

## بررسی آزمایشگاهی تأثیر انتقال بار بستر بر مقاومت جریان در بسترهای فرسایشی با شیب تند

احسان حاجی بابائی<sup>۱</sup>، سیدعباس حسینی<sup>۲\*</sup> و مجتبی صانعی<sup>۳</sup>

۱ و ۲- به ترتیب: دانش‌آموخته دکتری؛ و استادیار گروه مهندسی عمران آب، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳- دانشیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران  
تاریخ دریافت: ۹۶/۱۱/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۴/۲۶

### چکیده

تعیین ضریب اصطکاک در بسترهای فرسایش‌پذیر اهمیت زیادی در طراحی کانال‌های آبرفتی دارد. در خصوص پارامترهای مؤثر بر ضریب اصطکاک در بسترهای غیر فرسایشی، تاکنون مطالعات گسترده‌ای صورت گرفته است. در این تحقیق با اجرای مدل آزمایشگاهی در بسترهای فرسایش‌پذیر، پارامترهای شیب بستر و میزان انتقال بار بستر بر ضریب اصطکاک بستر بررسی شده است. آزمایش‌ها در دبی‌های ۰/۹۰ تا ۴/۷۵ لیتر در ثانیه و شیب‌های ۲، ۳ و ۵ درصد روی بار بستر از ذرات غیر چسبنده یکنواخت با دانه‌بندی با قطرهای متوسط ۱/۷ و ۳/۲۹ میلی‌متر اجرا شده و عدد رینولدز برشی در محدوده ۸۲ تا ۳۴۳، عدد فرود حاصل از ۰/۹۳ تا ۱/۵۱ و دبی بی‌بعد انتقال بار بستر در محدوده ۰/۰۰۴ تا ۰/۳۱۱ به‌دست آمده است. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد بین شیب سه تا شیب پنج درصد، ضریب اصطکاک بستر و عدد رینولدز برشی به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد در حالی که بین شیب دو تا سه درصد این افزایش چندان قابل توجه نیست. با تحلیل نتایج آزمایشگاهی مشخص شده است با افزایش میزان انتقال بار بستر، ضریب اصطکاک بدون حرکت بار بستر یا مقاومت اصطکاکی جریان ( $f_c$ ) کاهش و افت اصطکاک ناشی از حرکت بار بستر یا مقاومت حرکت بار بستر ( $f_m$ ) افزایش می‌یابد. به کمک آنالیز ابعادی، پارامترهای تأثیرگذار بر ( $f_m$ ) بررسی گردید و رابطه‌ای تجربی برای تعیین  $f_m$  ارائه و با نتایج آزمایشگاهی محققان پیشین صحت‌سنجی شد و نتایج قابل قبولی به‌دست آمد.

### واژه‌های کلیدی

شیب بستر، ضریب اصطکاک بستر، عدد رینولدز برشی

### مقدمه

است (Smart & Jaeggi, 1983; Rickenmann, 1990; Song *et al.*, 1998; Bergeron & Carbonneau, 1999; Omid *et al.*, 2003; Gao & Abrahams, 2004; Campbell *et al.*, 2005; Mahdavi & Omid, 2004; Recking *et al.*, 2008). بر اساس تئوری لایه مرزی مقاومت جریان برای بسترهای زبر از رابطه ۱ تعیین می‌شود (Song *et al.*, 1998) نسبت  $U/u^*$  به‌منظور محاسبه ضریب اصطکاک  $f$  استفاده می‌شود.

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{U}{u^*} = L_m + \frac{1}{k_m} \ln\left(\frac{R}{Z}\right) \quad (1)$$

شناخت انتقال بار بستر اهمیت زیادی در مهندسی هیدرولیک دارد. رسوب حمل شده با جریان آب موجب تغییراتی در خصوصیات ریخت‌شناسی رودخانه‌ها و مسائل محیط زیستی می‌شود. پیش‌بینی فرآیند انتقال رسوب در رودخانه‌ها مستلزم مطالعه دقیق پارامترهای مؤثر در جریان‌های انتقال بار بستر است و از این‌رو شناخت عوامل مؤثر بر مقاومت جریان در فرآیند انتقال بستر اهمیت زیادی دارد. تحقیقات آزمایشگاهی درباره تأثیر انتقال بار بستر بر مقاومت جریان و ضریب اصطکاک بستر فراوان

که در آن،

$U$  = سرعت جریان (متر بر ثانیه)؛  $u$  = سرعت برشی (متر بر ثانیه)؛  $R$  = شعاع هیدرولیکی (متر)؛  $K_m$  = ضریب ثابت ون کارمن (بدون بعد)؛  $L_m$  = ضریب ثابت انتگرال (بدون بعد) و در محدوده ۶ تا ۶/۵؛  $Z$  = اندازه زبری بستر (متر) معادل  $Z = K_s D_{50}$  (که  $D_{50}$  = اندازه ذراتی از مواد بستر که ۵۰ درصد مواد بستر از آن ریزترند) و  $K_s$  = ضریب ثابت (بدون بعد).

به‌طور کلی در کانال‌های فرسایش‌پذیر یا متحرک، افت اصطکاکی ( $f$ ) ناشی از فرم بستر و اصطکاک سطحی است که اصطکاک سطحی به دو بخش تقسیم می‌شود: اصطکاک ناشی از حرکت ذرات ( $f_m$ ) و اصطکاک ناشی از زبری ذرات یا ( $f_c$ ) که در بسترهای بدون حرکت بار بستر اتفاق می‌افتد. در تحقیقات قبلی برای تعیین ضریب اصطکاک ناشی از حرکت بار بستر ( $f_m$ ) از دو روش غیرخطی و خطی استفاده شده است.

سانگ و همکاران (Song et al., 1998) از رسوبات با قطر ۱۲/۳ میلی‌متر در آزمایش‌های کانال باز استفاده و با روش غیرخطی، اصطکاک ناشی از حرکت بار بستر را بر حسب میزان جابه‌جایی بار بستر و دانه‌بندی بی‌بعد ذرات تعیین کردند. این محققان از رابطه داریسی  $f = 8gSR/U^2$  ضریب اصطکاک در برابر جریان را اندازه‌گیری و نتیجه گرفتند که با افزایش جابه‌جایی بار بستر، مقاومت جریان و در نتیجه ضریب اصطکاک بستر افزایش می‌یابد (در رابطه داریسی،  $S$  = شیب؛  $R$  = شعاع هیدرولیکی؛  $U$  = سرعت جریان و  $g$  = شتاب ثقل). برگرون و کاربنوا (Bergeron & Carbnneau, 1999) با اجرای آزمایش‌هایی مشابه با آزمایش‌های سانگ و همکاران (Song et al., 1998)، نتایج تحقیقات آنها را تأیید کردند. گائو و آبراهامز (Gao & Abrahams, 2004) برای تعیین ( $f_m$ ) از روش خطی استفاده کردند. آنها معتقدند روش غیرخطی دارای خطای زیادتری است زیرا تعیین ( $f_c$ ) با عدم قطعیت همراه است و

بنابراین از ( $f-f_c$ ) برای تعیین ( $f_m$ ) استفاده کردند. این محققان با ترکیب نتایج حاصل از تحقیقات خود و داده‌های آزمایشگاهی سانگ و همکاران (Song et al., 1998) و با استفاده از رگرسیون غیر خطی، ضریب اصطکاک برای جریان آب روی بستر آبرفتی ( $f_m$ ) را تابعی از نسبت عمق جریان به اندازه متوسط ذرات  $H/D_{50}$ ، قطر بی‌بعد ذرات و میزان جابه‌جایی ذرات بار بستر ارائه دادند. هو و آبراهامز (Hu & Abrahams, 2004) با ارائه رابطه ۲ و با اعمال دو پارامتر شیب ( $S$ ) و عدد فرود ( $F_r$ ) در برآورد ( $f_m$ )، این نتایج را توسعه دادند.

$$f_m = 267.3D_{50}^{-1} \left(\frac{H}{D_{50}}\right)^{0.5} F_r^{-3} S^2 \quad (2)$$

که در آن،

قطر بی‌بعد ذرات از رابطه  $D^* = D_{50} \left[\frac{g(s-1)}{v^2}\right]^{1/3}$  تعیین می‌شود.  $D_{50}$  = اندازه ذراتی از مواد بستر که ۵۰ درصد مواد بستر از آن ریزترند؛  $g$  = شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه)؛  $v$  = لزوجت سینماتیکی آب (مترمربع بر ثانیه) و  $S$  = نسبت چگالی ذرات رسوب به چگالی آب زلال.

هو و آبراهامز (Hu & Abrahams, 2005) می‌گویند ضریب اصطکاک در بسترهای متحرک بیشتر است تا در بسترهای ثابت زیرا برخورد و حرکت ذرات در بسترهای متحرک باعث مقاومت بیشتری در جریان می‌شود. این محققان مطالعات خود را برای دو حالت بستر ثابت و بستر متحرک در شیب در محدوده ۰/۰۵۵ تا ۰/۱۶۶ دنبال کردند. رکینگ و همکاران (Recking et al., 2008) با مطالعه آزمایشگاهی انتقال بار بستر در شیب‌های ۱ تا ۹ درصد با استفاده از نتایج آزمایشگاهی به‌دست آمده و نتایج تحقیقات برخی از محققان پیشین از جمله اسمارت و جگی (Smart & Jaeggi, 1983) و کائو (Cao, 1985)، ضریب اصطکاک بستر را در حالت‌های بدون حرکت بار بستر یا مقاومت ناشی از زبری ذرات ( $f_c$ ) و ضریب اصطکاک ناشی

را فرموله کردند. بهرامی یاراحمدی و شفافی بجستان (Bahrami-Yarahmadi & Shafai-Bejestan, 2010) با استفاده از مدل آزمایشگاهی، اثر شکل ذرات بستر را بر ضریب اصطکاک بررسی و از ذرات درشت‌دانه طبیعی و شکسته و مصنوعی کروی استفاده کردند و نتیجه گرفتند که مقدار ضریب اصطکاک ذرات شن شکسته تیز گوشه، در مقایسه با ذرات طبیعی نسبتاً گرد گوشه و ذرات مصنوعی کاملاً کروی، بیش تر است. گادیو و همکاران (Gaudio *et al.*, 2011) با بررسی ضریب اصطکاک و ضریب ون کارمن ( $K_m$ ) در جریان بار بستر در کانال‌های باز و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و نیز نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی سانگ و همکاران (Song *et al.*, 1998)، ضریب ون کارمن را در محدوده  $0/3$  تا  $0/4$  به دست آوردند. این محققان  $K_m = 0/3$  را برای جریان‌های با انتقال بار بستر بالا و  $K_m = 0/4$  را برای جریان‌های بدون حرکت بار بستر به دست آوردند. پاول (Powell, 2014) با تحلیل روش‌های مانینگ و پروفیل سرعت، مقاومت جریان در حرکت بار بستر را بررسی کرد. پیش‌بینی مقاومت جریان و ضریب اصطکاک بستر در کانال‌ها با بستر فرسایشی و آبراهه‌های آب‌رفتی مشکلاتی دارد. هنگامی که تنش برشی متوسط کف از تنش برشی بحرانی بیشتر شود و ذرات کف شروع به حرکت کنند، بستر اولیه تغییر می‌کند. در این حالت، پیش‌بینی ضریب اصطکاک در مقابل جریان با یک ضریب ثابت مشکل است زیرا بارهای رسوبی در حال حرکت که بخشی به صورت بار بستر و بخشی دیگر به صورت بار معلق انتقال می‌یابند، بر مشخصات سیال تأثیر می‌گذارند (Powell, 2014). در بسترهای فرسایشی، لازم است حرکت بارهای رسوبی و تغییرات ضریب اصطکاک بررسی و اثر متقابل آنها بر جریان در نظر گرفته شود. بر این اساس اهداف این تحقیق به این شرح است:

۱- بررسی تأثیر شیب بر ضریب اصطکاک بستر و عدد رینولدز برشی در بسترهای فرسایشی، ۲- مطالعه تغییرات

از حرکت بار بستر ( $f_m$ ) ارائه دادند که در روابط ۳ و ۴ دیده می‌شود.

$$\sqrt{\frac{8}{f_c}} = 3.6 + 3.2 \ln\left(\frac{R}{D_{50}}\right) \quad (3)$$

$$\sqrt{\frac{8}{f_m}} = 0.67 + 3.2 \ln\left(\frac{R}{D_{50}}\right) \quad (4)$$

نحوه تقسیم‌بندی برای حرکت بار بستر بدین‌گونه در نظر گرفته شد که در حالت  $\theta \geq 2.6\theta_c$  انتقال رسوب قابل توجهی در بستر کانال ایجاد می‌شود و مشخصات هیدرولیکی جریان و از جمله مقاومت جریان و ضریب اصطکاک بستر را تحت تأثیر قرار خواهد داد و گرنه حرکت بار بستر ناچیز است ( $\theta < 2.6\theta_c$ ) پارامتر شیلدز بحرانی و برابر با  $0/057$  در نظر گرفته شده است). رکینگ و همکاران (Recking *et al.*, 2008) در نتایج خود با تحلیل اثر شیب بر ضریب اصطکاک بستر نتیجه گرفتند که با افزایش شیب کانال از ۱ تا ۹ درصد، ضریب اصطکاک بستر متحرک افزایش می‌یابد.

رکینگ و همکاران (Recking *et al.*, 2008) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی اسمارت و جگی (Smart & Jaeggi, 1983) و کائو (Cao, 1985) رابطه پروفیل سرعت (رابطه ۱) را تحلیل کردند، پارامتر  $Z = K_s D_{50}$  را برای دو حالت بدون حرکت بار بستر ( $\theta < 2.6\theta_c$ ) و با حرکت بار بستر ( $\theta \geq 2.6\theta_c$ ) بررسی کردند و برای جریان بدون حرکت بار بستر  $Z = 2/1 D_{50}$  و برای جریان با حرکت بار بستر  $Z = 5.3 D_{50}$  را پیشنهاد دادند و نتیجه گرفتند که پارامتر زبری یا همان  $Z$  در حالت جریان با بستر متحرک  $2/5$  برابر از حالت جریان بدون حرکت بار بستر است (Recking *et al.*, 2008). خولار (Khullar, 2002) و خولار و همکاران (Khullar *et al.*, 2007) تأثیر بار شستشو را بر ضریب زبری جریان در بسترهای فرسایشی با اجرای مدل آزمایشگاهی بررسی و تغییرات زبری تحت تأثیر بار معلق

هیدرولیکی (متر)،  $g$ : شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه)،  $\rho$ : چگالی آب زلال (کیلوگرم بر مترمکعب) و  $\rho_s$ : چگالی ذرات رسوب (کیلوگرم بر مترمکعب) که در رابطه ۵ نشان داده شده است.

$$f_m = f_1(\rho, \rho_s, \mu, g, R, u_*, U, S, D) \quad (5)$$

با استفاده از آنالیز ابعادی و تئوری باکینگهام (روابط ۶ تا ۹)؛

$$f_m = f_1\left(\frac{\rho}{\rho_s - \rho}, U, u_*, \frac{\tau}{\rho g D_{50}}, \frac{D_{50}}{R}, D^*\right) \quad (6)$$

$$\Pi_2 = \frac{R}{D_{50}} \quad (7)$$

$$\Pi_1 = \frac{\rho g D_{50}}{\tau} \times \frac{\rho}{\rho_s - \rho} \times D^* = \frac{\rho g D_{50}}{\tau} \times \frac{\rho}{\rho_s - \rho} \times D_{50} \left[ \frac{g \left( \frac{\rho}{\rho_s - \rho} \right)}{v^2} \right]^{\frac{1}{3}} = \frac{\rho^2 g R S D_{50}^2}{\mu^2} = \frac{\rho^2 u_*^2 D_{50}^2}{\mu^2} = R_e^{-2} \quad (8)$$

$$\Pi_4 = \frac{u}{u_*} = \sqrt{\frac{u^2}{u_*^2}} = \sqrt{\frac{u^2}{g R S}} = \sqrt{\frac{u^2}{g R}} \sqrt{\frac{1}{S}} = F_r S^{-0.5} \quad (9)$$

تحقیقات مهندسی رودخانه و سواحل) و با ایجاد تغییراتی در آن، استفاده شده است. این فلوم به طول ۸ متر و عرض ۲۵/۵ سانتی‌متر، در ارتفاع ۱/۲۰ متری از کف زمین نصب شده است. سازه اصلی فلوم فلزی اما دیواره‌ها و کف پلکسی گلاس است. شیب این فلوم بین ۰ تا ۱۰ درصد می‌تواند تغییر کند.

در شکل ۱، چیدمان کانال آزمایشگاهی به‌همراه تجهیزات آزمایشی نشان داده شده است. برای بار بستری از دو نوع مصالح با دانه‌بندی یکنواخت با قطرهای میانگین  $(D_{50})$  ۱/۷، ۳/۲۹ میلی‌متر (که مصالح I، II نامیده می‌شوند) استفاده شده است. این مصالح از الک کردن شن و ماسه طبیعی در دسترس انتخاب شده است. چگالی

ضریب اصطکاک ناشی از حرکت بار بستری در مقابل عدد رینولدز برشی و میزان انتقال رسوبات و ۳-ارائه رابطه‌ای تجربی برای تعیین ضریب اصطکاک ناشی از حرکت بار بستری در شیب‌های تند در بسترهای فرسایشی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی.

## مواد و روش‌ها

### تحلیل ابعادی

پارامترهای زیادی در ضریب اصطکاک ناشی از جابه‌جایی ذرات بستری ( $f_m$ ) مؤثرند، با توجه به نتایج بررسی‌های محققان، این پارامترها عبارت‌اند از  $\mu$ : لزوجت دینامیکی سیال (نیوتن ثانیه بر مترمربع)،  $D$ : قطر متوسط ذرات بستری (متر)،  $S$ : شیب،  $U$ : سرعت جریان (متر بر ثانیه)،  $u^*$ : سرعت برشی (متر بر ثانیه)،  $R$ : شعاع

بنابراین رابطه ۵ را می‌توان به‌صورت رابطه ۱۰ نوشت:

$$f_m = f_1(F_r, R_e^*, S, R/D_{50}) \quad (10)$$

که در آن:

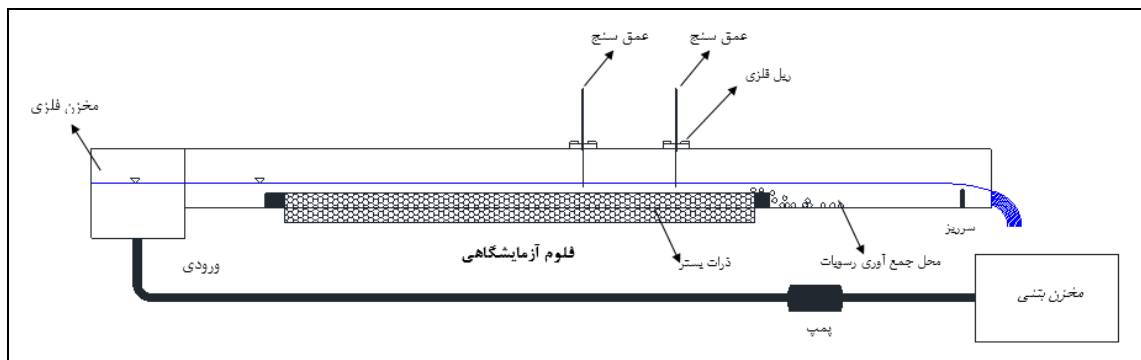
$F_r$  = عدد فرود؛  $S$  = شیب،  $R_e^* =$  عدد رینولدز برشی و  $\frac{R}{D_{50}}$  = نسبت شعاع هیدرولیکی به اندازه متوسط ذرات است.

### تجهیزات آزمایشگاهی و روش اجرای آزمایش‌ها

برای اجرای آزمایش‌ها از فلوم موجود در آزمایشگاه هیدرولیک پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری (گروه

ذرات بستر در میانه فلوم به طول ۴ متر و به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر تراز شده است. دو متر انتهایی کانال به عنوان مخزن ذخیره رسوبات جابه‌جا شده در خلال آزمایش، استفاده شده است. جریان آب با پمپ از مخزن بتنی در پایین دست فلوم به مخزنی فلزی در ابتدای کانال که آرام‌کننده جریان نیز هست، هدایت می‌شود.

اندازه‌گیری شده مصالح I، II به ترتیب ۲۶۵۷ و ۲۶۴۵ کیلوگرم در متر مکعب است. مصالح یکنواخت I در محدوده ماسه خیلی درشت و مصالح II در محدوده شن ریز قرار دارند. انحراف معیار هندسی<sup>۱</sup> ذرات بستر معادل  $\sigma_g = \sqrt{\frac{D_{84}}{D_{16}}}$  یعنی کمتر از ۱/۳۳ است و از این رو می‌توان آنها را دانه‌بندی یکنواخت در نظر گرفت (Dey & Debnath, 2001).



شکل ۱- دیاگرام چیدمان فلوم آزمایشگاهی همراه با تأسیسات وابسته

فلوم تنظیم و دبی مورد نظر به سیستم وارد می‌شود. تنظیم جریان با پمپ است که با شیر تنظیم، دبی جریان کنترل و با قرائت سطح آب با سرریزهایی مستطیلی شکل در ورودی و خروجی فلوم به منظور کنترل مضاعف دبی هر آزمایش، اندازه‌گیری‌ها دنبال می‌شود. با تنظیم شیب و دبی، پروفیل یکنواخت سطح آب روی رسوبات ایجاد و آزمایش آغاز می‌شود. این موضوع با دو عمق‌سنج که در فواصل یک متری از ابتدا و انتهای فلوم قرار دارند تا انتهای هر آزمایش کنترل می‌شود. هر آزمایش در یک شیب و دبی مشخص روی یک بستر فرسایش‌پذیر با دانه‌بندی یکنواخت اجرا شد. پس از اتمام هر آزمایش برای دانه‌بندی I و II، شیب کانال تغییر داده شد و آزمایش‌ها برای سه نوع شیب ادامه یافت.

در شکل ۲ تصاویری از جریان دائمی و یکنواخت عبوری از مقطع بستر فرسایش‌پذیر در خلال آزمایش‌ها نشان داده شده است.

هر آزمایش با داشتن یکی از دو نوع مصالح I و II و شیب مشخص (شیب ۲، ۳ و ۵ درصد) و با برقراری دبی در بالادست اجرا می‌شود. در شروع هر آزمایش از یک پمپ کف‌کش برای تزریق دبی در پایین دست کانال (در ۲ متری انتهایی کانال)، به منظور جلوگیری از حرکت ناگهانی ذرات بستر استفاده می‌شود. به گونه‌ای که در شیب صفر درجه، با مسدود کردن نمودن خروجی کانال در پایین دست به وسیله دریچه کنترل و با برقراری جریان با دبی کم از بالادست و وجود جریان در پایین دست، باعث کنترل جریان و عدم حرکت رسوب در فلوم می‌شود. در شیب صفر درجه تا زمانی که جریان به صورت یکنواخت و دائمی برقرار باشد ارتفاع بستر بدون حرکت و ثابت باقی می‌ماند. مطابق شکل ۱ پس از ایجاد تعادل در جریان، پمپ تغذیه از پایین دست سیستم حذف و دریچه کنترل به آرامی باز می‌شود. جریان با سرریز شدن از دریچه کنترل به مخزن بتنی وارد و پس از آن به آرامی شیب



شکل ۲- جریان دائمی و یکنواخت عبوری از مقطع بستر فرسایش‌پذیر

(کیلوگرم بر مترمکعب) و چگالی نسبی  $\rho_s / \rho$  و  $q_b = S$  حجم بار بستر انتقال یافته در واحد عرض (مترمکعب بر ثانیه بر متر).

عدد رینولدز جریان  $(Re)$  از رابطه  $Re = (4UH/\nu)$  به دست می‌آید که در آن  $U$  سرعت جریان بر حسب متر بر ثانیه،  $H$  عمق متوسط جریان (متر) و  $\nu$  لزوجت سینماتیکی سیال است که با توجه به وابستگی به دمای آب، حدوداً مقدار ثابت  $10^{-7} \times 9/63$  متر مربع بر ثانیه به دست آمده است. در کلیه نتایج آزمایشگاهی این تحقیق  $Re > 2000$  و از این رو کلیه آزمایش‌ها از نوع آشفته است. عدد رینولدز بستر از رابطه  $Re^* = (u^* D_{50} / \nu)$  به دست می‌آید.  $u^*$  سرعت برشی جریان (متر بر ثانیه) است که با توجه به رابطه ۱۳ حاصل می‌شود.

$$u^* = \sqrt{gRS} \quad (13)$$

### نتایج و بحث

شرایط اولیه آزمایش‌ها و اعداد بدون بعد مهم در جدول ۱ ارائه و ۴۳ سری آزمایش برای سه شیب ۲ و ۳ و ۵ درصد اجرا شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده، عدد رینولدز بستر در آزمایش‌های در محدوده  $Re^* > 82$  است و در نتیجه کلیه نتایج در لایه بندی بستر از نوع زبر هستند.

در جدول ۲، نتایج آزمایش‌ها ارائه شده است.  $D_{50}$  قطر میانگین ذرات رسوبی بر حسب متر،  $S$  شیب کانال،  $Q$  دبی جریان بر حسب لیتر در ثانیه،  $H$  عمق جریان،  $U$  سرعت جریان (متر بر ثانیه) که از نسبت دبی به سطح مقطع

در حین آزمایش‌ها، ارتفاع آب روی بستر فرسایشی نسبتاً یکنواخت حفظ شد و با بالا رفتن میزان انتقال بار بستر، رسوبات به محدوده فرسایش‌پذیر (مشابه با آزمایش‌های خولار و همکاران (Khullar et al., 2007) تزریق و سعی شد یکنواختی جریان همواره حفظ شود. عمق متوسط جریان در مدت زمان اجرای آزمایش در نقاط کنترل مشخص (حدود ۱۵ نقطه) با اشل‌های نقطه‌ای<sup>۱</sup> با دقت اندازه‌گیری  $\pm 0/1$  میلی‌متر که روی ریل فلزی حرکت می‌کنند، اندازه‌گیری شده است. با به کار بردن روش میانگین‌گیری، عمق متوسط جریان در هر آزمایش به دست می‌آید و سرعت متوسط جریان، تنش بی بعد و ضریب اصطکاک بار بستر، با توجه به دبی جریان، محاسبه می‌شوند. در انتهای هر آزمایش و در فاصله ۲ متری انتهای کانال، میزان ذرات بستر انتقال یافته به دست می‌آید. نمونه‌های جمع‌آوری شده در انتهای فلوم پس از شستشو و خشک شدن در خشک‌کن، با ترازو وزن شده و میزان رسوب انتقال یافته تعیین می‌شود.

در هر مرحله تنش بی بعد  $\theta$  و دبی بی بعد  $\phi$  با استفاده از روابط ۱۱ و ۱۲ محاسبه شد.

$$\theta = \frac{\rho g R S}{(\gamma_s - \gamma) D_{50}} \quad (11)$$

$$\phi = \frac{q_b}{\sqrt{(s-1) g D_{50}^3}} \quad (12)$$

که در آنها:

$S$  = شیب؛  $g$  = شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه)؛  $R$  = شعاع هیدرولیکی (متر)؛  $\rho_s$  = وزن مخصوص ذرات رسوب (کیلوگرم بر مترمکعب)؛  $\rho$  = وزن مخصوص آب زلال

بررسی آزمایشگاهی تأثیر انتقال بار بستر بر مقاومت...

اصطکاک  $f$  استفاده شده است.  $F_r$  عدد فرود است و برای هر مرحله از آزمایش،  $\theta$  تنش برشی بی‌بعد و  $\Phi$  دبی بی‌بعد انتقال بار بستر به ترتیب از رابطه ۱۱ و ۱۲ به‌دست آمده‌اند.

جریان به‌دست آمده است و پارامتر  $\frac{R}{D_{50}}$  نسبت شعاع هیدرولیکی به اندازه متوسط ذرات را نشان می‌دهد. با توجه به رابطه ۱، نسبت  $U/u^*$  به‌منظور محاسبه ضریب

جدول ۱- شرایط اولیه آزمایش‌ها و اعداد بدون بعد مرتبط

پارامتر	محدوده
شیب	۲٪ و ۳٪ و ۵٪
قطر میانگین (متر)	۱/۷-۳/۲۹
دبی جریان (لیتر بر ثانیه)	۰/۹۰-۴/۷۵
عدد فرود ( $F_r$ )	۰/۹۳-۱/۵۱
عدد رینولدز ذره ( $Re^*$ )	۸۲-۳۴۳
عدد شیلدز (Shields, 1936) ( $\theta$ )	۰/۰۶-۰/۳۰
پارامتر اینشتین (Einstein, 1942) ( $\Phi$ )	۰/۰۰۴-۰/۳۱۱

جدول ۲- مجموعه داده‌ها و نتایج آزمایشگاهی انتقال بار بستر

ردیف	قطر میانگین ذرات (متر)	شیب (متر/متر)	دبی (لیتر بر ثانیه)	سرعت (متر بر ثانیه)	نسبت شعاع هیدرولیکی بر قطر میانگین ذرات	سرعت برشی	نسبت سرعت برشی	ارتفاع جریان (سانتی-متر)	عدد فرود	عدد رینولدز ذره	تنش برشی بی‌بعد	دبی بی‌بعد انتقال بار بستر
۱	۰/۰۰۱۷	۰/۰۲	۳/۴۰	۰/۵۴۵	۱۳/۹۰	۸/۰۰	۲/۵	۱/۱۱	۱۲۰	۰/۱۶۸	۰/۰۵۰	۰/۰۵۰
۲	۰/۰۰۱۷	۰/۰۲	۲/۱۰	۰/۴۲۴	۱۱/۲۷	۶/۹۲	۲/۰	۰/۹۶	۱۰۸	۰/۱۳۶	۰/۰۲۰	۰/۰۲۰
۳	۰/۰۰۱۷	۰/۰۳	۲/۳۴	۰/۵۱۳	۱۰/۴۳	۷/۱	۱/۸	۱/۲۱	۱۲۸	۰/۱۸۹	۰/۰۶۳	۰/۰۶۳
۴	۰/۰۰۱۷	۰/۰۳	۴/۸۰	۰/۶۳۳	۱۶/۶۴	۶/۹۴	۲/۹	۱/۱۸	۱۶۱	۰/۳۰۱	۰/۰۹۲	۰/۰۹۲
۵	۰/۰۰۱۷	۰/۰۳	۱/۳۰	۰/۴۱۷	۷/۱۹	۶/۹۵	۱/۳	۱/۱۹	۱۰۶	۰/۱۳۰	۰/۰۵۶	۰/۰۵۶
۶	۰/۰۰۱۷	۰/۰۳	۱/۷۰	۰/۴۴۷	۸/۵۸	۶/۸۲	۱/۵	۱/۱۷	۱۱۶	۰/۱۵۵	۰/۰۵۶	۰/۰۵۶
۷	۰/۰۰۱۷	۰/۰۵	۱/۴۰	۰/۴۴۱	۷/۲۶	۵/۶۷	۱/۳	۱/۲۶	۱۳۷	۰/۲۱۹	۰/۲۰۲	۰/۲۰۲
۸	۰/۰۰۱۷	۰/۰۵	۱/۸۰	۰/۵۰	۷/۹۹	۶/۱۲	۱/۴	۱/۳۶	۱۴۴	۰/۲۴۱	۰/۲۱۴	۰/۲۱۴
۹	۰/۰۰۱۷	۰/۰۵	۱/۱۰	۰/۳۷۸	۶/۶۳	۵/۰۹	۱/۱	۱/۱۳	۱۳۱	۰/۲۰۰	۰/۱۷۰	۰/۱۷۰
۱۰	۰/۰۰۱۷	۰/۰۲	۰/۹۰	۰/۳۱۸	۶/۴۰	۶/۸۸	۱/۱	۰/۹۶	۸۲	۰/۰۷۷	۰/۰۱۵	۰/۰۱۵
۱۱	۰/۰۰۱۷	۰/۰۲	۲/۰۰	۰/۴۲۴	۱۰/۶۳	۷/۱۱	۱/۹	۰/۹۹	۱۰۵	۰/۱۲۸	۰/۰۲۴	۰/۰۲۴
۱۲	۰/۰۰۱۷	۰/۰۳	۱/۹۰	۰/۴۴۷	۹/۸۰	۶/۳۸	۱/۷	۱/۰۹	۱۲۴	۰/۱۷۷	۰/۰۵۰	۰/۰۵۰
۱۳	۰/۰۰۱۷	۰/۰۳	۲/۵۰	۰/۵۰۷	۱۰/۸۴	۶/۸۸	۱/۹	۱/۱۷	۱۳۰	۰/۱۹۶	۰/۰۷۹	۰/۰۷۹
۱۴	۰/۰۰۱۷	۰/۰۵	۲/۴۰	۰/۵۹۶	۹/۰۸	۶/۸۵	۱/۶	۱/۵۱	۱۵۴	۰/۲۷۴	۰/۲۶۵	۰/۲۶۵
۱۵	۰/۰۰۱۷	۰/۰۲	۳/۸۰	۰/۵۲۸	۱۵/۸۲	۷/۲۶	۲/۸	۱/۰۱	۱۲۷	۰/۱۹۳	۰/۰۵۵	۰/۰۵۵
۱۶	۰/۰۰۱۷	۰/۰۲	۲/۵۵	۰/۴۸۱	۱۱/۷۰	۷/۷۱	۲/۱	۱/۰۷	۱۰۹	۰/۱۴۳	۰/۰۲۵	۰/۰۲۵

ادامه جدول ۲- مجموعه داده‌ها و نتایج آزمایشگاهی انتقال بار بستر

ردیف	قطر میانگین ذرات (متر)	شیب (متر/متر)	دبی (لیتر بر ثانیه)	سرعت (متر بر ثانیه)	نسبت شعاع هیدرولیکی بر قطر میانگین ذرات	سرعت برشی نسبت سرعت بر (سانتی‌متر)	ارتفاع جریان (سانتی‌متر)	عدد فرود	عدد رینولدز ذره	تنش برشی بی بعد	دبی بی بعد انتقال بار بستر
۱۷	۰/۰۰۱۷	۰/۰۲	۱/۷۰	۰/۴۴۱	۸/۴۱	۸/۳۲	۱/۵	۱/۱۶	۹۲	۰/۱۰۳	۰/۰۲۱
۱۸	۰/۰۰۱۷	۰/۰۳	۳/۵۰	۰/۵۹۵	۱۳/۱۶	۷/۳۳	۲/۳	۱/۲۵	۱۴۱	۰/۲۴۱	۰/۱۳۴
۱۹	۰/۰۰۱۷	۰/۰۳	۲/۲۰	۰/۴۵۵	۱۰/۵۶	۶/۲۶	۱/۸	۱/۰۷	۱۲۷	۰/۱۹۳	۰/۰۸۶
۲۰	۰/۰۰۱۷	۰/۰۳	۲/۵۰	۰/۴۸۸	۱۱/۲۰	۶/۵۲	۲/۰	۱/۱۱	۱۳۰	۰/۲۰۵	۰/۰۹۶
۲۱	۰/۰۰۱۷	۰/۰۵	۱/۳۰	۰/۴	۷/۵۱	۵/۰۵	۱/۳	۱/۱۲	۱۳۸	۰/۲۲۹	۰/۲۳۶
۲۲	۰/۰۰۱۷	۰/۰۵	۲/۴۰	۰/۵۶۸	۹/۳۵	۶/۴۳	۱/۶	۱/۴۲	۱۵۴	۰/۲۸۵	۰/۳۱۱
۲۳	۰/۰۰۱۷	۰/۰۵	۱/۹۰	۰/۵۱۲	۸/۴۷	۶/۰۹	۱/۵	۱/۳۵	۱۴۶	۰/۲۵۸	۰/۲۷۳
۲۴	۰/۰۰۳۲۹	۰/۰۲	۲/۱۰	۰/۴۴۲	۵/۴۸	۷/۴۳	۱/۹	۱/۰۳	۲۰۳	۰/۰۶۷	۰/۰۰۴
۲۵	۰/۰۰۳۲۹	۰/۰۳	۱/۶۰	۰/۴۰۳	۴/۵۸	۶/۰۵	۱/۵	۱/۰۴	۲۲۸	۰/۰۸۴	۰/۰۱۰
۲۶	۰/۰۰۳۲۹	۰/۰۵	۱/۸۹	۰/۴۹۹	۴/۴۴	۵/۸۹	۱/۵	۱/۳۰	۲۸۹	۰/۱۳۵	۰/۰۴۸
۲۷	۰/۰۰۳۲۹	۰/۰۵	۳/۵۰	۰/۶۴۲	۶/۲۴	۶/۴۰	۲/۱	۱/۴۱	۳۴۳	۰/۱۹۰	۰/۰۷۶
۲۸	۰/۰۰۳۲۹	۰/۰۵	۲/۹۰	۰/۶۲۱	۵/۵۲	۶/۵۸	۱/۹	۱/۴۵	۳۲۳	۰/۱۶۸	۰/۰۶۸
۲۹	۰/۰۰۳۲۹	۰/۰۲	۱/۷۰	۰/۳۸۱	۵/۰۳	۶/۶۹	۱/۷	۰/۹۳	۱۹۵	۰/۰۶۱	۰/۰۰۴
۳۰	۰/۰۰۳۲۹	۰/۰۲	۳/۱۰	۰/۵۶۹	۶/۰۹	۹/۰۸	۲/۱	۱/۲۵	۲۱۴	۰/۰۷۴	۰/۰۰۵
۳۱	۰/۰۰۳۲۹	۰/۰۲	۳/۷۸	۰/۶۳	۶/۷۷	۹/۵۳	۲/۴	۱/۳۱	۲۲۶	۰/۰۸۲	۰/۰۰۸
۳۲	۰/۰۰۳۲۹	۰/۰۳	۲/۲۰	۰/۴۹۲	۵/۱۹	۶/۹۴	۱/۸	۱/۱۹	۲۴۲	۰/۰۹۵	۰/۰۱۲
۳۳	۰/۰۰۳۲۹	۰/۰۳	۳/۵۰	۰/۶۵۳	۶/۲۰	۸/۴۳	۲/۱	۱/۴۳	۲۶۵	۰/۱۱۳	۰/۰۱۴
۳۴	۰/۰۰۳۲۹	۰/۰۵	۱/۳۰	۰/۳۷۵	۳/۹۲	۴/۷۱	۱/۳	۱/۰۵	۲۷۲	۰/۱۱۹	۰/۰۴۲
۳۵	۰/۰۰۳۲۹	۰/۰۲	۲/۷۰	۰/۵۰۵	۶/۱۱	۸/۰۴	۲/۱	۱/۱۱	۲۱۲	۰/۰۷۵	۰/۰۰۶
۳۶	۰/۰۰۳۲۹	۰/۰۲	۳/۸۰	۰/۶۰۲	۷/۱۲	۸/۸۸	۲/۵	۱/۲۲	۲۲۹	۰/۰۸۸	۰/۰۰۹
۳۷	۰/۰۰۳۲۹	۰/۰۲	۱/۹۰	۰/۴۳۳	۴/۹۳	۷/۶۸	۱/۷	۱/۰۷	۱۹۰	۰/۰۶۱	۰/۰۰۵
۳۸	۰/۰۰۳۲۹	۰/۰۳	۲/۹۰	۰/۵۶۴	۵/۸۳	۷/۵۰	۲/۰	۱/۲۸	۲۵۳	۰/۱۰۷	۰/۰۱۳
۳۹	۰/۰۰۳۲۹	۰/۰۳	۱/۸۰	۰/۴۲۸	۴/۷۷	۶/۳۰	۱/۶	۱/۰۸	۲۲۹	۰/۰۸۸	۰/۰۱۰
۴۰	۰/۰۰۳۲۹	۰/۰۳	۳/۴۰	۰/۶۰۵	۶/۳۵	۷/۷۲	۲/۲	۱/۳۱	۲۶۴	۰/۱۱۷	۰/۰۱۷
۴۱	۰/۰۰۳۲۹	۰/۰۵	۲/۳۰	۰/۵۲	۵/۰۸	۵/۷۵	۱/۷	۱/۲۷	۳۰۵	۰/۱۵۶	۰/۰۵۷
۴۲	۰/۰۰۳۲۹	۰/۰۵	۳/۱۰	۰/۶۲۴	۵/۷۷	۶/۴۶	۱/۹	۱/۴۳	۳۲۶	۰/۱۷۷	۰/۰۷۷
۴۳	۰/۰۰۳۲۹	۰/۰۵	۱/۴۰	۰/۳۷۶	۴/۴۶	۴/۴۴	۱/۵	۰/۹۹	۲۸۶	۰/۱۳۷	۰/۰۴۹

با آنچه رکینگ و همکاران (Recking et al., 2008)، اسمارت و جگی (Smart & Jaeggi, 1983) و کائو (Cao, 1985) به دست آورده‌اند مقایسه شده است.

به منظور حصول اطمینان از نتایج آزمایش‌های این تحقیق، در جدول ۳ محدوده تنش برشی بی بعد و دبی بی بعد انتقال بار بستر اندازه‌گیری شده در شیب ۵ درصد



جدول ۳- مقایسه شرایط و نتایج آزمایشگاهی بین این تحقیق و تحقیقات محققان دیگر در شیب ۵ درصد

محقق	تعداد داده‌ها	اندازه متوسط ذرات (میلی‌متر)	محدوده عدد فرود ( $F_f$ )	محدوده عدد رینولدز بستر ( $R_{b0}$ )	تنش برشی بدون بعد ( $\theta$ )		دبی بی‌بعد انتقال بار بستر ( $\phi$ )	
					محدوده تنش برشی بدون بعد ( $\theta$ )	میانگین تنش برشی بدون بعد ( $\theta$ )	محدوده دبی بی‌بعد انتقال بار بستر ( $\phi$ )	میانگین دبی بی‌بعد انتقال بار بستر ( $\phi$ )
اسمارت و جگی (Smart & Jaeggi, 1983)	۴	۴/۲ و ۱۰/۵	۲/۲۵ تا ۱/۶۵	۵۷۵ تا ۱۹۱۰	۰/۱۵۱ تا ۰/۳۸۲	۰/۲۴۹	۰/۱۷۴ تا ۱/۵۶۱	۰/۶۳۷
کائو (Cao, 1985)	۱۹	۲۲/۲ و ۴۴/۳	۱/۵ تا ۱/۰۳	۱۱۹۲۹ تا ۲۶۱۱	۰/۰۳۰ تا ۰/۱۰۸	۰/۰۶۸	۰ تا ۰/۰۳۲	۰/۰۰۴
رکینگ و همکاران (Recking et al., 2008)	۱۹	۲/۳ و ۴/۹	۱/۲۲ تا ۱/۷۲	۱۹۰ تا ۶۰۷	۰/۰۹ تا ۰/۲۸	۰/۱۶۹	۰/۰۲ تا ۰/۶۵	۰/۱۹۵
تحقیق حاضر	۱۴	۱/۷ و ۳/۲۹	۱/۵۱ تا ۰/۹۹	۱۳۱ تا ۳۴۳	۰/۱۱۹ تا ۰/۲۸۵	۰/۱۹۹	۰/۰۴۲ تا ۰/۳۱۱	۰/۱۴۹

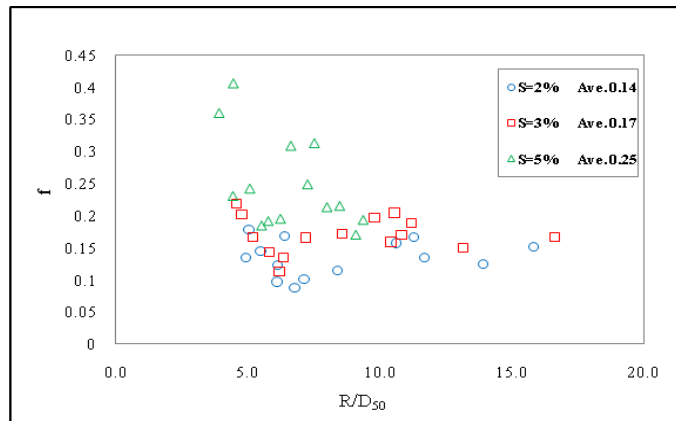
نوسانی منتقل می‌شود بیشتر می‌شود و تنش برشی و در نتیجه مقاومت جریان و ضریب اصطکاک جریان افزایش می‌یابد.

در شکل ۳ برای نتایج آزمایشگاهی این تحقیق، تغییرات ضریب اصطکاک ( $f$ ) نسبت به  $R/D_{50}$  در شیب‌های مختلف نشان داده شده است. میانگین ضریب اصطکاک ( $f$ ) در شیب‌های ۲، ۳ و ۵ درصد به ترتیب ۰/۱۴، ۰/۱۷ و ۰/۲۵ است. افزایش شیب موجب افزایش تنش برشی و میزان انتقال بار بستر در نتیجه ضریب اصطکاک ( $f$ ) شده است. محققان پیشین نیز به نتایج مشابهی مبنی بر افزایش ضریب اصطکاک جریان با افزایش شیب بستر دست یافته بودند (Recking et al., 2008). با افزایش شیب از ۲ به ۳ درصد، ضریب اصطکاک ( $f$ )، حدود ۲۰ درصد بیشتر شده است. در صورتی که با افزایش شیب از ۳ به ۵ درصد ضریب اصطکاک ( $f$ )، ۴۷ درصد افزایش یافته است. از این‌رو در شیب‌های ۵ درصد، نسبت به شیب‌های ۳ درصد، ضریب اصطکاک بستر به شکلی چشمگیر افزایش یافته است. این اختلاف از شیب‌های ۳ درصد نسبت به شیب‌های ۲ درصد بسیار کمتر است.

در جدول ۳ دیده می‌شود که با توجه به نتایج تحقیقات قبلی، نتایج آزمایش‌های این تحقیق قابل قبول است و میزان خطای قابل توجهی را نشان نمی‌دهد. از این‌رو می‌توان با اطمینان قابل قبولی تحلیل‌های تکمیلی را دنبال کرد.

### تأثیر شیب بر مقاومت جریان

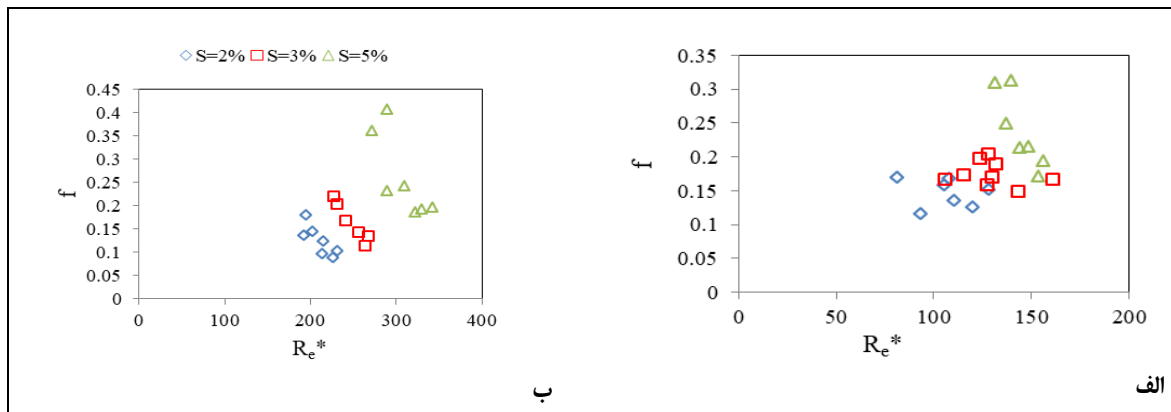
شیب از پارامترهای مهم در حرکت و انتقال بار بستر است و نقش مؤثری بر ضریب اصطکاک جریان دارد. با توجه به رابطه ۱، ضریب اصطکاک  $f$  تابعی از استغراق نسبی  $(R/D)$  است و در مطالعات پیشین نیز تغییرات ضریب اصطکاک ( $f$ ) در شیب‌های مختلف نسبت به استغراق نسبی  $(R/D)$  مورد توجه بوده است. محققان در بررسی‌های آزمایشگاهی خود گزارش کرده‌اند در یک دبی ثابت، افزایش شیب موجب افزایش تنش برشی و میزان انتقال بار بستر می‌شود (Smart & Jaeggi, 1983; Cao, 1985; Recking et al., 2008). از این‌رو برای جریانی که بار بستر را جابه‌جا می‌کند تنش رینولدزی و نیز گرادیان سرعت بزرگ‌تر از جریان بدون بار بستر است. با افزایش حرکت بار بستر، انرژی‌ای که از حرکت متوسط به حرکت



شکل ۳- تغییرات ضریب اصطکاک  $f$  نسبت به  $R/D_{50}$  در نتایج آزمایشگاهی این تحقیق در شیب‌های ۲، ۳ و ۵ درصد

هم نیروی درگ فشاری<sup>۲</sup> از سیال بر بستر اثر می‌کند و با شرایط هیدرولیکی یکسان، هرچه درگ اندازه زبری‌های بستر بزرگ‌تر باشد نیروی درگ فشاری بیشتر و در نتیجه نیروی کل درگ وارده از سیال بر بستر بزرگ‌تر می‌شود. بدین ترتیب افت جریان بیشتر می‌شود و به همین دلیل است که در شرایط هیدرولیکی یکسان، با بزرگ‌تر شدن اندازه ذرات بستر، عدد رینولدز برشی ( $Re^*$ ) و ضریب اصطکاک ( $f$ ) افزایش می‌یابد.

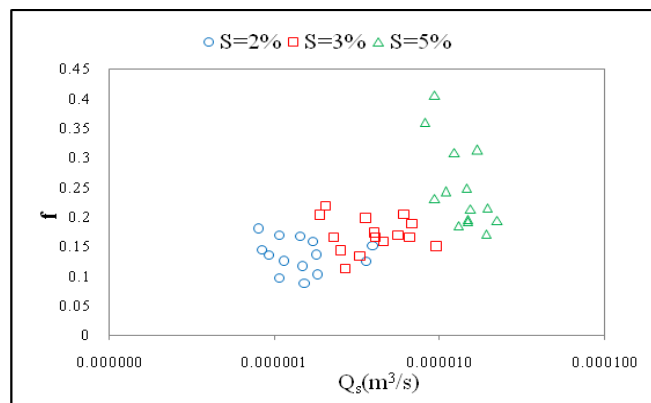
در شکل ۴، تغییرات ضریب اصطکاک ( $f$ ) در مقابل عدد رینولدز برشی ( $Re^*$ ) برای دانه‌بندی‌های مختلف نشان داده شده است. با افزایش شیب، عدد رینولدز برشی و ضریب اصطکاک ( $f$ ) افزایش می‌یابد. ضمن اینکه با افزایش عدد رینولدز برشی ( $Re^*$ )، ضریب اصطکاک ( $f$ ) کاهش می‌یابد. این موضوع در دانه‌بندی بزرگ‌تر بیشتر است زیرا در طول بستر زبر در جهت جریان، هم نیروی درگ اصطکاک<sup>۱</sup> و



شکل ۴- تأثیر شیب بر ضریب اصطکاک ( $f$ ) نسبت به عدد رینولدز برشی ( $Re^*$ ) در شیب‌های ۲، ۳ و ۵ درصد (الف) قطر متوسط ذرات ۱/۷ میلی‌متر و (ب) قطر متوسط ذرات ۳/۲۹ میلی‌متر

بار بستر شده و به دنبال آن تغییرات قابل توجهی در میزان افزایش اندازه ضریب اصطکاک به همراه داشته است. این افزایش از شیب ۵ درصد به شیب ۳ درصد چشمگیر اما از شیب ۳ درصد به ۲ درصد با افزایش کمتری همراه است.

در شکل ۵، تغییرات ضریب اصطکاک ( $f$ ) در مقابل میزان انتقال رسوبات ( $Q_s$ ) بر حسب متر مکعب بر ثانیه در سه شیب ۲، ۳ و ۵ درصد رسم شده است. مطابق شکل ۵ مشاهده می‌شود افزایش شیب موجب افزایش میزان انتقال



شکل ۵- تأثیر شیب بر ضریب اصطکاک ( $f$ ) نسبت به میزان انتقال رسوبات ( $Q_s$ ) در شیب‌های ۲، ۳ و ۵ درصد

$K_m$  = ضریب ثابت ون کارمن برای جریان‌های با حرکت بار بستر و در این تحقیق ۰/۳۱۳ است.

به‌منظور صحت‌سنجی رابطه انتخاب شده با نتایج آزمایشگاهی، مطابق جدول ۴ تعدادی آزمایش اجرا شده در شیب ۱ درصد برای جریان با بار بستر خیلی کم (با  $\theta < 0.06$  و  $\phi < 0.07$ ) مقایسه شدند.  $f$  ضریب اصطکاک کل از رابطه داریسی و  $f_c$  از رابطه ۱۴ محاسبه شده است. در جدول ۴ دیده می‌شود مقادیر  $f$  و  $f_c$  میانگین درصد خطای نسبی<sup>۱</sup> به‌میزان ۱۱ درصد دارند که با توجه به حرکت خیلی کم بار بستر، قابل قبول است.

در این تحقیق با استفاده از تئوری خطی که در رابطه ۱۵ ارائه شده،  $f_m$  ضریب اصطکاک ناشی از حرکت بار بستر تعیین می‌شود.

$$f_m = f - f_c \quad (15)$$

که در آن،  $f$  = ضریب اصطکاک داریسی که از رابطه ۱ محاسبه می‌شود و  $f_c$  اصطکاک مربوط به زبری ذرات است که از رابطه ۱۴ تعیین می‌شوند. در شکل ۶ تغییرات  $f$  و  $f_c$  در شیب‌های مختلف بر حسب  $R/D_{50}$  نشان داده شده است. در شیب‌های ۲ و ۳ درصد،  $f_m$  و  $f_c$  سهم نسبتاً یکسان در اصطکاک کلی جریان دارند در صورتی که در شیب‌های ۵

تأثیر حرکت ذرات بار بستر بر توزیع لگاریتمی سرعت در جریان‌های رودخانه‌ای و کانال‌های آبرفتی، موضوع مورد توجه محققان تأثیر حرکت ذرات در نزدیکی بستر بر توزیع لگاریتمی سرعت است. در رابطه ۱ دیده می‌شود ضریب ون کارمن ( $K_m$ ) نقشی مهم در رابطه توزیع لگاریتمی سرعت و مقاومت جریان دارد. محققان در جریان‌های همراه با انتقال بار بستر، ضریب ون کارمن را کمتر از ۰/۴۱ در نظر گرفته‌اند (Best et al., 1997; Gust & Southard, 1983; Nikora & Goring, 2000. Dey & Raikar, 2007; Gaudio et al., 2011; Dey et al., 2012). در این تحقیقات اندازه‌گیری پروفیل سرعت چندان دقیق و اطمینان‌بخش نبوده از این‌رو نتایج پیشنهادی رکینگ و همکاران (Recking et al., 2008) (با توجه به همخوانی داده‌ها) که در بخش قبل شرح داده شد، استنتاج شد.

از رابطه ۳ برای محاسبه ضریب اصطکاک ( $f_c$ ) به کمک توزیع لگاریتمی سرعت استفاده شد. با توجه به روابط ۱ و ۳، رابطه ۱۴ برای محاسبه  $f_c$  در این تحقیق پیشنهاد شد.

$$\sqrt{\frac{8}{f_c}} = 6 + \frac{1}{K_m} \ln\left(\frac{R}{2.1D_{50}}\right) \quad (14)$$

که در آن،

جریان بیشتر می‌شود. از این‌رو در میزان انتقال بار بستر بالا، مقاومت جریان علاوه بر زبری ذرات کف تابع حرکت ذرات بستر است و ضریب اصطکاک  $f_m$  سهم بیشتری نسبت به ضریب اصطکاک  $f_c$  دارد. در شیب ۲ درصد و در مواقعی که میزان انتقال بار بستر کمتر است. مقاومت جریان بیشتر تابع زبری ذرات کف است و حرکت ذرات، مقاومت کمتری ایجاد می‌کنند.

درصد، سهم  $f_m$  به‌صورتی قابل توجه بیشتر از سهم  $f_c$  است. با مقایسه آزمایش‌ها در شیب‌های مختلف مشاهده می‌شود افزایش شیب موجب افزایش سهم  $f_m$  نسبت به  $f_c$  شده به‌طوری‌که در شیب ۵ درصد شاهد افزایش  $f_m$  نسبت به شیب‌های کمتر هستیم. در مواقعی که حرکت بار بستر بیشتر باشد انرژی بیشتری از جریان گرفته شده، مقاومت

جدول ۴- مقایسه ضریب اصطکاک  $f$  و ضریب اصطکاک  $f_c$  (رابطه ۱۵) برای جریان با بار بستر خیلی کم

ردیف	قطر میانگین ذرات (متر)	شیب (متر/متر)	میانگین ذرات	هیدرولیکی بر قطر	نسبت شعاع	سرعت برشی	نسبت سرعت بر	عدد فرود	نشی برشی بی بعد	بار بستر	ذری بی بعد انتقال	بستر ( $f_c$ )	بدون حرکت بار	ضریب اصطکاک	کل ( $f$ )	ضریب اصطکاک	میانگین	درصد خطای
۱	۰/۰۰۳۲۹	۰/۰۱	۷/۵۱	۱۰/۱۵	۹/۸۷	۱۰/۱۵	۱/۸۸	۰/۴۷	۰/۰۰۲	۰/۰۷۹	۰/۰۷۸	۱/۸۶						
۲	۰/۰۰۳۲۹	۰/۰۱	۸/۴۱	۹/۸۷	۹/۶۷	۹/۸۷	۰/۸۷	۰/۵۱۲	۰/۰۰۱۶	۰/۰۷۴	۰/۰۸۲	۱۰/۱۳						
۳	۰/۰۰۳۲۹	۰/۰۱	۹/۴۲	۹/۶۷	۹/۶۷	۹/۶۷	۰/۸۴	۰/۵۷۳	۰/۰۰۶۸	۰/۰۶۹	۰/۰۸۶	۱۹/۵۷						
۴	۰/۰۰۳۲۹	۰/۰۱	۹/۶۵	۹/۴۳	۹/۴۳	۹/۴۳	۰/۸۶	۰/۵۸۷	۰/۰۰۶۴	۰/۰۶۸	۰/۰۸۱	۱۶/۰۷						

می‌روند و از ۴۳ داده آزمایشگاهی این تحقیق به‌همراه ۷۹ داده آزمایشگاهی رکینگ و همکاران (Recking et al., 2008) برای ارائه رابطه پیشنهادی استفاده می‌شود. بدین‌منظور از مجموع ۱۲۲ داده، ۸۰ درصد برای استخراج رابطه پیشنهادی و ۲۰ درصد (۹ داده از نتایج این تحقیق و ۱۶ داده از نتایج رکینگ و همکاران) برای صحت‌سنجی رابطه پیشنهادی، به‌صورت تصادفی انتخاب شدند. به کمک رگرسیون با نرم‌افزار SPSS، رابطه ۱۶ برای تعیین  $f_m$  به‌دست می‌آید.

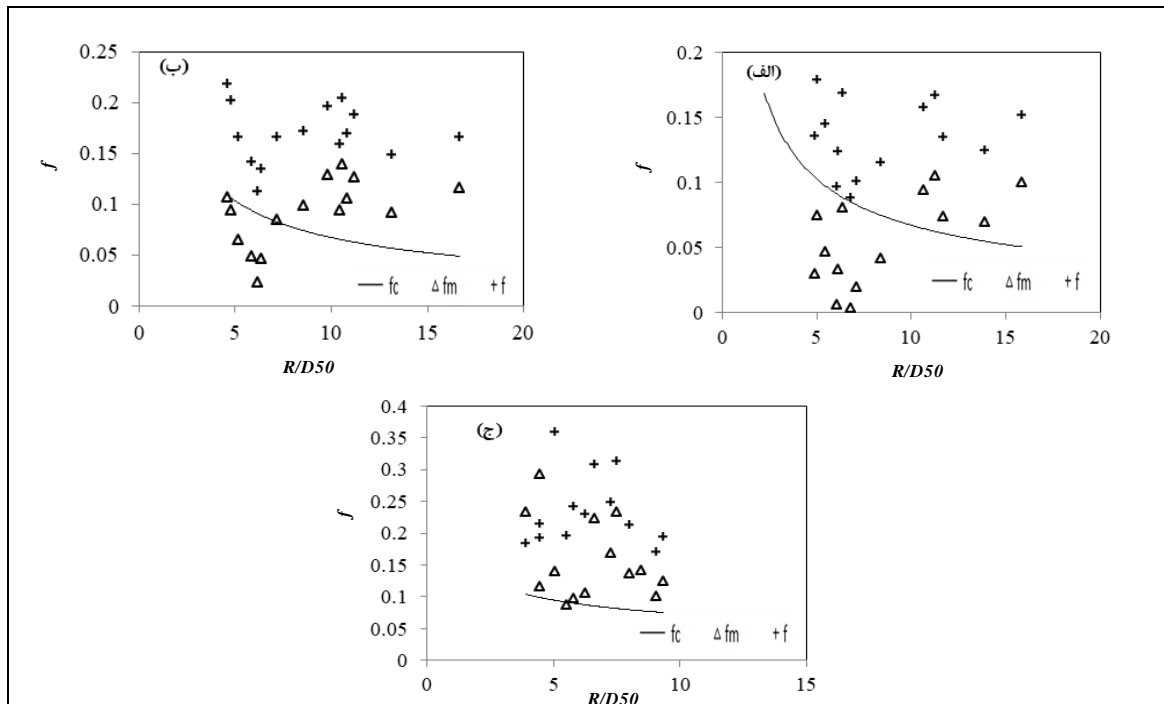
$$f_m = 138.8 F_r^{-3.91} S^{2.30} R_e^{*-0.08} \left(\frac{R}{D_{50}}\right)^{0.80} \quad (16)$$

در شکل ۸، مقایسه رابطه ۱۶ با نتایج آزمایشگاهی و در شکل ۹، صحت‌سنجی با ۲۰ درصد داده‌ها (که به‌طور تصادفی انتخاب شده) نشان داده شده است.

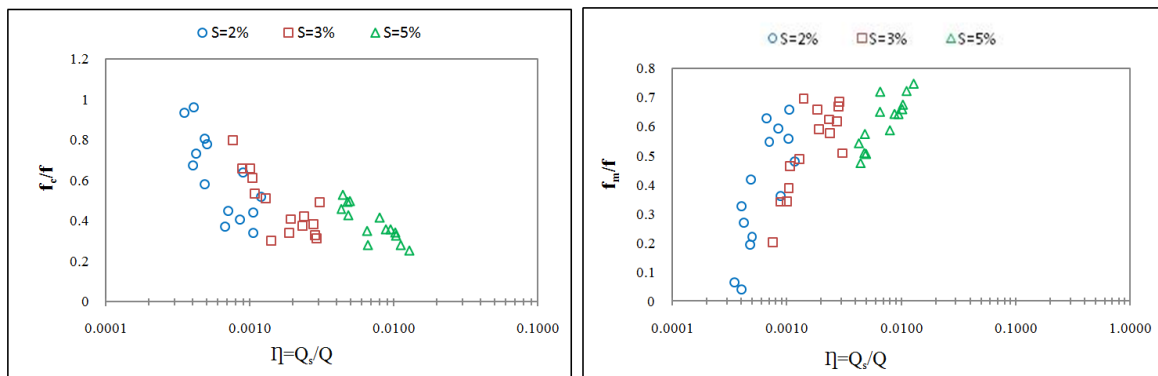
در شکل ۷ تأثیر شیب بر ضریب  $f_c/f$  و  $f_m/f$  نسبت به میزان جابه‌جایی بار بستر  $\eta = Q_s/Q$  رسم شده است. نتایج به‌دست آمده برای ضریب اصطکاک  $f_m$  و  $f_c$  نشان می‌دهد که با افزایش شیب میزان جابه‌جایی بار بستر افزایش می‌یابد و برای جریان‌های با میزان انتقال بالا، خصوصاً در شیب‌های ۵ درصد، تأثیر سهم  $f_m$  در مقدار ضریب اصطکاک جریان بیش از تأثیر سهم  $f_c$  است. ضمن اینکه در شیب‌های ۲ درصد با میزان انتقال کمتر  $f_m$  و  $f_c$  سهم نسبتاً یکسانی دارند.

ارائه رابطه پیشنهادی برای تعیین  $f_m$  در رابطه ۱۰ دیدیم برای تعیین  $f_m$  پارامترهای عدد فرود، شیب و عدد رینولدز برشی و استغراق نسبی به‌کار

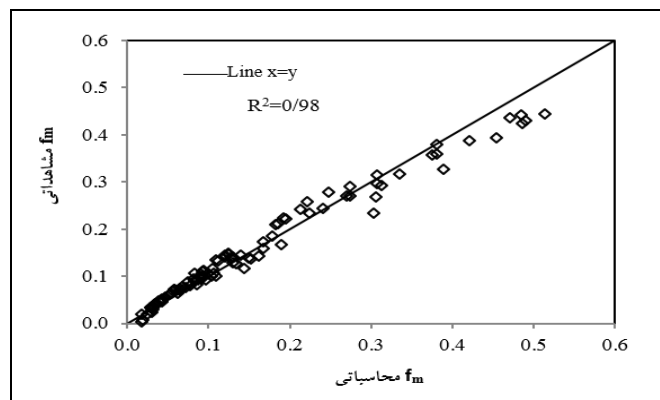
بررسی آزمایشگاهی تأثیر انتقال بار بستر بر مقاومت...



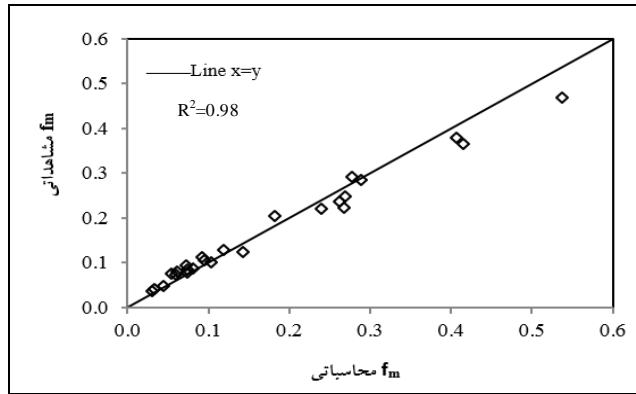
شکل ۶- تغییرات ضریب اصطکاک  $f$  و  $f_m$  نسبت به  $R/D$  بر اساس تئوری خطی  
برای حالت‌های الف) شیب ۲ درصد، ب) شیب ۳ درصد و ج) شیب ۵ درصد



شکل ۷- تأثیر شیب بر ضریب  $f_m/f$  و  $f/f_m$  نسبت به میزان جابه‌جایی بار بستر ۷



شکل ۸- مقایسه  $f_m$  در داده‌های آزمایشگاهی و محاسباتی (رابطه ۱۶)



شکل ۹- صحت‌سنجی رابطه پیشنهادی (رابطه ۱۶) با ۲۵ داده تصادفی

هر مرحله از تحلیل حساسیت یکی از پارامترها حذف و رابطه به‌دست آمده با حذف یکی از پارامترها، با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌شود. نتایج نشان می‌دهد عدد فرود بیشترین تأثیر را در رابطه به‌دست آمده دارد. بعد از عدد فرود، شیب، عدد رینولدز برشی و نسبت استغراق بیشترین تأثیر را دارند.

در جدول ۵ مشخصات آماری رابطه پیشنهادی در مقایسه با ۹۷ داده آزمایشگاهی و ۲۵ داده صحت‌سنجی شده نشان داده شده است. دیده می‌شود که رابطه ۱۶ ضریب همبستگی<sup>۱</sup> ۰/۹۹ و شاخص نش<sup>۲</sup> ۰/۹۶ را با نتایج آزمایشگاهی دارد. در جدول ۶، تحلیل حساسیت پارامترهای به‌دست آمده در رابطه ۱۶ ارائه شده است.

جدول ۵- مشخصات آماری نتایج آزمایشگاهی در مقایسه با رابطه پیشنهادی

نتایج آزمایشگاهی	تعداد داده‌ها	میانگین	انحراف معیار	میانگین درصد خطای نسبی	ضریب همبستگی	ضریب تعیین	شاخص نش	درصد خطای انحراف معیار
داده‌های آزمایشگاهی	۹۷	۰/۱۵۶	۰/۱۳۰	۱۵/۶	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۶	۱۱/۱۰
داده‌های صحت‌سنجی شده	۲۵	۰/۱۶۸	۰/۱۱۸	۱۶/۴۷	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۶	۱۲/۷

جدول ۶- تحلیل حساسیت پارامترهای رابطه به‌دست آمده برای ضریب اصطکاک  $f_m$  (رابطه ۱۶)

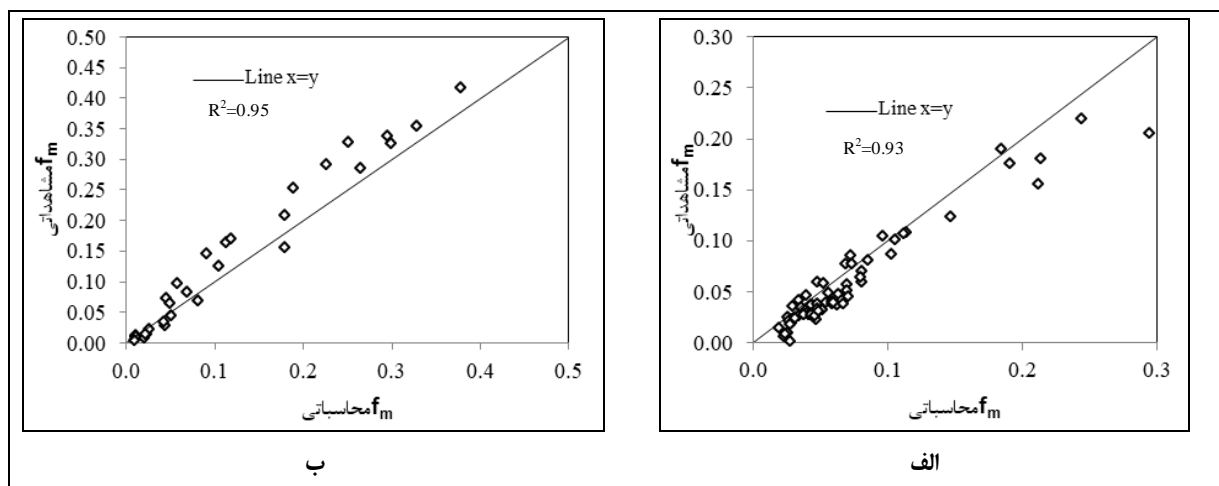
رابطه پیشنهادی	تعداد داده‌ها	میانگین	انحراف معیار	میانگین درصد خطای نسبی	ضریب همبستگی	ضریب تعیین	شاخص نش	درصد خطای انحراف معیار
$f_m = 138.8 F_r^{-3.91} S^{2.30} Re^{*0.08} (R/D_{50})^{0.80}$	۹۷	۰/۱۵۶	۰/۱۳۰	۱۵/۶	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۶	۱۱/۱۰
$f_m = 9.97 S^{1.60} Re^{*0.02} (R/D_{50})^{0.24}$	۹۷	۱/۹۶	۲/۶۷	۲۳/۰	۰/۸۴	۰/۷۱	-۷۲۶	۹۶/۰
$f_m = 0.013 f_r^{-1.37} Re^{*0.5} (R/D_{50})^{-0.28}$	۹۷	۰/۱۳۸	۰/۰۹۴	۸۰/۱	۰/۸۴	۰/۷۱	۰/۶۸	۱۹/۲۹
$f_m = 67.49 f_r^{-3.88} S^{2.26} (R/D_{50})^{0.87}$	۹۷	۰/۱۶۰	۰/۱۳۵	۱۶/۸	۰/۹۷	۰/۹۶	۰/۹۵	۱۵/۷۰
$f_m = 843.87 f_r^{-3.38} S^{2.02} Re^{*-0.32}$	۹۷	۰/۱۵۸	۰/۱۳۰	۲۳/۰	۰/۹۶	۰/۹۵	۰/۹۶	۱۱/۵۴

بررسی آزمایشگاهی تأثیر انتقال بار بستر بر مقاومت...

به منظور صحت‌سنجی، در جدول ۷ و شکل ۱۰ بین رابطه پیشنهادی این تحقیق (رابطه ۱۶) با نتایج رابطه پیشنهادی اسمارت و جگی (Smart & Jaeggi, 1983) و کائو (Cao, 1985) مقایسه شده است.

جدول ۷- مقایسه رابطه پیشنهادی (رابطه ۱۶) برای ضریب اصطکاک  $f_m$  با نتایج آزمایشگاهی دو تن از محققان

نتایج آزمایشگاهی	تعداد داده‌ها	میانگین	انحراف معیار	خطای نسبی میانگین درصد	همبستگی ضریب	ضریب تعیین	شاخص نژ	انحراف معیار درصد خطای
اسمارت و جگی (Smart & Jaeggi, 1983)	۶۵	۰/۰۸۶	۰/۰۹۰	۶۱/۵	۰/۹۶	۰/۹۳	۰/۷۰	۳۶/۰
کائو (Cao, 1985)	۳۳	۰/۱۶۲	۰/۱۷۴	۲۹/۲	۰/۹۷	۰/۹۵	۰/۹۴	۲/۲۳



شکل ۱۰- مقایسه رابطه پیشنهادی این تحقیق (رابطه ۱۶) با نتایج آزمایشگاهی اسمارت و جگی (Smart & Jaeggi, 1983) و کائو (Cao, 1985)

۰/۰۳ مترمکعب بر ثانیه با عدد شیلدزی به میزان  $\theta < 2/14$  اجرا کردند. با بررسی نتایج مشخص می‌شود خطاهای به وجود آمده مربوط به آزمایش‌ها در شیب‌های (خیلی تند) ۹ تا ۲۰ درصد بوده است. لزوم بررسی دقیق‌تر رابطه پیشنهادی در شیب‌های بالاتر از ۹ درصد احساس می‌شود.

### نتیجه‌گیری

نتایج آزمایش‌های این تحقیق نشان می‌دهد افزایش شیب و ظرفیت انتقال بار بستر موجب افزایش ضریب اصطکاک ( $f$ ) می‌شود و با افزایش قطر ذرات بستر، عدد رینولدز برشی و ضریب اصطکاک ( $f$ ) افزایش می‌یابد. در

در جدول ۷ و شکل ۱۰ دیده می‌شود که رابطه پیشنهادی با نتایج تحقیقات کائو (Cao, 1985) نسبتاً خوبی دارد و با نتایج آزمایشگاهی اسمارت و جگی (Smart & Jaeggi, 1983) دارای خطای بیشتری است. کائو (Cao, 1985) آزمایش‌های خود را تا شیب ۹ درصد با دانه‌بندی‌های ۱۱/۵ و ۲۲/۲ و ۴۴/۳ میلی‌متر و با دبی‌های جریان ۰/۰۰۷ تا ۰/۲۵ مترمکعب بر ثانیه اجرا کرد. در تحقیق کائو (Cao, 1985)، عدد شیلدز به میزان  $\theta < 0/15$  بوده در صورتی که اسمارت و جگی (Smart & Jaeggi, 1983) آزمایش‌ها را در شیب‌های ۳ تا ۲۰ درصد با دانه‌بندی‌های ۲ تا ۱۰/۵ میلی‌متر و با دبی‌های ۰/۰۰۵ تا

مقاومت جریان بیشتر تابع زبری ذرات کف خواهد بود و حرکت ذرات، مقاومت کمتری ایجاد می‌کنند. در شیب‌های ۲ درصد، سهم  $f_c$  برابر و گاهی بیشتر از سهم  $f_m$  است. افزایش شیب موجب بالا رفتن سهم  $f_m$  نسبت به سهم  $f_c$  می‌شود.

به کمک آنالیز ابعادی، پارامترهای تأثیرگذار بر ضریب اصطکاک ناشی از حرکت بار بستر ( $f_m$ ) ارائه شد. برای ۴۳ داده آزمایشگاهی این تحقیق و ۷۹ داده آزمایشگاهی رکینگ و همکاران (Recking *et al.*, 2008) با استفاده از رگرسیون رابطه ۱۶، برای تعیین ضریب اصطکاک ( $f_m$ )، نسبت به پارامترهای بی بعد شیب ( $S$ )، عدد فرود ( $Fr$ )، عدد رینولدز برشی ( $Re^*$ ) و استغراق نسبی ارائه و صحت‌سنجی شد. با تحلیل حساسیت صورت گرفته، عدد فرود، شیب، عدد رینولدز برشی و نسبت استغراق به ترتیب بیشترین تأثیر را در رابطه پیشنهادی دارند. رابطه پیشنهادی با نتایج آزمایشگاهی محققان قبلی صحت‌سنجی شد و نتایج قابل قبولی از آن به دست آمد.

شیب‌های ۵ درصد، نسبت به شیب‌های ۳ درصد، ضریب اصطکاک بستر به‌طور چشمگیر افزایش می‌یابد. این اختلاف از شیب‌های ۳ درصد نسبت به شیب‌های ۲ درصد بسیار کمتر است. بنابراین در بسترهای فرسایش‌پذیر می‌توان شیب‌های ۳ درصد را مرز بین شیب‌های ملایم و تند در نظر گرفت. ضریب اصطکاک بدون حرکت بار بستر ( $f_c$ ) و ضریب اصطکاک ناشی از حرکت بار بستر ( $f_m$ ) نسبت به ضریب اصطکاک کل ( $f$ )، با استفاده از تئوری خطی به دست آمده‌اند. در شکل ۶ مشاهده می‌شود در مواقعی که حرکت بار بستر بیشتر باشد انرژی بیشتری از جریان گرفته و مقاومت جریان بیشتر می‌شود؛ بنابراین، در میزان انتقال بار بستر بالا مقاومت جریان علاوه بر زبری ذرات کف تابع حرکت ذرات بستر است و از این‌رو ضریب اصطکاک ( $f_m$ ) سهم بیشتری نسبت به ضریب اصطکاک ( $f_c$ ) دارد. در شیب‌های ۵ درصد تأثیر و سهم  $f_m$  در مقدار ضریب اصطکاک جریان بیش از تأثیر و سهم  $f_c$  مشاهده شده است. در مواقعی که میزان انتقال بار بستر کمتر است،

## مراجع

- Bahrani-Yarahmadi, M. and Shafai-Bejestan, M. 2010. Experimental study of the effects of channel bed coarse sediments on flow resistance coefficient. *Water Soil Sci.* 20(1):143-156. (in Persian)
- Bergeron, N. E. and Carbonneau, P. 1999. The effect of sediment concentration on bedload roughness. *Hydrol.Process.* 13, 2583-2589.
- Best, J., Bennett, S., Bridge, J. and Leeder, M. 1997. Turbulence modulation and particle velocities over flat sand beds at low transport rates. *J. Hydraul. Eng.* 123(120): 1118-1129.
- Campbell, L., McEwan, I., Nikora, V., Pokrajac, D., Gallagher, M. and Manes, C. 2005. Bed load effects on hydrodynamics of rough bed open channel flows. *J. Hydraul. Eng.* 131(7): 576-585.
- Cao, H. H. 1985. Resistance hydraulique d'un lit à gravier mobile à pente raide; étude expérimentale. Ph.D. Thesis. Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne, Switzerland.
- Dey, S. and Debnath, K. 2001. Sediment pickup on stream wise sloping beds. *J. Irrig. Drain. Eng.* 127(1): 39-43.
- Dey, S. and Raikar, R. V. 2007. Characteristics of loose rough boundary streams at near-threshold. *J. Hydraul. Eng.* 133(3): 288-304.
- Dey, S., Das, R., Gaudio, R. and Bose, S. 2012. Turbulence in mobile-bed streams. *Acta Geophysica.* 60(1): 1547-1588.



- Einstein, H. A. 1942. Formulas for the transportation of bed load. Proceeding of American Society of Civil Engineering, 67(3): 351-367.
- Gao, P. and Abrahams, A. D. 2004. Bed load transport resistance in rough open channel flows. Earth Surf. Proc. Land. 29(4): 423-435.
- Gust, G. and Southard, J. B. 1983. Effects of weak bed load on the universal law of the wall. J. Geophys. Res. 88, 5939-5952.
- Gaudio, R., Miglio, A. and Calomino, F. 2011. Friction factor and von Kármán's kin open channels with bed-load. J. Hydraul. Res. 49(2): 239-247.
- Hu, S. and Abrahams, A. D. 2004. Resistance to overland flow due to bed-load transport on plane mobile beds. Earth Surf. Proc. Land. 29(13): 1691-1701.
- Hu, S. and Abrahams, A. D. 2005. The effect of bed mobility on resistance to overland flow. Earth Surf. Proc. Land. 30(11): 1461-1470.
- Khullar, N. K. 2002. Effect of wash load on transport of uniform and nonuniform sediments. Ph.D. Thesis. Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology.
- Khullar, N. K. Kothiyari, U. C. and Ranga-Raju, K. G. 2007. Bed load transport in the presence of wash load transport. ISH J. Hydraul. Eng. 13(1): 106-122.
- Mahdavi, A. and Omid, M. 2004. The effect of bed roughness on velocity profile in open channels. Proceedings of the Second International Conference on Fluvial Hydraulics, River Flow. June 23-25. Napoli, Italy.
- Nikora, V. and Goring, D. 2000. Flow turbulence over fixed and weakly mobile gravel beds. J. Hydraul. Eng. ASCE. 126(9): 679-690.
- Omid, M. Mahdavi, A. and Narayanan, R. 2003. Effects of bedload transport on flow resistance in rigid boundary channels. IAHR. Tesselonic. 641-646.
- Powell, D. M. 2014. Flow resistance in gravel-bed rivers: Progress in research. Earth Sci. Rev. 136, 301-338.
- Recking, A., Frey, P., Paquier, A., Belleudy, P. and Champagne, J. Y. 2008. Feedback between bed load transport and flow resistance in gravel and cobble bed rivers. Water Resour. Res. 44(5): W05412.
- Rickenmann, D. 1990. Bedload transport capacity of slurry flows at steep slopes. Der Versuchsanstalt fuer Wasserbau. Hydrologie und Glaziologie, Eidg. Techn. Hochschule Zuerich, Switzerland.
- Shields, A. 1936. Application of similarity principles and turbulence research to bed load movement. U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service Cooperative Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California.
- Smart, G. M. and Jaeggi, M. N. R. 1983. Sediment transport on steep slopes. Mitteil. Versuchsanst. Wasserbau Hydrologie Glaziologie, Zurich, Switzerland.
- Song, T., Chiew, Y. M. and Chin, C. O. 1998. Effect of bed load movement on flow friction factor. J. Hydraul. Eng. ASCE. 124(2): 165-175.



## **Experimental Study of the Effect of Bed Load Transport on the Flow Resistance in Steep Erodible Beds**

**E. Hajibabaei, S. A. Hosseini\* and M. Sanei**

\* Corresponding Author: Associate Professor, Technical and Engineering Department, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Email: abbas\_hoseyni@srbiau.ac.ir

Determining the friction coefficient in erodible beds plays an important role in the design of alluvial canals. In most of the previous studies, an impact of the hydraulic parameters on the friction coefficient has been studied for non-erodible bed conditions. In this research, by performing a laboratory model in the erodible substrates, the effects of the bed slope parameters and bed load transfer rate on the bed friction coefficient were investigated. The experiments were carried out in the discharge rate of 0.90 to 4.75 l/s and the slopes of 2, 3 and 5 percent on the uniform non cohesive particles with the grain diameter of 1.7 and 3.29 mm. The roughness Reynolds number was in the range of 82 to 343, Froude numbers of these currents in the range of 0.93 to 1.51, and non-dimensional bed load transport rate was calculated in the range of 0.004-0.311. The experimental results showed that between the slopes of 3% to 5%, the bed friction coefficient and the roughness Reynolds number of the erodible bed increased significantly, while in the slope range of 2% to 3%, no significant increase was observed. Analyzing experimental results showed that by increasing the bed transport rate, the frictional resistance of flow ( $f_c$ ) decreased and subsequently, the bed loading movement resistance ( $f_m$ ) increased. Applying dimensional analysis, the effective parameters on  $f_m$  were determined and an empirical equation to determine  $f_m$  was designed and results were validated by laboratory outputs obtained by former researchers. Validation results have been proved acceptable.

**Key words:** Bed Friction Coefficient, Bed Slope, Roughness Reynolds Number