذرات از آن کوچکترند). همچنین تحلیل‌های رگرسیونی در تخمین سرعت دارای بیش برآورد و معادلات

<sup>1</sup>Semi-logarithmic equations

<sup>2</sup>Power-law equations

<sup>3</sup>Law of the wall

با اهداف (۱) بررسی ارتباط فیزیکی بین فرآیند سپردگی بستر و فاکتور اصطکاک به دلیل لایه سپر و (۲) بهبود دقت تعیین فاکتور اصطکاک شکل بستر در رودخانه‌های درشت‌دانه با استفاده از پروفیل‌های سرعت، صورت گرفته است. بر این اساس، در ابتدا با استفاده از ویژگی‌های قانون دیوار به محاسبه فاکتور اصطکاک کل در رودخانه‌های درشت‌دانه سپر شده در حضور شکل بستر پرداخته شده است. سپس اثرات متقابل فرآیند توسعه لایه سپر با فاکتور اصطکاک جریان در رودخانه‌های درشت‌دانه بررسی می‌شود. سرانجام نتایج حاصل از فاکتور اصطکاک ذره و شکل بستر بدست آمده از دو روش کلگان<sup>۱</sup> و پارامتر شیلدز<sup>۲</sup> مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

## روش تحقیق

### تعیین فاکتور اصطکاک کل

سه رابطه کاربردی برای نمایش ارتباط سرعت و فاکتور اصطکاک شامل معادلات شزی، مانینگ و دارسی-ویسباخ می‌باشند (معادله ۲)، اما فقط ضریب اصطکاک دارسی-ویسباخ به صورت بدون بعد بوده و به همین دلیل در تحقیقات بیشتر مورد بررسی قرار گرفته است.

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

در معادله ۲،  $U$  سرعت متوسط جریان،  $C$  ضریب شزی،  $n$  ضریب مانینگ،  $f$  فاکتور اصطکاک دارسی-ویسباخ،  $S$  شیب بستر،  $R$  شعاع هیدرولیکی و  $g$  شتاب گرانش است. در این رابطه،  $\sqrt{gRS}$  دارای بعدی همانند سرعت است و معمولاً سرعت برشی نامیده می‌شود.

ارتباط میان فاکتور اصطکاک کل در یک کانال زبر و شیب‌دار در قالب رابطه ۳ نشان داده شده است (Dey and Raju, 2002).

در رابطه ۳،  $F_r$  عدد فرود جریان،  $F_p$  عدد فرود ذره،  $Re_*$  عدد رینولدز،  $\eta$  شکل هندسی مقطع افقی مؤثر بر مقاومت سطحی و  $N$  غیریکنواختی کانال است. نکته حائز اهمیت در این پژوهش عدم در نظرگیری شیب بستر جریان است زیرا شیب بستر رودخانه‌های کوهستانی با بستر درشت‌دانه بسیار متغیر بوده و ارائه دقیق آن بسیار مشکل بوده و دارای عدم قطعیت است. در رودخانه‌های کوهستانی با بستر درشت‌دانه (بستر شنی-سنگی)، در رینولدزهای بیشتر از  $10^4$ ، می‌توان اثرات عدد رینولدز جریان را به راحتی نادیده گرفت. همچنین نتایج تحقیقات نشان داده است که عدد فرود جریان و عدد فرود ذره دارای ضرایب تعیین بسیار کوچکی (کمتر از ۱۰ درصد) در ارتباط با فاکتور اصطکاک هستند که نشانگر عدم تأثیر آن‌ها بر مقاومت جریان است. اگرچه برای استغراق‌های نسبی بسیار بزرگ ( $h/d_{84} > 15$ )، عدد فرود تأثیر بالایی بر تخمین فاکتور اصطکاک بخصوص در فرودهای  $0.6 < F_r < 0.9$  دارد (Afzalimehr and Ferro, 2000). در حقیقت تفاوت بسیار بزرگی در ساختار آشفستگی میان جریان با عدد فرود پایین و جریان با عدد فرود بالا وجود دارد که این تفاوت در تعیین سرعت برشی به عنوان پارامتر تعیین‌کننده در فاکتور اصطکاک، دخیل می‌شود. علاوه بر این، Bathurst (1985) بیان نمود که اثرات  $\eta$  و  $N$  بر ضریب اصطکاک در کانال‌های طبیعی ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن است. بنابراین رابطه ۳ به صورت رابطه ۴ ساده می‌شود.

<sup>۱</sup>Keulegan method

<sup>۲</sup>Shields parameter method

در معادله ۶،  $\kappa$  ثابت جهانی ون کارمن (برابر با ۰٫۴)،  $U_1$  و  $U_2$  مقادیر سرعت جریان در ۲۰ و ۸۰ درصد عمق جریان از سطح آب بوده و  $y_1$  و  $y_2$  فواصل عمودی ۲۰ و ۸۰ درصد عمق جریان از سطح آب هستند.

### 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.

#### روش کلگان (۱)

کلگان در سال ۱۹۳۸ معادله ۷ را برای محاسبه فاکتور اصطکاک ذره در کانال‌های روباز با استفاده از فاکتور اصطکاک دارسی-ویسباخ ارائه نمود (Keulegan, 1938).

$$f' = \left[ 2.21 + 2.03 \log \left( \frac{R}{k_s} \right) \right]^{-2} \quad (7)$$

که در این رابطه  $k_s$  زبری مؤثر نیکورادزه است. Yen (1991) فهرستی از ضریب  $k_s$  گزارش شده در منابع را آماده و بررسی نمود. نتایج بررسی نشان داد که مقادیر  $k_s$  از  $1.23d_{35}$  به  $3d_{90}$  یا  $6.63d_{50}$  تغییر می‌کند. با این وجود،  $k_s$  معادل با  $d_{50s}$  (قطر میانه ذرات لایه سطحی بستر) 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 برای محاسبه شرایط جریان در بستر رودخانه سپر شده را پیشنهاد داده است.

#### روش پارامتر شیلدز (۲)

با توجه به اهمیت حضور لایه سپر در تعیین فاکتور اصطکاک کل بستر و در نتیجه فاکتور اصطکاک شکل بستر، ضرورت ایجاد مدلی به منظور در نظرگیری اثرات

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = \phi_2 \left( \frac{h}{d_{84}} \right) \quad (4)$$

(Ferguson (2007) با توجه به استغراق نسبی جریان، مقیاس زبری سطح بستر را به صورت  $1.4 < h/d_{84} < 4$  عنوان زبری بزرگ مقیاس،  $4 < h/d_{84} < 1.4$  زبری با مقیاس متوسط و  $h/d_{84} > 4$  زبری کوچک مقیاس معرفی نمود. همچنین بر اساس این معیار  $h/d_{84} < 1$  به عنوان استغراق نسبی بسیار کم،  $1 < h/d_{84} < 10$  استغراق نسبی متوسط و  $10 < h/d_{84} < 100$  استغراق نسبی زیاد شناخته می‌شوند. نوع دیگر بیان فاکتور اصطکاک دارسی-ویسباخ، مشتق از معادله ۲ با فرض جریان یکنواخت به صورت معادله ۵ ارائه می‌شود. در رودخانه‌های کوهستانی به علت غیریکنواختی جریان و بستر، استفاده از این معادله با فرض مذکور غیرقابل اعتماد به نظر می‌رسد. به منظور دخیل نمودن اثرات غیریکنواختی جریان در معادله دارسی-ویسباخ باید سرعت برشی جریان ( $U_*$ ) در این معادله با استفاده از پروفیل توزیع سرعت تخمین زده شود. بنابراین، فاکتور اصطکاک کل با استفاده از معادله ۵ محاسبه شده است.

$$\frac{U}{U_*} = \sqrt{\frac{8}{f}} \rightarrow f = 8 \left( \frac{U_*}{U} \right)^2 \quad (5)$$

با توجه به کاربرد وسیع قانون لگاریتمی توزیع سرعت در جریان آشفته، عدم محدودیت برای نرخ اندازه متفاوت ذرات رسوبی و تأیید کارایی توزیع جهانی سرعت در مطالعات متعدد میدانی و آزمایشگاهی، در این مطالعه سرعت برشی نیز از روش دو نقطه و برطبق قانون دیوار بدست آمده است (Julien, 1995; Afzalimehr, 2010).

$$\frac{U_2 - U_1}{U_*} = \frac{1}{\kappa} (\ln y_2 - \ln y_1) \Rightarrow U_* = \frac{\kappa(U_2 - U_1)}{\ln \left( \frac{y_2}{y_1} \right)} \quad (6)$$

جریانی مدنظر است که سبب ایجاد تنش برشی گردد که به تولید لایه سپر می‌انجامد.

### تعیین فاکتور اصطکاک شکل بستر

سرانجام فاکتور اصطکاک شکل بستر از تفاضل فاکتور اصطکاک کل از فاکتور اصطکاک ذره حاصل می‌شود (معادله ۱).

### مطالعات میدانی

در این پژوهش از سه رودخانه درشت‌دانه با شرایط توپوگرافی و هیدرولیکی متفاوت استفاده شده است. در ابتدا بازه ۱۰۰ 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 رودخانه در این بازه از ۱۴ تا ۲۳ متر متغیر است. بازه انتخابی تقریباً مستقیم و با بستر درشت‌دانه پوشیده شده است. نقشه برداری در طول مسیر و قرائت سطح آب و سطح بستر رودخانه با هدف ترسیم پروفیل بستر رودخانه و سطح آب برداشت شد. به طور کلی ۹ مقطع در بازه انتخابی با فاصله ۱۵-۱۰ متری بر اساس شکل مقطع انتخاب شدند. پروفیل‌های سرعت در این مقاطع به صورت پروفیل سرعت مرکزی و پروفیل‌های هر دو ساحل مقطع تعیین شد. زمان اندازه‌گیری سرعت جریان به صورت نقطه‌ای برای هر نقطه تقریباً ۵۰ ثانیه بود و این عمل در ۳ تکرار صورت گرفت و سپس میانگین سرعت برای آن نقطه محاسبه شد. فاصله نقاط اندازه‌گیری ۱ تا ۲ سانتی‌متر در ۲۰ درصد عمق نزدیک بستر و با فاصله ۳ تا ۵ سانتی‌متر در ۸۰ درصد عمق جریان اندازه‌گیری شد. گرادیان سرعت کوچکتر در ۸۰ درصد عمق جریان در مقایسه با ۲۰ درصد عمق نزدیک بستر قابل مشاهده است (شکل ۱). همچنین سرعت متوسط جریان از رابطه  $U = (U_{0.2} + U_{0.8}) / 2$  محاسبه شد. علاوه بر این،

توسعه لایه سپر بر مقاومت جریان محسوس است. با توجه به تحقیقات انجام شده در تحلیل فرآیند 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 رسوبات مخلوط، 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 تشکیل‌دهنده بستر است. این مدل در رابطه بی‌بعد ۸ بیان شده است. به علت ویژگی‌های بازخوردی فرآیند سپرشدن بستر، جایی که تنش برشی کنترل‌کننده ترکیب لایه سپر است، ارتفاع زبری مؤثر با تأثیرپذیری از تنش برشی دچار تغییر شده و محاسبات این مدل بسیار پیچیده می‌شود.

$$\frac{\tau}{(\gamma_s - \gamma)k_s} = f\left(\frac{U_* k_s}{v}\right) \quad (8)$$

در این رابطه  $\tau$  متوسط تنش برشی بستر،  $\gamma_s$  و  $\gamma$  به ترتیب وزن مخصوص رسوب و آب،  $v$  لزجت سینماتیکی و  $\rho$  چگالی مایع هستند.

این مدل اثر صریح توزیع اندازه ذرات لایه سپر را در نظر نمی‌گیرد. به دلیل آنکه فرآیند آستانه حرکت ذرات در عددهای رینولدز ذره بیشتر از محدوده ۲۰۰-۱۵۰، مستقل از عدد رینولدز ذره می‌شود، موردی که در آزمایشات میدانی و آزمایش‌های محققین متعدد دیده شده است، رابطه ۸ به صورت معادله ۹ ساده می‌شود که مقدار ثابت آن در حقیقت همان میزان پارامتر شیلدز بحرانی ( $\tau_{*cr}$ ) است.

$$\frac{\tau}{(\gamma_s - \gamma)k_s} = \text{مقدار ثابت} \quad (9)$$

در صورتی که چنین مدلی نتایج معقول و منطقی داشته باشد، این امر به اثرات ارتباط مهم فیزیکی بین فرآیند سپرشدگی بستر و فاکتور اصطکاک به دلیل لایه سپر دلالت دارد. زیرا صحت و کارایی مدل در دبی

محاسبه شد و سپس مقدار میانگین آن همراه با میانگین سرعت جریان در هر مقطع در معادله ۵ برای تعیین فاکتور اصطکاک کل ( $f$ ) استفاده شد. پس از بررسی نتایج در سه بازه رودخانه مختلف مشخص شد که به طور کلی مقاومت جریان با افزایش استغراق نسبی کاهش می‌یابد (جدول ۱). البته به علت غیریکنواختی جریان و بستر در رودخانه‌های کوهستانی و وجود دامنه وسیعی از اندازه ذرات اعم از ماسه تا قلوه‌سنگ این نتیجه برای تمامی مقاطع جریان صادق نیست. در این تحقیق، دامنه تغییرات عدد رینولدز ذره، عدد فرود و استغراق نسبی به ترتیب،  $1 \times 10^3 < Re_* < 9.03 \times 10^3$ ،  $0.18 < F_r < 0.8$  و  $19.8 < h/d_{84} < 2.98$  می‌باشند. نتایج نشان داد که ۷۵ درصد مقاطع در محدوده استغراق نسبی متوسط قرار گرفتند و بازه انتخابی رودخانه زاینده‌رود با استغراق نسبی کمتر و فاکتور اصطکاک ذره و کل بیشتری متمایز است (مقاطع 2A و 3A). همانطور که بیان شد، پارامتر  $[(8/f)^{0.5}]$  در رابطه ۴ بسیار وابسته به میزان استغراق نسبی است به طوری که هرچه میزان آن افزایش یابد، پارامتر  $[(8/f)^{0.5}]$  افزایش یافته و فاکتور اصطکاک کاهش می‌یابد. بدین ترتیب در رودخانه‌های کوهستانی با بستر درشت‌دانه در حضور خوشه ذرات، پارامتر  $[(8/f)^{0.5}]$  عموماً کم است (فاکتور اصطکاک زیاد) در حالی که با کاهش قطر میانه ذرات این نسبت افزایش می‌یابد (فاکتور اصطکاک کم). زیرا در رودخانه‌های با ذرات درشت‌تر به دلیل افزایش آشفتگی حاصل از وجود ذرات منفرد بزرگ و خوشه‌ها (درگ ناشی از برخاستگی)، مساحت بالاتر زبری نسبی و افزایش تمرکز زبری، میزان فاکتور اصطکاک به مراتب افزایش می‌یابد.

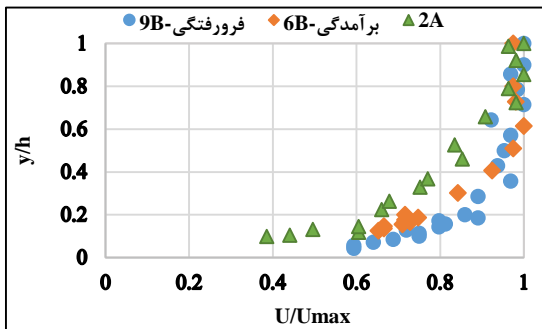
نقشه توپوگرافی بازه مورد نظر مطابق شکل ۳ تعیین گردید. روش مذکور برای دیگر رودخانه‌های درشت‌دانه موجود در این پژوهش نیز اعمال شده است. دو رودخانه دیگر مورد بررسی در این تحقیق به ترتیب رودخانه ماربر و زاینده‌رود است. رودخانه ماربر از ارتفاعات رشته‌کوه دنا سرچشمه گرفته و در منطقه پادنا از توابع شهرستان سمیرم جریان دارد و به عنوان سرشاخه کوچکی از رودخانه کارون شناخته می‌شود. سرانجام بازه ۵۰ متری از رودخانه زاینده‌رود و پس از سد تنظیمی چم‌آسمان به هدف مقایسه شرایط جریان و رسوب در توسعه لایه سپر انتخاب شد. به طور کلی ۲۴ مقطع در این مطالعه استفاده شده است. با استفاده از روش Wolman (1954) توزیع اندازه ذرات محاسبه شده است. در این روش در هر مقطع ۱۰۰ ذره برداشت شده و با اندازه‌گیری سه محور ذره، محور میانه (وسط) به عنوان قطر ذره در نظر گرفته شده است. این عمل در سواحل یک مقطع بسته به شرایط جریان نیز تکرار شد. دانه‌بندی رسوبات بستر رودخانه به صورت سطحی و زیرسطحی بدین روش به منظور تعیین درجه سپرشدگی بستر صورت گرفت (شکل ۲). همچنین انحراف معیار هندسی توزیع اندازه ذرات  $(\sigma = \sqrt{(d_{84}/d_{16})})$  در هر مقطع برآورد شده است.

## نتایج و بحث

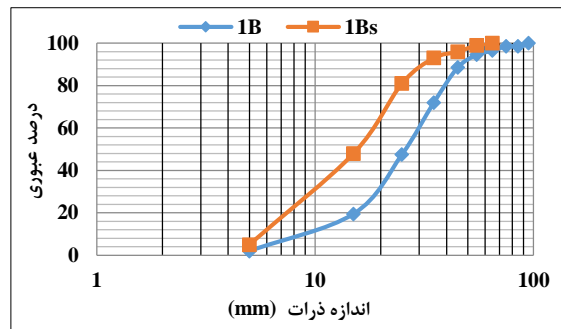
تحلیل نتایج حاصل از تفسیر برهمکنش فاکتور اصطکاک ذره و فرآیند انتقال فیزیکی ذرات در ادامه بیان شده است.

## فاکتور اصطکاک کل

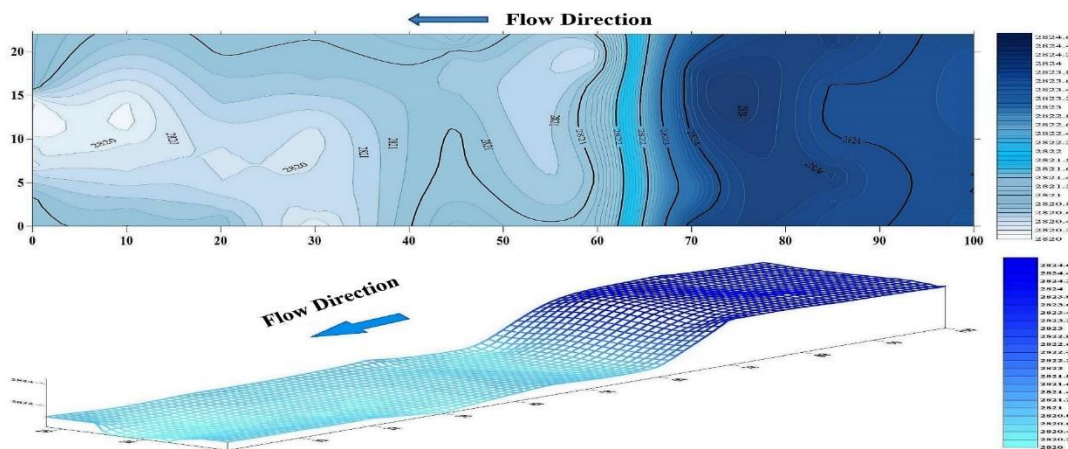
بر این اساس، با استفاده از معادله ۶ مقدار سرعت برشی برای پروفیل‌های سرعت موجود در هر مقطع



شکل (۲): نمودار توزیع دانه بندی بستر (IB لایه سطحی و 1Bs



شکل (۱): پروفیل توزیع سرعت در مقطعی از جریان لایه زیرسطحی)



شکل (۳): نقشه توپوگرافی بازه رودخانه کاج

رابطه ۹ در معادله ۷، معادله ۱۰ برای محاسبه فاکتور اصطکاک ذره بدست خواهد آمد.

$$f' = \left[ 2.21 + 2.03 \log \left( \frac{0.01796(\gamma_s - \gamma)}{S\gamma} \right) \right]^{-2} \quad (10)$$

با در نظرگیری میزان تنش برشی بستر و وزن مخصوص نسبی به ترتیب  $(\tau = \gamma h S)$  و  $SG = \frac{\gamma_s}{\gamma} = 2.65$ ، معادله ۱۰ به صورت معادله ۱۱ ساده می شود. 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 سنت ونانت (Saint-Venant) استفاده می شود (معادله ۱۲).

### فاکتور اصطکاک ذره و شکل بستر

نتایج آزمایشات بر سه بازه رودخانه با شرایط هیدرولیکی و رسوبات متفاوت (جدول ۱) نشان داد که فرض اندازه میانه ذرات  $(d_{50})$  برای تخمین زبری مؤثر معقول به نظر می رسد. زیرا در این آزمایشات پارامتر شیلدز آستانه اندازه زبری مؤثر تقریباً ثابت بود. مقدار میانگین آن  $0.1796$  با انحراف استاندارد  $0.142$  است. وجود این انحراف به آسانی و با عدد رینولدز و یا فرود قابل تشخیص نیست. با در نظرگیری مدل اصطکاک برای تشکیل و توسعه لایه سپر و مقدار ثابت پارامتر شیلدز مذکور برای اندازه دانه مؤثر، با جایگذاری

$$f' = \left[ 2.21 + 2.03 \log \left( \frac{0.02963}{S_f} \right) \right]^{-2} \quad (11)$$

$$S_f = S - \frac{dh}{dx} (1 - Fr^2) \quad (12)$$



جدول (۱): پارامترهای هیدرولیکی برداشتی و محاسباتی

مقطع	$S_f$	$U$ (m/s)	$\tau$ (Pa)	$f$	$f'$ (1)	$f''$ (1)	$f'$ (2)	$f''$ (2)	Fr	$Re^*$ $\times 10^3$	$\tau_{*cr}$	$\frac{h}{d_{84}}$	$\sqrt{\frac{g}{f}}$
1A	۰.۰۰۱۵	۰.۸۱	۵.۱۷	۰.۰۶۳	۰.۰۵۳	۰.۰۱	۰.۰۴۳	۰.۰۲	۰.۴۵	۲.۱	۰.۰۱۰۹	۷.۳۳	۱۱.۲
2A	۰.۰۰۱۱	۰.۶۷	۴.۵۳	۰.۰۸۱	۰.۰۶۲	۰.۰۱۹	۰.۰۳۸	۰.۰۴۳	۰.۳۳	۳.۶۷	۰.۰۰۵۱	۳.۴۹	۹.۹۵
3A	۰.۰۰۱۱	۰.۷	۳.۸۴	۰.۰۶۱	۰.۰۵۹	۰.۰۰۲	۰.۰۳۹	۰.۰۲۳	۰.۳۸	۲.۴۱	۰.۰۰۶۱	۳.۵۷	۱۱.۴
1B	۰.۰۰۸۱	۰.۵۸	۴.۳۸	۰.۱۰۴	۰.۰۴۱	۰.۰۶۳	۰.۰۸۹	۰.۰۱۵	۰.۲۵	۱.۶۵	۰.۰۱۰۸	۱۲.۵	۸.۷۷
2B	۰.۰۰۲	۱.۰۶	۹.۴۱	۰.۰۶۷	۰.۰۴۶	۰.۰۲۱	۰.۰۴۷	۰.۰۲	۰.۴۵	۳.۳۹	۰.۰۱۶۶	۹.۷۳	۱۰.۹
3B	۰.۰۰۶	۱.۰۵	۱۰.۵۵	۰.۰۷۷	۰.۰۶	۰.۰۱۷	۰.۰۷۵	۰.۰۰۲	۰.۵۶	۴.۳۶	۰.۰۱۵۳	۶.۶۱	۱۰.۲
4B	۰.۰۰۲۸	۱.۲۳	۲۱.۲	۰.۱۱۲	۰.۰۶۲	۰.۰۵	۰.۰۵۴	۰.۰۵۸	۰.۶۹	۶.۱۹	۰.۰۳۰۸	۶.۳۸	۸.۴۷
5B	۰.۰۰۲۶	۰.۷۶۱	۱۱.۵	۰.۱۶	۰.۰۵	۰.۱۱	۰.۰۵۲	۰.۱۰۷	۰.۴۴	۲.۴۷	۰.۰۳۱	۷.۷۶	۷.۰۷
6B	۰.۰۰۲۶	۰.۹۳	۸.۶۵	۰.۰۸	۰.۰۶۷	۰.۰۱۳	۰.۰۵۲	۰.۰۲۸	۰.۵۲	۴.۶۵	۰.۰۱۱	۴.۷۱	۱۰
7B	۰.۰۰۲۵	۰.۸۶	۹.۳۶	۰.۱	۰.۰۶	۰.۰۴	۰.۰۵۱	۰.۰۴۹	۰.۴۳	۴.۸۳	۰.۰۱۲	۵.۴۸	۸.۹۶
8B	۰.۰۰۰۳	۰.۵۴	۲.۳۴	۰.۰۶۳	۰.۰۴۴	۰.۰۱۹	۰.۰۲۴	۰.۰۳۹	۰.۲۷	۱.۱۱	۰.۰۰۶۳	۱۰.۳	۱۱.۲
9B	۰.۰۰۴۱	۱.۲۰	۱۲.۹	۰.۰۷۱	۰.۰۴	۰.۰۳۱	۰.۰۶۴	۰.۰۰۷	۰.۵۹	۱.۹۸	۰.۰۴۵۶	۱۹.۸	۱۰.۵
1C	۰.۰۰۶۴	۱.۲۰	۱۶.۵	۰.۰۹۱	۰.۰۶۷	۰.۰۲۴	۰.۰۷۹	۰.۰۱۲	۰.۷۵	۵.۱۴	۰.۰۲۵۵	۴.۷۹	۹.۳۸
2C	۰.۰۰۸۶	۱.۰۱	۱۳.۸	۰.۱۱	۰.۰۷۹	۰.۰۳۱	۰.۰۹۲	۰.۰۱۸	۰.۸	۴.۱۱	۰.۰۲۴۳	۲.۹۸	۸.۶
3C	۰.۰۰۵۱	۰.۹۲۸	۹.۲۵	۰.۰۸۶	۰.۰۷۴	۰.۰۱۲	۰.۰۷	۰.۰۱۶	۰.۶۹	۳.۳۶	۰.۰۱۶۳	۳.۳۸	۹.۶۴
4C	۰.۰۰۱۶	۱.۲۰۳	۱۰.۶	۰.۰۵۹	۰.۰۴۳	۰.۰۱۶	۰.۰۴۴	۰.۰۱۵	۰.۴۷	۳.۶۱	۰.۰۱۸۸	۹.۰۲	۱۱.۶
5C	۰.۰۰۹۴	۱.۳۳	۳۳.۳	۰.۱۵	۰.۰۴۳	۰.۰۱۰۷	۰.۰۹۶	۰.۰۵۴	۰.۷۱	۳.۲۸	۰.۱۱۴۳	۱۰.۳	۷.۳۱
6C	۰.۰۰۳۸	۰.۶۵	۱۰.۸	۰.۰۲	۰.۰۶	۰.۱۴	۰.۰۶۲	۰.۱۳۹	۰.۳۹	۳.۶۴	۰.۰۱۹۱	۵.۳	۶.۳۲
7C	۰.۰۰۵۵	۰.۸۵	۱۹.۳	۰.۲۱۴	۰.۰۷۳	۰.۱۴۱	۰.۰۷۳	۰.۰۷۳	۰.۴۵	۹.۰۳	۰.۰۱۸۳	۳.۴۳	۶.۱۲
8C	۰.۰۰۴۳	۱.۰۱	۱۳.۵۳	۰.۱۰۶	۰.۰۴۷	۰.۰۵۹	۰.۰۶۵	۰.۰۴۱	۰.۵۷	۲.۴۴	۰.۰۳۹۸	۸.۰۲	۸.۷
9C	۰.۰۰۲۱	۰.۷	۱۰.۶۶	۰.۱۷۳	۰.۰۵۸	۰.۱۱۵	۰.۰۴۹	۰.۱۲۴	۰.۳۱	۵.۶۷	۰.۰۱۱۹	۶.۹	۶.۸
10C	۰.۰۰۲۲	۰.۶۴	۱۰.۷۰	۰.۲۰۹	۰.۰۵۷	۰.۱۵۲	۰.۰۵	۰.۱۵۹	۰.۳	۵.۱۷	۰.۰۱۳۲	۷.۴	۶.۱۹
11C	۰.۰۰۱۲	۰.۷۳۵	۳.۹۳۶	۰.۰۵۸	۰.۰۴۳	۰.۰۱۵	۰.۰۴	۰.۰۱۸	۰.۴۱	۱	۰.۰۱۵۲	۱۰.۶	۱۱.۷
12C	۰.۰۰۰۲	۰.۵۴۲	۲.۲۷۷	۰.۰۶۲	۰.۰۴۶	۰.۰۱۶	۰.۰۲۵	۰.۰۳۷	۰.۱۸	۲.۶۲	۰.۰۰۲۵	۱۱.۹	۱۱.۳

A: رودخانه زاینده‌رود، B: رودخانه کاج، C: رودخانه ماربر

۱۰۰ می‌باشد، نشان داد 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). در تحقیق حاضر تنها در ۴ مقطع جریان از ۲۴ مقطع داده‌برداری شده از سه رودخانه میزان پارامتر شیلدز بحرانی از ۰.۰۳ تجاوز کرده است (۱۷٪). نتایج مشابهی در رودخانه Oak از ایالت Oregon به عنوان رودخانه‌ای چندساله با سطوح سپر توسعه یافته حاصل شده است. در این رودخانه کوهستانی، در ۶۶ اندازه‌گیری میدانی برای نرخ انتقال بار بستر تنها در ۲۰ مورد آن تنش برشی آستانه شیلدز از میزان ۰.۰۳ تجاوز نموده است (۳۰٪). این موضوع نمایانگر تشکیل و توسعه لایه سپر با فرآیند انتقال انتخابی ذرات می‌باشد

معادله ۱۱ نتایج مهمی در ارتباط با اثرات متقابل فرآیند سپرشدگی بستر و فاکتور اصطکاک را عرضه می‌کند. به دلیل فرآیند 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. این نتایج غیرقابل انتظار 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 حرکت در زمانی که عدد رینولدز ذره بیش از

بالاتری دارد زیرا علاوه بر در نظرگیری تغییرات غیریکنواختی جریان، همزیستی جریان و لایه سپر را نیز در محاسبه فاکتور اصطکاک ذره 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 که نشان از اهمیت بالای این پارامتر است. به طور میانگین درصد تأثیر فاکتور اصطکاک شکل بستر در این مطالعه حدود ۴۰ می‌باشد. بنابراین عدم در نظرگیری فاکتور اصطکاک شکل بستر در میزان کل فاکتور اصطکاک سبب ورود خطای زیادی را در تخمین سرعت متوسط جریان خواهد شد.

#### توزیع سرعت

شکل ۳ نقشه توپوگرافی بازه ۱۰۰ متری رودخانه کاج و نمایش سه بعدی سطح بستر را نشان می‌دهد. پروفیل‌های سرعت مقاطع دارای فرورفتگی و برآمدگی در شکل ۱ مشخص شده است. در رودخانه کاج مقطع 6B برآمدگی و مقطع 9B نمایانگر فرورفتگی هستند. همچنین در این مقاطع، سهم فاکتور اصطکاک شکل بستر از هر دو روش ۱ و ۲ قابل ملاحظه است. اگرچه که بازه موردنظر در رودخانه ماربر نیز دارای مقاطع فرورفتگی و برآمدگی است، به دلیل تمرکز پژوهش در مورد فاکتور اصطکاک شکل بستر، شرایط متوسط جریان در مقیاس بازه مورد نظر در عوض بررسی جزئی پروفیل‌های سرعت در طول شکل بستر اعمال شده است و تنها توپوگرافی رودخانه کاج به عنوان نمونه آمده است. همانطور که از شکل ۱ مشخص است، سرعت در فرورفتگی رشد سریعتری داشته و میانگین سرعت و تنش برشی در مقطع به ترتیب ۱/۲۰۴ متر بر ثانیه و ۱۲/۹۳ پاسکال است در حالی که در برآمدگی این مقادیر به ترتیب ۰/۹۳۲ و ۸/۶۵ که نتیجه آن همگرایی جریان در فرورفتگی است. نتایج مذکور در مطالعات میدانی وجود فرضیه واژگونی سرعت و اثرات مرتبط با رسوب آن را در بازه رودخانه کاج تأیید نمودند (فرضیه

زیرا در مقادیر کمتر از ۰/۰۳ تشکیل لایه سپر با انتقال ذرات ریزدانه به پایین دست غالب می‌شود و با ایجاد لایه سپر و توسعه آن بر فاکتور اصطکاک تأثیر می‌گذارد (Diplas, 1987). همچنین، آستانه حرکت ذرات در رینولدز مذکور مستقل از عدد رینولدز ذرات شده است و میزان ثابتی از پارامتر شیلدز بحرانی در مطالعات حاصل شد (۰/۱۰۱۷۹۶). (Graf and Suszka 1987). نیز نشان دادند که در زمان تجاوز عدد رینولدز ذره از ۵۰۰، پارامتر شیلدز تنها به شیب بستر وابسته است. در رودخانه‌های درشت‌دانه، افزایش درشتی لایه سپر و توسعه شکل‌های بستر خوشه‌ای، نه تنها سبب افزایش پایداری بستر و افزایش فاکتور اصطکاک خواهد شد بلکه به کاهش میزان تنش برشی آستانه شیلدز می‌انجامد.

لذا معادله ۱۱ 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 ۱۲ است. بنابراین کاربرد معادله ۱۱ در محاسبه  $f'$  وابسته به شرایط جریان در بالادست از طریق اندازه‌گیری  $S$ ،  $dh/dx$  و  $Fr$  است. پس از محاسبه فاکتور اصطکاک کل با معادله ۵ و فاکتور اصطکاک ذره با معادلات ۷ و ۱۱، می‌توان فاکتور اصطکاک شکل بستر ( $f''$ ) را با استفاده از معادله ۱ محاسبه نمود. محاسبات نشان داد که  $f''$  تعیین شده با استفاده از معادله ۷ و ۱۱ (روش ۱ و ۲) دارای توافق مناسبی می‌باشند (اختلاف کمتر از ۲۱ درصد). نکته حائز اهمیت در این معادلات، در نظرگیری غیریکنواختی جریان به صورت مستقیم با اعمال شیب خط انرژی ( $S_f$ ) در معادله ۱۱ و غیرمستقیم با به کارگیری قانون دیوار برای محاسبه سرعت برشی از پروفیل سرعت و اثر آن در محاسبه  $f$  برای تعیین  $f''$  است.

نتایج جدول ۱ نشانگر توافق مناسب بین روش کلگان با اعمال عمق جریان و اندازه ذره و روش پارامتر شیلدز با اعمال شیب سطح آب برای محاسبه فاکتور اصطکاک ذره است. روش پارامتر شیلدز از لحاظ تئوری کارایی

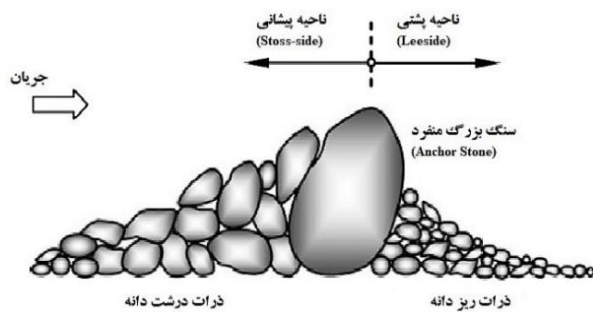
است). همچنین این شرایط سبب توسعه خوشه‌ها و ساختارهای وابسته می‌شود و به پایداری بستر در مقابل فرسایش کمک می‌کند (Church and Hassan, 2002). در همین زمان، افزایش زبری بستر سبب افزایش فاکتور اصطکاک و کاهش سرعت متوسط جریان می‌شود که نتیجتاً به کاهش تنش برشی مرزی بستر می‌انجامد. سرانجام کاهش تنش برشی در راستای پایداری بستر عمل می‌کند.

با حذف ذرات ریز از بستر و افزایش سطح تماس ذرات درشت منفرد با جریان، گودالی در جلوی ذره بزرگ منفرد ایجاد شده و سبب 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. همچنین ذرات متوسط و یا نسبتاً بزرگ نیز در اطراف گودال فرسایش تجمع یافته و ذرات ریزتر پشت و یا بین آن‌ها پنهان می‌شوند. در شکل ۴ فرآیند تشکیل خوشه، لایه سپر ایستا و نحوه قرارگیری و پایداری خوشه‌ها در بستر جریان نمایش داده شده است. در ساختارهای خوشه مشاهده شده، به دلیل اینکه لایه سپر ایستا در شرایط عدم تأمین رسوب به وجود آمده و ساختاری پایدار یافته است، جهت ذرات بستر به سمت پایین دست بوده و دارای سطح تماس کمتری با جریان می‌باشند. در شکل ۴ ذرات بزرگ منفرد در ساختار خوشه با رنگ بنفش مشخص شده است. نحوه قرارگیری این ذرات در بستر (به صورت موازی، مثلثی، حلقه‌ای، لوزی و غیره) و به طور کلی خوشه ذرات به میزان قابل توجهی به شرایط جریان و رسوبات بستر مرتبط می‌باشند. شکل‌های بستر خوشه ممکن است با فرسایش بستر در حاشیه آن‌ها به تدریج فروپاشیده شوند. در این حالت ذره درشت منفرد به سمت پایین دست حرکت کرده و در نقطه‌ای دیگر ثابت می‌شود تا فرآیند مذکور دوباره تکرار شود (Strom et al. 2004).

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 ۵۰ میلی‌متر و در فرورفتگی ۱۷/۵ میلی‌متر می‌باشند که گواه درشتی ذرات برآمدگی نسبت به فرورفتگی است (جدول ۲). این درشتی ذرات در برآمدگی حاکی از فرسایش ذرات در مقطع فرورفتگی و رسوب آن‌ها در مقطع برآمدگی است (اخروی و همکاران، ۱۳۹۲). البته همواره برآمدگی‌ها درشت‌دانه‌تر از فرورفتگی‌ها نیستند و مقیمین مختلف اذعان 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).

#### اثرات توسعه لایه سپر

در لایه فعال سطحی، نرخ انتقال ذرات از سطح بستر با زمان کاهش می‌یابد و حتی پس از زمان طولانی نیز هیچگاه به صفر نمی‌رسد. این امر گواه توسعه تقریبی و مجانبی لایه سپر است. 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 می‌شوند (Diplas, 1987). به علت غیریکنواختی رسوبات بستر، ذرات ریز سطحی با نرخ بالایی شروع به حرکت کرده و سبب تجمع ذرات درشت در سطح بستر و حمایت ذرات ریز در لایه‌های پایینی می‌شوند. با افزایش تنش برشی بستر، ذرات ریز رسوب جابه‌جا شده و ذرات بزرگتر باقی می‌مانند. نهایتاً شرایط حد بالایی بستر جریان تحت عنوان شرایط آستانه سپرشدگی بستر ایجاد می‌شود. این حالت در نرخ  $d_{max}/d_{50s}$  بیشتر از ۷/۵ مشاهده شده است ( $d_{max}$  بزرگترین اندازه ذره در نمودار توزیع اندازه ذرات بستر



شکل (۴): توسعه لایه سپر و طرح ساختارهای خوشه در بازه انتخابی رودخانه زاینده رود

است. به همین دلیل برای تحلیل شرایط بسترهای رسوبی متفاوت سه رودخانه مجزا انتخاب و بررسی شد. دامنه تغییرات انحراف معیار هندسی ذرات ( $1.09 < \sigma < 2.18$ ) نیز حاکی از این موضوع است (جدول ۲). با توجه به تعریف غیریکنواختی توزیع ذرات بستر ( $\sigma > 1.4$ )، ۷۵ درصد مقاطع بررسی شده دارای توزیع ذرات غیریکنواخت هستند. رودخانه‌های کاج و ماربر از رودخانه‌های کوهستانی 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.

از دیگر تفاوت‌های رودخانه‌های بررسی شده در این پژوهش، ضخامت لایه سطحی آن‌ها ( $t$ ) است. محققین مختلف معیارهای متفاوتی را برای تعیین ضخامت لایه سپر عنوان نموده‌اند. (Correia and Graf (1988) اندازه متوسط ذرات لایه سپر را معادل  $d_{50a} = 1.4d_{50}$  و

درجه سپرشدگی بستر با نرخ  $d_{50s}/d_{50sub}$  مشخص می‌شود ( $d_{50sub}$ ، قطر میانه ذرات لایه زیرسطحی بستر). این نسبت در رودخانه‌های با تأمین رسوب زیاد به یک نزدیک است ( $d_{50s}/d_{50sub} = 1$ ) و با تجاوز توانایی انتقال رسوب از میزان تأمین رسوب، افزایش یافته ( $1 < d_{50s}/d_{50sub} < 3$ ) و سرانجام در رودخانه‌های کوهستانی با انرژی زیاد و فقدان کامل تأمین رسوب ( $d_{50s}/d_{50sub} \geq 3$ )، لایه سپر بسیار بزرگ و تقریباً غیرقابل حرکت می‌شود (Constantinescu et al. (2016). بر این اساس تمامی مقاطع مورد بررسی در این پژوهش در دسته رودخانه‌های سپر شده قرار می‌گیرند. از ۲۴ مقطع موجود در جدول ۲، ۲۱ مقطع در دسته دوم تقسیم‌بندی بالا و ۳ مقطع در دسته سوم قرار می‌گیرد. بنابراین تحلیل پارامترهای مذکور به ارتباط میان شرایط هیدرولیکی جریان و انتقال رسوبات می‌انجامد و اثرات آن به صورت مستقیم و غیرمستقیم بر فاکتور اصطکاک جریان مؤثر واقع می‌شود.

ذرات بستر گاه‌گاه دارای توزیع عمودی متفاوتی می‌باشند که وابسته به تأمین رسوبات قابل انتقال در بستر جریان، توزیع اندازه ذرات بستر و شرایط هیدرولیکی جریان

می‌شود که اندازه ذرات در محدوده ذرات درشت‌دانه شنی و قلوه‌سنگی قرار می‌گیرد که نتیجتاً به تشکیل ساختار خوشه می‌انجامد. به عنوان نمونه، مقطع 1A با  $d_{50s}/d_{50sub}=3.59$  و  $d_{max}/d_{50s}=6.3$  و ضخامت لایه سپر ۱۸۵ میلی‌متر تقریباً به حد آستانه بستر سپر شده رسیده است. چنین شرایطی به دلیل قرارگیری مقطع در بازه پایین دست رودخانه سد زاینده‌رود و در شرایط تأمین رسوب بسیار کم بالادست شکل گرفته است. در این حالت بستر دارای درجه پایداری بالایی بوده و تنها با جریان‌های عظیم سیلابی دچار انحطاط خواهد شد.

$d_{50a} \leq 0.6d_{90}$  عنوان نموده و ضخامت لایه سپر را معادل با  $d_{90}$  ذرات لایه سطحی معرفی کردند. در این میان، معیار محور میانه بزرگترین اندازه ذره موجود در نمودار توزیع اندازه ذرات ( $d_{max}$ ) معرفی شده توسط (Diplas (1992) برای رودخانه‌های درشت‌دانه شنی - سنگی تطابق بالاتری داشته است. ضخامت لایه سپر در این پژوهش در بازه  $49 < t < 290$  میلی‌متر قرار گرفت. با توجه به محدوده اندازه ذرات متوسط لایه سطحی ( $16 < d_{50s} < 65$ ) میلی‌متر و معیار در نظر گرفته شده برای ضخامت لایه سپر در بازه‌های بررسی شده مشخص

جدول (۲): وضعیت رسوبات سطحی و زیرسطحی بستر رودخانه

t (mm)	$\frac{d_{max}}{d_{50s}}$	$\frac{d_{50s}}{d_{50sub}}$	$\sigma$	D <sub>16</sub> (mm)	d <sub>90</sub> (mm)	d <sub>84</sub> (mm)	d <sub>50sub</sub> (mm)	d <sub>50s</sub> (mm)	مقطع	
۱۸۵	۶٫۳۱	۳٫۵۹	۱٫۷۹	۱۴٫۲۸	۵۷٫۷	۴۵٫۶	۸٫۱۷	۲۹٫۳	1A	زاینده رود
۲۹۰	۵٫۳۱	۲٫۱۴	۲٫۰۲	۲۹٫۶۷	۱۴۲٫۵۹	۱۲۱٫۳۳	۲۵٫۵	۵۴٫۶۶	2A	
۲۵۰	۷٫۴۴	۱٫۷	۲٫۱۸	۲۰٫۲۱	۱۰۰٫۵۶	۹۶٫۲۵	۲۳	۳۹	3A	
۹۵	۳٫۸	۱٫۵۲	۱٫۷۲	۱۴٫۶	۴۶٫۵	۴۳٫۳	۱۶٫۵	۲۵	1B	
۹۶	۲٫۷۴	۳٫۳۳	۱٫۶۸	۲۰٫۲	۵۸	۵۶٫۹	۱۰٫۵	۳۵	2B	
۹۴	۲٫۲۱	۲٫۰۷	۱٫۲۵	۳۴٫۳	۵۸٫۶	۵۴	۲۰٫۵	۴۲٫۵	3B	
۹۸	۲٫۳۱	۲٫۲۴	۱٫۴۸	۲۳٫۳	۵۸	۵۱	۱۹	۴۲٫۵	4B	
۹۰	۳٫۹۱	۲٫۸۷	۱٫۹۷	۱۰	۴۶٫۵	۳۸٫۷۵	۸	۲۳	5B	کاج
۱۲۵	۲٫۵	۱٫۷۹	۱٫۴۶	۳۲٫۳	۷۵	۶۹	۲۸	۵۰	6B	
۱۱۰	۲٫۲	۴٫۱۷	۱٫۵	۳۱٫۶	۷۵	۷۱٫۳	۱۲	۵۰	7B	
۸۷	۳٫۷۸	۲٫۷۹	۱٫۸۲	۱۲٫۵	۴۸٫۶	۴۱٫۵	۸٫۲	۲۳	8B	
۴۹	۲٫۸	۲٫۷۳	۲٫۰۸	۵	۳۰٫۵	۲۱٫۶	۶٫۴	۱۷٫۵	9B	
۱۰۵	۲٫۶۳	۱٫۹	۱٫۲۵	۳۵	۶۵	۵۵	۲۱	۴۰	1C	
۱۰۲	۲٫۹۱	۱٫۴	۱٫۹۱	۱۵	۶۵	۵۵	۲۵	۳۵	2C	
۱۱۰	۳٫۱۴	۱٫۶	۱٫۹۱	۱۵	۶۵	۵۵	۲۲	۳۵	3C	
۱۳۸	۳٫۹۴	۲٫۰۶	۱٫۹۴	۲۰	۹۵	۷۵	۱۷	۳۵	4C	
۸۷	۴٫۸۳	۱٫۷۱	۱٫۱۸	۲۵	۴۵	۳۵	۱۰٫۵	۱۸	5C	
۹۸	۲٫۸	۱٫۶۷	۱٫۶۶	۲۰	۶۵	۵۵	۲۱	۳۵	6C	
۱۴۰	۲٫۱۵	۱٫۸۱	۱٫۲۷	۴۵	۱۱۵	۱۰۵	۳۶	۶۵	7C	ماربر
۸۲	۳٫۹	۲٫۶۳	۱٫۲۶	۲۵	۴۵	۴۰	۸	۲۱	8C	
۱۱۳	۲٫۰۵	۱٫۷۷	۱٫۴۶	۳۵	۷۸	۷۵	۳۱	۵۵	9C	
۱۱۰	۲٫۲	۲٫۰۴	۱٫۴۷	۳۰	۷۵	۶۵	۲۴٫۵	۵۰	10C	
۶۵	۴٫۰۶	۱٫۴۵	۱٫۰۹	۲۵	۳۵	۳۰	۱۱	۱۶	11C	
۱۱۵	۲٫۰۹	۲٫۴	۱٫۴۶	۳۵	۸۵	۷۵	۲۳	۵۵	12C	

شیب بستر یا شیب خط انرژی است. این نتایج غیرقابل انتظار حاصل از ارتباط فاکتور اصطکاک با آستانه حرکت و بازآرایی ذرات درشت‌دانه در پوشش سپر می‌باشد. مشاهدات میدانی حاکی از تغییر شرایط آستانه تنش شیلدز در رودخانه‌های درشت‌دانه به منظور ایجاد تعادل در نرخ انتقال ذرات درشت و ریز می‌باشد.

از آنجایی که استغراق نسبی پارامتر غالب در تخمین فاکتور اصطکاک در رودخانه‌های با بستر درشت‌دانه است، بررسی نتایج نشان داد که مقاومت جریان با افزایش استغراق نسبی کاهش یافته است. ۷۵ درصد مقاطع بررسی شده در این پژوهش در محدوده استغراق نسبی متوسط قرار گرفتند و بازه انتخابی رودخانه زاینده‌رود با استغراق نسبی کمتر و فاکتور اصطکاک ذره و کل بیشتری متمایز بود که دلیل این امر قرارگیری بازه انتخابی در پایین‌دست سد و توسعه لایه سپر ایستا می‌باشد. همچنین وجود شکل‌های بستر خوشه‌ای با کاهش سرعت جریان و تنش برشی در راستای پایداری بستر و لایه سپر عمل کرده و به افزایش فاکتور اصطکاک و مقاومت جریان می‌انجامد.

### فهرست علائم

$f$	فاکتور اصطکاک کل
$f'$	فاکتور اصطکاک ذره
$f''$	فاکتور اصطکاک شکل بستر
$R (m)$	شعاع هیدرولیکی جریان
$h (m)$	عمق جریان
$y_1 (m)$	طول عمودی ۲۰ درصد عمق جریان
$y_2 (m)$	طول عمودی ۸۰ درصد عمق جریان
$d_{50} (mm)$	قطر میانه ذرات
$d_{84} (mm)$	اندازه ذره‌ای است که ۸۴ درصد ذرات از آن کوچکترند
$d_{max} (mm)$	بزرگترین اندازه ذره بستر
$d_{50s} (mm)$	قطر میانه ذرات لایه سطحی بستر
$d_{50sub} (mm)$	قطر میانه ذرات لایه زیرسطحی بستر
$h/d_{84}$	استغراق نسبی جریان

بنابراین تحلیل پارامتر مذکور به ارتباط میان شرایط هیدرولیکی جریان و انتقال رسوبات می‌انجامد و اثرات آن به صورت مستقیم و غیرمستقیم بر فاکتور اصطکاک جریان واقع می‌شود. نتایج نشان داد که تنش برشی آستانه با توسعه لایه سپر و افزایش یا کاهش حضور خوشه‌ها دچار تغییر می‌شود. لایه سپر تفاوت حرکت میان ذرات درشت و ریز را با افزایش سطح تماس ذرات درشت‌دانه کاهش می‌دهد. این فرآیند با حضور ذرات درشت در سطح بستر و افزایش سطح تماس آن‌ها با جریان و افزایش احتمال حرکت آن‌ها صورت می‌گیرد. بنابراین حضور ذرات درشت در سطح بستر به مانند معادل کردن انتقال یکسان ذرات درشت و ریز عمل می‌کند و سبب تغییر در شرایط آستانه تنش برشی بستر شیلدز می‌شود.

### نتیجه‌گیری

فاکتور اصطکاک در رودخانه‌های درشت‌دانه به عنوان نمایه مقاومت جریان به دو دسته مقاومت ذره و شکل بستر تقسیم‌بندی می‌شود. وجود دامنه وسیعی از اندازه‌های ذرات در این رودخانه‌ها و توسعه لایه سپر اثرات قابل توجهی بر فاکتور اصطکاک دارد. محققین مختلف به بررسی فاکتور اصطکاک کل با استفاده از رویکرد معادلات نیمه‌لگاریتمی و توانی پرداختند که به ترتیب دارای کم‌برآورد و بیش‌برآورد سرعت در محاسبه فاکتور اصطکاک هستند. بدین منظور در این مطالعه فاکتور اصطکاک کل با استفاده از قانون دیوار و پروفیل سرعت محاسبه شد. سپس فاکتور اصطکاک ذره با روش‌های کلگان و پارامتر شیلدز محاسبه و سرانجام از تفریق فاکتور اصطکاک ذره از کل، فاکتور اصطکاک شکل بستر نیز بدست آمد. نتایج حاکی از وجود توافق ۸۰ درصدی میان دو روش مذکور در تخمین فاکتور اصطکاک ذره و شکل بستر بود.

از دیگر نتایج مهم این پژوهش می‌توان به استقلال فاکتور اصطکاک ذره از توزیع ذرات تشکیل‌دهنده بستر و حداکثر اندازه آن‌ها اشاره نمود. معادله ۱۱ نشان داد که تنها پارامتر اصلی کنترل‌کننده فاکتور اصطکاک،



$k_s$ (mm)	زبری مؤثر نیکورادزه	$t$	ضخامت لایه سطحی
$\tau$ (Pa)	متوسط تنش برشی بستر	$U_*$ (m/s)	سرعت برشی متوسط جریان
$\tau_{*cr}$	پارامتر شیلدز بحرانی	$U$ (m/s)	سرعت متوسط جریان
$\gamma_s$ (N/m <sup>3</sup> )	وزن مخصوص رسوب	$U_1$ (m/s)	سرعت جریان در ۲۰ درصد عمق
$\gamma$ (N/m <sup>3</sup> )	وزن مخصوص آب	$U_2$ (m/s)	سرعت جریان در ۸۰ درصد عمق
$Sg = \frac{\gamma_s}{\gamma} = 2.65$	وزن مخصوص نسبی	$C$	ضریب شزی
$u$ (m <sup>2</sup> /s)	لزجت سینماتیکی آب	$n$	ضریب مانینگ
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	چگالی آب	$S$	شیب بستر
$\sigma = \sqrt{(d_{84}/d_{16})}$	انحراف معیار هندسی توزیع اندازه ذرات	$S_f$	شیب خط انرژی
$dh/dx$	تغییرات سطح آب در یک بازه	$g$ (m/s <sup>2</sup> )	شتاب گرانش
$Fr$	عدد فرود جریان	$N$	غیریکنوختی مقطع کانال
$F_p$	عدد فرود ذره	$\eta$	ضریب اثر شکل هندسی
$Re_* = (U_* d_{50}/\nu)$	عدد رینولدز ذره	$\kappa$	مقطع کانال بر مقاومت جریان ثابت جهانی ون کارمن

## منابع

اخروی، س.س.، افضل‌مهر، ح.، نظیری، د. و شهرکی، ن. ۱۳۹۲. 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.

Afzalimehr, H and V. Ferro. 2000. Discussion on friction factor for gravel-bed channel with high boulder concentration. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(11): 856-858.

Afzalimehr, H. 2010. Effect of flow non-uniformity on velocity and turbulence intensities in flow over a cobble-bed. *Hydrological Processes*, 24: 331-341.

Afzalimehr, H., V.P. Singh, Fazel Najafabadi, E. 2010. Determination of form friction factor. *Journal of Hydrologic Engineering*, 15(3): 237-243.

Bathurst, J.C. 1985. Flow resistance estimation in mountain rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111: 625-643.

Buffington, J.M and D. Montgomery. 1999. A procedure for classifying textural facies in gravel-bed rivers. *Water Resources Research*, 35(6): 1903-1914.

Carling, P.A. 1991. An appraisal of the velocity-reversal hypothesis for stable pool-riffle sequences in the river severn, England. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16(1): 19-31.

Church, M and M.A. Hassan. 2002. Mobility of bed material in Harris Creek. *Water Resources Research*, 38(11): 1237, doi:10.1029/2001WR000753.

Church, M., M.A. Hassan, J.F. Wolcott. 1998. Stabilizing self-organized structures in gravel-bed stream channels: field and experimental observations. *Water Resources Research*, 34: 3169-3179.

Constantinescu, G., M. Garcia and D. Hanes. 2016. *River Flow*. ISBN 9781138029132- CAT# K27572.

Correia, L and W.H. Graf. 1988. Grain-size distribution and armoring in gravel-bed rivers. Activities report of the hydraulics research laboratory, École Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Dey, S and A. Kumar. 2002. Initiation of shell motion on sand beds: An experimental study. *International Journal of Sediment Research*, 17(4): 286-297.



- Dey, S and U.V. Raju .2002. Incipient motion of gravel and coal beds. Sadhana, Academy Proceedings in Engineering Sciences, Indian Academy of Sciences, 27: 559-568.
- Diplas, P. 1987. Bed load transport in gravel-bed streams. Journal of Hydraulic Engineering, 113(3): 277-291.
- Diplas, P. 1992. Discussion of Experimental investigation of the effect of mixture properties on transport dynamics. Dynamics of gravel bed rivers, P. Billi, RD. Hey, CR. Thorne and P. Tacconi, eds., Wiley, Chichester, UK, 131-135.
- Fedele, J.J and M.H. Garcia. 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.
- Ferguson, R. 2007. Flow resistance equations for gravel- and boulder-bed streams, Water Resources Research, 43, W05427, doi:10.1029/2006WR005422.
- Froehlich, D.C. 1995. Armor-limited clear-water contraction scour at bridges. Journal of Hydraulic Engineering, 21(6): 490-493.
- Garcia, M.H. 2008. Section 2: Sediment transport and morphodynamics. ASCE manual of practice 110: Sedimentation engineering, MH Garcia, ed., ASCE, Reston, Va., 2.21-2.63.
- Gessler, J. 1990. Friction factor of armored river beds. Journal of Hydraulic Engineering, 116(4): 531-542.
- Graf, W.H and L. Suszka. 1987. Sediment transport in steep channels. Journal of hydroscience and hydraulic engineering, 5(1):11-26.
- Griffiths, G.A. 1989. Flow resistance in gravel channels with mobile beds. Journal of Hydraulic Engineering, 115(3): 340-355.
- Jarrett, R.D. 1991. Hydraulic of mountain rivers. Channel flow resistance: Centennial of Manning's formula, BC. Yen, ed., Water Resources, Littleton, Colo., 287-298.
- Julien, P.Y. 1995. Erosion and Sedimentation. Cambridge University Press, UK.
- Keulegan, G. H. 1938. Laws of turbulent flow in open channel Journal of research of the National Bureau of Standards. 1151(21): 707-741.
- Lamb, M.P., W.E. Dietrich and J.G. Venditti. 2008. Is the critical Shields stress for incipient sediment dependent on channel-bed slope? Journal of Geophysical Research, 113, F02008, doi:10.1029/2007JF000831.
- Mao, L., J.R. Cooper and L.E. Frostick. 2011. Grain size and topographical differences between static and mobile armour layers. Earth Surface Processes and Landforms, 36: 1321-1334.
- Namaee, M.R., Sui, J. and Whitcombe, T. 2017. A revisit of different models for flow resistance in gravel-bed rivers and hydraulic flumes. International Journal of River Basin Management, 15(3): 277-286.
- Oreizi, Z., H. AfzaliMehr, V.P. Singh and S.S. Okhravi. 2014. Investigation of particle-size distribution and friction factor for a gravel-bed river: Marbar. Journal of River Engineering, 2(3): 1-38.
- 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.
- Strom, K., A.N. Papanicolaou, N. Evangelopoulos and M. Odeh. 2004. Microforms in gravel bed rivers: formation, disintegration, and effects on bed load transport. Journal of Hydraulic Engineering, 130(6): 554-567.
- Sui, J., J. Wang, Y. He and F. Krol. 2010. Velocity profiles and incipient motion of frazil particles under ice cover. International Journal of Sediment Research, 25(1): 39-51.
- Van Rijn, L.C. 1982. Equivalent roughness of alluvial bed. Journal of Hydraulics Division 108HY10, 1215-1218.
- Wolman, M.G. 1954. A method of sampling coarse river-bed material. EOS, Transactions American Geophysical Union 35, 951-956.





Yen, B.C. 1991. Hydraulic resistance in open channels. Channel flow resistance: Centennial of Manning's formula, BC. Yen, ed., Water Resource, Highlands Ranch, Colo., 1-135.



## The Effects of Armoring Process on Flow Resistance in Coarse-Bed Rivers

Saeid Okhravi<sup>1</sup> and Saeed Gohari<sup>2</sup>

### Abstract

Friction factor as an index for flow resistance depends on grain size and bed forms in coarse-bed rivers. A wide range of particle sizes located in these rivers causes development of the armor layer and cluster structures, which have great effects on friction factor. In this study, coupling effects between the armoring process and the friction factor due to an armor layer have been investigated. Therefore, considering logarithmic velocity distribution characteristics, the total friction factor was determined. Then, grain friction factor was determined by the Keulegan and the Shields parameter methods and results were compared. Finally, form friction factor was determined by subtracting the grain friction factor from the total one. Analysis of results showed that the friction factor is rather independent of grain-size distribution of the material forming the bed and the major controlling parameter is the slope of the energy grade line. These unexpected results are due to the coupling of the friction factor with the incipient motion problem and the rearrangement of the grains of the coarsest fraction in the armor layer. Also, the results showed that making and development of the armor layer accompanied with clusters of particles caused an increase in the relative roughness of the bed and a reduction in the relative submergence resulting an augmentation in flow resistance and bed stability. Field observations demonstrated that rivers could change the critical Shields stress due to making equal mobility of coarse and fine sediments.

**Keywords:** Relative submergence, Shields parameter, Armor layer, Friction factor, Flow resistance

---

1- PhD Candidate, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran, [S.okhravi94@basu.ac.ir](mailto:S.okhravi94@basu.ac.ir)

2-Assistant Professor, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran, [S.gohari@basu.ac.ir](mailto:S.gohari@basu.ac.ir) (Corresponding Author)