

## مطالعه آزمایشگاهی اثر فرم‌های بستر شکنج با رسوبات ریزدانه و درشت‌دانه بر تنش برشی بستر

مصطفی حیدری<sup>۱</sup>، محمد بهرامی یاراحمدی<sup>۲\*</sup> و محمود شفاعی بجستان<sup>۲</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۵/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۷/۲۸)

### چکیده

تنش برشی وارد بر بستر رودخانه‌ها از جمله مهمترین پارامترهای هیدرولیکی جریان است که در تعیین میزان بار رسوبی و همچنین میزان آبستگي در بستر و سواحل رودخانه کاربرد مؤثری دارد. تشکیل فرم بستر (شکنج، تلماسه و پادتلماسه) در رودخانه‌های آبرفتی بر میزان تنش برشی وارد بر بستر مؤثر است. در این پژوهش اثر فرم‌های بستر شکنج، که بصورت مصنوعی ساخته شده بودند، بر تنش برشی بستر مورد بررسی قرار گرفت. رسوبات با اندازه‌های ۰/۵۱ و ۲/۱۸ میلی‌متر برای زیرکردن سطح شکنج‌های مصنوعی استفاده شد. طول و ارتفاع هر فرم بستر به ترتیب برابر ۲۰ و ۴ سانتی‌متر و زوایای وجه بالادست و پائین‌دست آن نسبت به افق به ترتیب برابر ۱۶/۴ و ۳۲ درجه در نظر گرفته شد. در کلیه آزمایش‌ها از شیب‌های ۰، ۰/۰۰۰۱، ۰/۰۰۰۵، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۱۵ برای کف کانال آزمایشگاهی و دبی‌های ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ لیتر بر ثانیه استفاده شد. نتایج نشان داد که بزرگ‌تر شدن اندازه ذرات بستر، سبب ازدیاد مقادیر پارامترهای  $\tau_b$ ،  $\tau_b''$  و  $\tau_b'$  شد. پارامترهای  $\tau_b$ ،  $\tau_b'$  و  $\tau_b''$  در بسترهای رسوبی با اندازه ۲/۱۸ میلی‌متر بطور متوسط به ترتیب ۲۲/۳۸، ۳۰/۸۶ و ۲۲/۳ درصد بیش از بسترهای رسوبی با اندازه ۰/۵۱ میلی‌متر بودند.

واژه‌های کلیدی: شکنج، تلماسه، رودخانه‌های آبرفتی، تنش برشی بستر

۱. مهندسی عمران- آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

۲. گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: m.bahrami@scu.ac.ir

## مقدمه

یکی از مسائل مهم در هیدرولیک، تعیین تنش برشی بستر رودخانه است. ساختار جریان در رودخانه‌ها تحت تأثیر نحوه توزیع تنش برشی در پیرامون مرطوب است. تعادل تنش برشی با مؤلفه افقی وزن سیال، باعث شکل‌گیری جریان یکنواخت می‌شود. پارامترهای هیدرولیکی جریان (مانند عمق و سرعت جریان) و مشخصات هندسی آبراهه (مانند زبری بستر، مستقیم یا مماندری بودن مسیر، شکل مقطع عرضی، شیب کف) بر مقدار و توزیع تنش برشی مؤثر هستند. میزان و توزیع تنش برشی بستر بر وضعیت ریخت‌شناسی رودخانه‌ها مؤثر است بگونه‌ای که اگر میزان تنش برشی بستر بیش از مقدار آستانه حرکت رسوبات شود آبشستگی رخ خواهد داد. عوامل مختلفی وجود دارند که می‌توانند باعث ازدیاد تنش برشی بستر به بیش از مقدار آستانه حرکت رسوبات شوند مانند ایجاد جریان ثانویه در قوس، ایجاد گرداب‌های سه بعدی در اطراف سازه‌های مستقر در مسیر جریان، افزایش سرعت جریان به علت تنگ‌شدگی سطح مقطع جریان در اثر احداث پل و سازه‌های اصلاح‌الگوی جریان (۱۴ و ۳۰).

در گذشته پژوهش‌های گوناگونی بر روی تنش برشی بستر توسط پژوهشگران داخلی و خارجی صورت گرفته است. در این خصوص می‌توان به پژوهش‌های لین و کارلسون (۱۸)، مولیناس و همکاران (۲۰)، گو و ژولین (۱۲)، نایت و همکاران (۱۷)، بهرامی یاراحمدی و همکاران (۳)، صفرزاده و صالحی نیشابوری (۲۸)، رضمانی و قمشی (۲۶)، آرمان و فتحی مقدم (۱)، لشکرآرا و فتحی مقدم (۱۹)، فضلی و کهریزی (۹) و بیگی و لشکرآرا (۴) اشاره کرد.

در رودخانه‌های آبرفتی در اثر حرکت رسوبات به طرف پایین‌دست، فرم بستر تشکیل می‌شود. فرم‌های بستر دارای انواع مختلفی مانند شکنج، تلماسه، پادتلماسه و سرسره و استخر هستند. در رودخانه‌های آبرفتی میزان مقاومت جریان و پارامترهای هیدرولیکی جریان (و در نتیجه تنش برشی وارد بر بستر) تحت تأثیر نوع فرم بستر تغییر می‌کند. فرم‌های بستر شکنج و تلماسه در مقطع طولی رودخانه تقریباً به شکل مثلث هستند

به طوری که شیب وجه بالادست آنها به نسبت ملایم و شیب وجه پایین‌دست آنها برابر با زاویه ایستایی مواد بستر است. پادتلماسه‌ها بصورت پستی و بلندی‌های یکنواختی دیده می‌شوند. نیم‌رخ سطح آب با این پستی و بلندی‌ها همسو است. سرسره و استخر در رودخانه‌های با شیب به نسبت زیاد و دبی رسوبات زیاد ایجاد می‌شوند. مهمترین آزمایش‌های انجام شده برای مطالعه فرم بستر توسط سایمونز و ریچاردسون (۳۱) صورت گرفت. آنها بطور کلی شرایط جریان را به سه صورت رژیم جریان پایینی، انتقالی و بالایی طبقه‌بندی کردند. شکنج‌ها و تلماسه‌ها در رژیم جریان پایینی و پادتلماسه‌ها و سرسره و استخر در رژیم جریان بالایی تشکیل می‌شوند. در رژیم جریان انتقالی ممکن است بستر هموار و یا پادتلماسه‌ها تشکیل شوند (۳۰). در گذشته پژوهش‌هایی در داخل و خارج از کشور در خصوص فرم‌های بستر انجام گرفته است ولی در تعداد اندکی از آنها به بررسی تنش برشی بستر پرداخته شده است.

فدل و گارسیا (۱۰) با مطالعه بر روی تلماسه‌ها دریافتند که شیب پروفیل سرعت در حضور فرم‌های بستر، در نزدیکی بستر متفاوت از نزدیکی سطح آب است. همچنین، آنها اظهار داشتند که نقطه حداکثر تنش رینولدز مربوط به نقطه انحراف لایه داخلی از لایه خارجی است. مطالعات رادکیوی (۲۵) بر روی شکنج‌ها و تلماسه‌ها نشان داد که سرعت گسترش فرم‌های بستر به صورت معکوس با ارتفاع آنها متناسب است، به نحوی که فرم‌های کوتاهتر، سریعتر حرکت کرده و به فرم‌های بزرگ‌تر می‌رسند. طالب‌بیدختی و همکاران (۳۲) تأثیر هندسه تلماسه‌ها بر ضریب مقاومت در برابر جریان را در یک کانال با بستر ماسه‌ای (تحت شرایط هیدرولیکی و رسوبی مختلف) بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که اثر مقاومت ناشی از فرم بستر ناچیز نبود بگونه‌ای که مقاومت ناشی از فرم بستر تلماسه حدود ۲۵ تا ۵۵ درصد از مقاومت کل را شامل می‌شد. جعفری میانایی و کشاورزی (۱۳) توزیع تنش برشی رینولدز و تغییرات انرژی جنبشی بر روی شکنج‌های مصنوعی را بررسی کردند. آنها اظهار داشتند که مقدار تنش برشی از لحاظ مقدار در فاصله

جدایی جریان شد، هرچند برای زاویه وجه پایین دست ۸ درجه پدیده جدایی جریان قابل مشاهده نبود. کبیری و همکاران (۱۵) به بررسی توزیع‌های سرعت و تنش رینولدز بر روی تلماسه های شنی پرداختند. نتایج نشان داد که زبری سطح تلماسه نقش مهمی در توزیع سرعت ناحیه نزدیک بستر دارد ( $Z/H < 0.3$ ) که در آن  $Z$  ارتفاع تلماسه و  $H$  عمق جریان است) اما هیچ تأثیری در توزیع سرعت در ناحیه جریان بیرونی ( $Z/H > 0.3$ ) ندارد. با افزایش زبری سطح تلماسه‌های شنی، مقادیر حداکثر تنش‌های برشی رینولدز روی نواحی فرورفتگی، تاج و وجه بالادست افزایش یافت. صمدی بروجنی و همکاران (۲۹) تأثیر فرم بستر شکنج بر روی تغییرات تنش برشی بستر را پژوهش کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که میزان تنش برشی بستر در روی تاج ریپل‌ها حداقل مقدار خود و در روی نقطه میانی وجه بالادست ریپل حداکثر مقدار خود را داشت به طوری که با حرکت از تاج ریپل به سمت وجه بالادست آن، روند افزایشی داشت. کول و همکاران (۱۶) ساختار جریان متلاطم و مقاومت جریان بر روی تلماسه‌ها را بررسی کردند. آنها از تلماسه‌های با زاویه وجه پایین دست (Lee Slope) متفاوت (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه) استفاده کردند. نتایج نشان داد که مقاومت در برابر جریان با کاهش شیب تلماسه کاهش یافت. بر تلماسه‌های با شیب‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه تنش برشی به ترتیب ۸، ۳۳ و ۹۰ درصد بیشتر از بستر بدون فرم بود. قاسمی و همکاران (۱۱) به بررسی اثر ارتفاع تاج تلماسه شنی در حضور پوشش گیاهی (ساقه برنج) بر توزیع سرعت، شدت آشفتگی و تنش رینولدز در یک کانال مستطیلی روباز پرداختند. آنها از تلماسه‌های با ارتفاع تاج ۴ و ۸ سانتی‌متر استفاده کردند. نتایج نشان داد که افزایش ارتفاع تاج تلماسه از ۴ به ۸ سانتی‌متر، ناحیه جدایی جریان را از نزدیکی تاج تلماسه با ارتفاع ۴ سانتی‌متر به نزدیکی بخش فرورفته انتقال داد. با افزایش ارتفاع تاج تلماسه مقدار بیشینه تنش در فاصله دورتری از بستر اتفاق افتاد. داورپناه جزئی و همکاران (۷) اثرات تلماسه‌های شنی با تاج مسطح و پوشش گیاهی در دیواره (خومه) بر پارامترهای جریان آشفتگی را

بین دو شکنج شروع به افزایش کرده و در ابتدای شیب وجه بالادست شکنج دوم، به حداکثر مقدار خود رسید. امید و همکاران (۲۴) اثر حرکت بار بستر بر مقاومت جریان در کانالهای پوشیده از فرم بستر تلماسه را بررسی کردند. نتایج نشان داد که انتقال رسوبات با اندازه متوسط ۰/۵ میلی‌متر ضریب اصطکاک را برای فرم بستر صاف و زبر به ترتیب ۲۲ و ۲۴ درصد کاهش داد در صورتی که انتقال رسوبات با اندازه متوسط ۲/۸۴ میلی‌متر باعث کاهش ۳۲ و ۳۹ درصدی ضریب اصطکاک برای بترتیب فرم بستر صاف و زبر شد. افضل‌مهر و همکاران (۲) ضریب اصطکاک دارسی و سیباخ در رودخانه‌های شنی با فرم بستر را مطالعه کردند. آنها دریافتند که بخش عمده ای از ضریب اصطکاک دارسی و سیباخ در رودخانه‌های شنی به علت ضریب شکل فرم بستر است. یک تطابق منطقی بین روشهای کیولگان و پارامتر شیلدز برای تخمین ضریب اصطکاک ناشی از فرم بستر وجود داشت. نصیری دهرسخی و همکاران (۲۲) به بررسی توزیع سرعت جریان، تنش‌های رینولدز و شدت تلاطم در کانال با دیواره‌های پوشیده از ساقه های برنج و کف پوشیده از تلماسه‌های شنی پرداختند. نتایج نشان داد که با کاهش فاصله از دیوار با پوشش گیاهی، حداکثر سرعت در فاصله دورتر از سطح آب اتفاق افتاد. توزیع تنش رینولدزی بستگی به فاصله از دیوار داشت، به طوری کلی با کاهش فاصله از دیوار تنش رینولدزی کمتر شد. چگنی و پندر (۶) بار بستر رسوبات ریزدانه مختلف و فرم‌های بستر مربوط به آنها را مطالعه کردند. نتایج نشان داد که بار بستر و فرم‌های تشکیل شده مرتبط با آن، با افزایش شیب بستر و نسبت عمق آب به اندازه ذرات رسوبی تغییر می‌کنند. مقدار پارامتر بار بستر و شدت انتقال، با افزایش اندازه ذرات رسوب کاهش یافت. معتمدی و افضل‌مهر (۲۱) برهمکنش هندسه تلماسه شنی بر ساختار جریان و طول ناحیه جدایی را با استفاده از دستگاه‌های سرعت سنج PIV و ADV بررسی کردند. بررسی‌ها نشان داد که افزایش پارامترهایی نظیر ارتفاع تلماسه، سرعت جریان، قطر ذرات تلماسه و کاهش عمق جریان سبب افزایش طول ناحیه

رابطه با تنش برشی بستر در بسترهای پوشیده از فرم بستر شکنج صورت گرفته است. بنابراین، در پژوهش حاضر تنش برشی در بسترهای پوشیده از فرم‌های مصنوعی شکنج، که سطح آنها توسط دانه‌بندی‌های مختلف زبر شده است، مورد بررسی قرار گرفته است. این پژوهش به‌زای دبی‌ها و شیب‌های مختلف و همچنین دانه‌بندی‌های با اندازه‌های متوسط ۵۱/۰ (ماسه) و ۱۸/۲ (شن) میلی‌متر برای زبرکردن سطح فرم‌های بستر صورت گرفت. آزمایش‌ها برای دو حالت بستر بدون فرم (صاف) و بستر با فرم شکنج انجام شد و مقادیر تنش برشی برای دو حالت اشاره شده، محاسبه و مقایسه شد. علاوه بر این، مقادیر تنش برشی (کل، ذره و فرم) دانه‌بندی‌های مختلف به‌زای دبی‌ها و شیب‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شد.

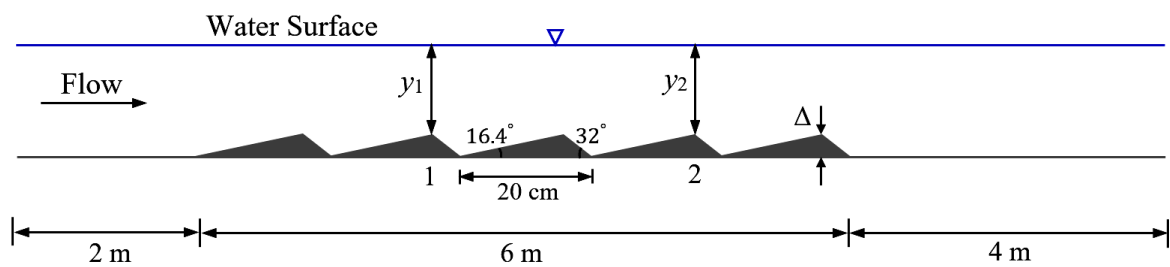
### مواد و روش‌ها

یک کانال آزمایشگاهی مستقیم و شیب‌پذیر به طول ۱۲ متر و عرض ۳۰ سانتی‌متر برای انجام آزمایش‌های پژوهش حاضر مورد استفاده قرار گرفت. این کانال دارای ۶ مخزن زمینی متصل به هم، برای نگه‌داری آب است. دبی لازم برای انجام آزمایش‌ها، از این مخازن تأمین می‌شود. سیستم جریان آب در این کانال بصورت مستقل و گردش‌ی است یعنی جریان آب از مخازن اشاره شده توسط پمپ به ابتدای کانال پمپاژ می‌شود. پس از ورود جریان آب با دبی مشخص به درون کانال، از انتهای آن وارد مخازن می‌شود و مجدداً توسط پمپ به ابتدای کانال پمپاژ می‌شود. در شکل ۱ تصویر کانال آزمایشگاهی و مخازن آن نشان داده شده است. از یک شیر فلکه که بر روی لوله ورودی به کانال آزمایشگاهی نصب شده است، برای تنظیم دبی جریان استفاده می‌شود. دبی جریان توسط دبی‌سنج اولتراسونیک (مدل Digi Sonic E+) که بر روی لوله ورودی به کانال نصب شده است، مورد اندازه‌گیری قرار می‌گرفت. میزان دقت دستگاه به‌زای سرعت‌های بزرگتر و مساوی ۵/۰ متر بر ثانیه برابر ۱٪ ±

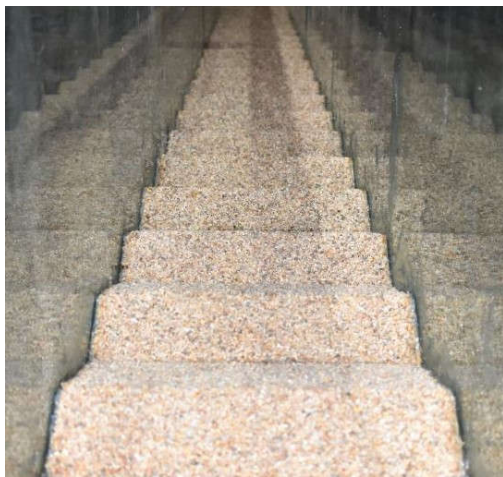
مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که در تلماسه‌های با تاج مسطح برخلاف تلماسه‌های با تاج تیز، در هر دو حالت با و بدون پوشش گیاهی، پارامتر سرعت بعد از تاج مسطح مقادیر منفی به خود نمی‌گیرد. تنش‌های رینولدز در حالت با پوشش گیاهی نسبت به حالت بدون پوشش گیاهی بیشتر بود. روشنی و همکاران (۲۷) تأثیر تبدیل کاهش‌دهنده عرض بر ارتفاع فرم بستر شکنج را در شرایط هیدرولیکی مختلف بررسی کردند. نتایج حاکی از آن بود که کاهش عرض کانال به کمک تبدیل‌ها نقش مؤثری بر ارتفاع ریبیل‌ها داشته و می‌توان تا حد زیادی به کمک تغییر در زوایای تبدیل‌ها، حرکات رسوبات به پایین دست را کنترل کرد. براکنهاف و همکاران (۵) اثر زبری مربوط به شکنج بر الگوهای هیدرودینامیک و انتقال رسوب را با مدل عددی Delft3D مطالعه کردند. هدف از پژوهش آنها تعیین اهمیت زبری شکنج (کوچک مقیاس و بزرگ) بر هیدرودینامیک و انتقال رسوب در دلتای جزر و مدی آملند (در شمال هلند) بود. آنها دریافتند که زبری شکنج بر متوسط عمقی سرعت جریان به‌ویژه در مناطق کم‌عمق دلتا اثرگذار بود. شکنج‌های کوچک مقیاس برای انتقال بار معلق مهم تشخیص داده شدند. اخروی و گوهری (۲۳) فاکتور اصطکاکی ناشی از فرم بستر را در رودخانه‌های درشت‌دانه در حضور لایه سپر را بررسی کردند. نتایج نشان داد که فاکتور اصطکاک مستقل از توزیع اندازه ذرات تشکیل‌دهنده بستر و حداکثر اندازه آنها بود و پارامتر اصلی کنترل‌کننده آن شیب خط انرژی بود. فاکتور اصطکاک ناشی از فرم بستر ۴۰ درصد از فاکتور اصطکاک کل به‌دست آمد. دی و همکاران (۸) به بررسی هیدرودینامیک جریان بر تلماسه‌های دو بعدی پرداختند. آنها اظهار داشتند که ناحیه تنش افزایش یافته، به دلیل ازدیاد نوسانات مکانی سرعت، در ناحیه درون گودی تشکیل شده بوسیله دو تلماسه متوالی متمرکز شده بود. علاوه بر این پروفیل تنش برشی رینولدز (متوسط مکانی) در بالای تاج فرم بستر، به دلیل افزایش نوسانات زمانی ناشی از اختلاط سیال، به حداکثر مقدار رسید. مطالعه پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد که پژوهش‌های اندکی در



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱. الف) تصویر کانال آزمایشگاهی، ب) نمای جانبی از بستر با فرم و ج) تصویری از فرم بستر شکنج در کانال (رنگی در نسخه الکترونیکی)

گرفت.

فرم‌های بستر شکنج دارای طول موج کمتر از ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع حداکثر ۵ سانتی‌متر هستند. علاوه بر این، مقطع آنها

میزان قرائت شده و برای سرعت‌های کوچک‌تر از ۰/۵ متر بر ثانیه معادل  $\pm 0/5$  سانتی‌متر بر ثانیه است. اندازه‌گیری عمق جریان، توسط یک عمق‌سنج با دقت ۰/۱ میلی‌متر صورت می‌

$$f(V, y, g, \rho_w, \mu, \rho_s, d_{50}, B, S, \lambda, \Delta, \alpha, \theta) = 0 \quad (1)$$

که در آن،  $V$  سرعت متوسط جریان،  $y$  عمق متوسط جریان،  $g$  شتاب ثقل،  $\rho_w$  جرم مخصوص آب،  $\mu$  لزوجت دینامیکی آب،  $\rho_s$  جرم مخصوص ذرات رسوب،  $d_{50}$  قطر متوسط ذرات رسوب،  $B$  عرض مجرا،  $S$  شیب بستر،  $\lambda$  طول فرم بستر،  $\Delta$  ارتفاع فرم بستر،  $\alpha$  زاویه وجه بالادست فرم نسبت به افق و  $\theta$  زاویه وجه پایین دست فرم نسبت به افق است.

با استفاده از تئوری  $\pi$  باکینگهام، پارامترهای بی بعد زیر استخراج شد:

$$f\left(\frac{y}{\Delta}, \frac{\lambda}{\Delta}, \alpha, \theta, S, Fr, Re, G_s\right) = 0 \quad (2)$$

در رابطه فوق،  $y/\Delta$  پارامتر عمق نسبی،  $\lambda/\Delta$  نسبت طول به ارتفاع فرم بستر،  $Fr$  عدد فرود جریان،  $Re$  عدد رینولدز جریان و  $G_s$  چگالی نسبی ذرات رسوب که برابر  $2/65$  است. با توجه به متلاطم بودن جریان در تمام آزمایش‌ها، بنابراین، از پارامتر عدد رینولدز جریان صرف نظر می شود. در این پژوهش مقادیر پارامترهای  $\lambda/\Delta$  و  $\alpha$  ثابت بودند بنابراین، این پارامترها نیز از رابطه فوق حذف می شوند ( $\lambda/\Delta=5$ ،  $\alpha=16.4^\circ$ ،  $\theta=32^\circ$ ). بنابراین، پارامترهای بی بعد مؤثر بر بسترهای با فرم به قرار زیر است:

$$f\left(\frac{y}{\Delta}, S, Fr\right) = 0 \quad (3)$$

در بسترهای با فرم، مقادیر تنش برشی کل ( $\tau_b$ ) و تنش برشی مربوط به فرم بستر ( $\tau_b''$ ) تابعی از عمق نسبی ( $y/\Delta$ )، عدد فرود جریان ( $Fr$ ) و شیب بستر ( $S$ ) هستند.

برای بسترهای بدون فرم نیز متغیرهای مؤثر در نظر گرفته شد و با استفاده از تئوری  $\pi$  باکینگهام، پارامترهای بی بعد استخراج شد. پس از حذف پارامترهای ثابت، در نهایت پارامترهای بی بعد مؤثر بر بسترهای بدون فرم به صورت زیر حاصل شدند:

$$f\left(\frac{y}{d_{50}}, S, Fr\right) = 0 \quad (4)$$

بنابراین، در بسترهای بدون فرم، مقادیر تنش برشی مربوط به

مثالی شکل با شیب ملایم طولانی در وجه بالادست و شیب تند کوتاه در وجه پایین دست هستند. زاویه وجه پایین دست آنها تقریباً برابر با زاویه ایستایی ذرات رسوبی است ( $30^\circ$  و  $31^\circ$ ). بر این اساس، در این پژوهش هر فرم بستر به شکل مثلث و بصورت مصنوعی (با ورق P.V.C) ساخته شد. طول و ارتفاع هر فرم بستر به ترتیب برابر  $20$  و  $4$  سانتی متر و زوایای وجه بالادست و پائین دست آن نسبت به افق به ترتیب برابر  $16/4^\circ$  و  $32^\circ$  درجه انتخاب شد. پس از ساخت هر فرم بستر، سطح آن توسط رسوبات با اندازه مشخص ( $d_{50}=0.51$ ،  $2.18$  mm) زیر شد که برای این منظور از چسب استفاده شد.

آزمایش‌های پژوهش حاضر به دو دسته بستر بدون فرم و بستر با فرم شکنج تقسیم می شود. در آزمایش‌های با فرم بستر، تعداد  $30$  عدد فرم بستر ساخته شد که به صورت پشت سر هم و در طولی حدود  $6$  متر در کف کانال آزمایشگاهی چسبانده شدند. فاصله کف پوشیده از فرم، از ابتدای کانال برابر  $2$  متر در نظر گرفته شد. در شکل ۱ نمای جانبی از بستر با فرم بصورت شماتیک ترسیم شده است. در آزمایش‌های بدون فرم، از دو نوع دانه بندی یکنواخت رسوب با اندازه‌های متوسط  $0/51$  (ماسه) و  $2/18$  (شن) میلی متر برای زبر کردن بستر استفاده شد. جنس رسوبات از ماسه و چگالی نسبی آنها برابر  $2/65$  است. رسوبات مذکور در طولی حدود  $6$  متر به کف کانال آزمایشگاهی چسبانده شدند. فاصله کف پوشیده از رسوبات از ابتدای کانال برابر  $2$  متر انتخاب شد.

در این پژوهش از شیب‌های  $0$ ،  $0/0001$ ،  $0/0005$ ،  $0/001$  و  $0/0015$  برای کف کانال آزمایشگاهی و دبی‌های  $10$ ،  $15$ ،  $20$ ،  $25$  و  $30$  لیتر بر ثانیه برای آزمایش‌های با و بدون فرم بستر استفاده شد. در مجموع تعداد کل آزمایش‌ها برابر  $100$  عدد است. در جدول ۱ مقادیر پارامترهای هیدرولیکی آزمایش‌های مختلف ارائه شده است.

## آنالیز ابعادی

متغیرهای مؤثر بر بستر با فرم به شرح زیر است:

جدول ۱. مقادیر پارامترهای هیدرولیکی آزمایش‌های مختلف

| Q (lit/s) | S      | d <sub>50</sub> =0.51 mm |      |           |      | d <sub>50</sub> =2.18 mm |      |           |      |
|-----------|--------|--------------------------|------|-----------|------|--------------------------|------|-----------|------|
|           |        | Without form             |      | With form |      | Without form             |      | With form |      |
|           |        | Y (cm)                   | Fr   | Y (cm)    | Fr   | Y (cm)                   | Fr   | Y (cm)    | Fr   |
| ۱۰        | ۰      | ۷/۱۴                     | ۰/۵۶ | ۸/۱۵      | ۰/۴۶ | ۷/۳۱                     | ۰/۵۴ | ۸/۴۳      | ۰/۴۴ |
| ۱۵        | ۰      | ۸/۶۸                     | ۰/۶۲ | ۱۰/۴۵     | ۰/۴۷ | ۹/۰۹                     | ۰/۵۸ | ۱۰/۷۵     | ۰/۴۵ |
| ۲۰        | ۰      | ۱۰/۳۰                    | ۰/۶۴ | ۱۲/۱۳     | ۰/۵۰ | ۱۰/۵۵                    | ۰/۶۲ | ۱۲/۴۰     | ۰/۴۹ |
| ۲۵        | ۰      | ۱۱/۵۵                    | ۰/۶۸ | ۱۳/۴۸     | ۰/۵۴ | ۱۱/۸۵                    | ۰/۶۵ | ۱۳/۷۵     | ۰/۵۲ |
| ۳۰        | ۰      | ۱۲/۷۲                    | ۰/۷۰ | ۱۵/۱۳     | ۰/۵۴ | ۱۳/۱۷                    | ۰/۶۷ | ۱۵/۴۶     | ۰/۵۳ |
| ۱۰        | ۰/۰۰۰۱ | ۷/۰۳                     | ۰/۵۷ | ۸/۰۵      | ۰/۴۷ | ۷/۲۲                     | ۰/۵۵ | ۸/۳۵      | ۰/۴۴ |
| ۱۵        | ۰/۰۰۰۱ | ۸/۶۳                     | ۰/۶۳ | ۱۰/۳۳     | ۰/۴۸ | ۹/۰۵                     | ۰/۵۹ | ۱۰/۶۸     | ۰/۴۶ |
| ۲۰        | ۰/۰۰۰۱ | ۱۰/۱۳                    | ۰/۶۶ | ۱۱/۹۷     | ۰/۵۱ | ۱۰/۴۳                    | ۰/۶۳ | ۱۲/۳۳     | ۰/۴۹ |
| ۲۵        | ۰/۰۰۰۱ | ۱۱/۴۳                    | ۰/۶۹ | ۱۳/۴۰     | ۰/۵۴ | ۱۱/۷۳                    | ۰/۶۶ | ۱۳/۶۸     | ۰/۵۳ |
| ۳۰        | ۰/۰۰۰۱ | ۱۲/۶۸                    | ۰/۷۱ | ۱۵/۰۰     | ۰/۵۵ | ۱۳/۰۰                    | ۰/۶۸ | ۱۵/۳۸     | ۰/۵۳ |
| ۱۰        | ۰/۰۰۰۵ | ۶/۹۰                     | ۰/۵۹ | ۷/۹۵      | ۰/۴۷ | ۷/۱۴                     | ۰/۵۶ | ۸/۲۵      | ۰/۴۵ |
| ۱۵        | ۰/۰۰۰۵ | ۸/۵۱                     | ۰/۶۴ | ۱۰/۲۳     | ۰/۴۹ | ۸/۸۰                     | ۰/۶۱ | ۱۰/۵۸     | ۰/۴۶ |
| ۲۰        | ۰/۰۰۰۵ | ۱۰/۰۰                    | ۰/۶۷ | ۱۱/۷۰     | ۰/۵۳ | ۱۰/۲۴                    | ۰/۶۵ | ۱۲/۲۳     | ۰/۵۰ |
| ۲۵        | ۰/۰۰۰۵ | ۱۱/۳۲                    | ۰/۷۰ | ۱۳/۲۵     | ۰/۵۵ | ۱۱/۵۳                    | ۰/۶۸ | ۱۳/۵۸     | ۰/۵۳ |
| ۳۰        | ۰/۰۰۰۵ | ۱۲/۳۶                    | ۰/۷۳ | ۱۴/۷۳     | ۰/۵۷ | ۱۲/۷۹                    | ۰/۷۰ | ۱۵/۲۸     | ۰/۵۳ |
| ۱۰        | ۰/۰۰۱  | ۶/۷۳                     | ۰/۶۱ | ۷/۷۶      | ۰/۴۹ | ۶/۶۵                     | ۰/۶۲ | ۸/۱۴      | ۰/۴۶ |
| ۱۵        | ۰/۰۰۱  | ۸/۳۸                     | ۰/۶۶ | ۱۰/۱۲     | ۰/۵۰ | ۸/۶۸                     | ۰/۶۲ | ۱۰/۴۳     | ۰/۴۷ |
| ۲۰        | ۰/۰۰۱  | ۹/۸۵                     | ۰/۶۹ | ۱۱/۲۵     | ۰/۵۶ | ۱۰/۱۳                    | ۰/۶۶ | ۱۲/۰۸     | ۰/۵۱ |
| ۲۵        | ۰/۰۰۱  | ۱۱/۰۳                    | ۰/۷۳ | ۱۲/۹۰     | ۰/۵۷ | ۱۱/۳۵                    | ۰/۷۰ | ۱۳/۴۴     | ۰/۵۴ |
| ۳۰        | ۰/۰۰۱  | ۱۲/۲۰                    | ۰/۷۵ | ۱۴/۴۴     | ۰/۵۸ | ۱۲/۶۱                    | ۰/۷۱ | ۱۵/۱۳     | ۰/۵۴ |
| ۱۰        | ۰/۰۰۱۵ | ۶/۴۸                     | ۰/۶۵ | ۷/۵۸      | ۰/۵۱ | ۶/۷۰                     | ۰/۶۱ | ۸/۰۲      | ۰/۴۷ |
| ۱۵        | ۰/۰۰۱۵ | ۸/۱۸                     | ۰/۶۸ | ۹/۹۱      | ۰/۵۲ | ۸/۵۸                     | ۰/۶۴ | ۱۰/۲۸     | ۰/۴۸ |
| ۲۰        | ۰/۰۰۱۵ | ۹/۵۵                     | ۰/۷۲ | ۱۱/۰۳     | ۰/۵۸ | ۹/۹۵                     | ۰/۶۸ | ۱۱/۹۳     | ۰/۵۲ |
| ۲۵        | ۰/۰۰۱۵ | ۱۰/۸۵                    | ۰/۷۴ | ۱۲/۷۵     | ۰/۵۹ | ۱۱/۱۰                    | ۰/۷۲ | ۱۳/۳۰     | ۰/۵۴ |
| ۳۰        | ۰/۰۰۱۵ | ۱۲/۰۵                    | ۰/۷۶ | ۱۴/۱۳     | ۰/۶۰ | ۱۲/۴۴                    | ۰/۷۳ | ۱۴/۹۸     | ۰/۵۵ |

حدود ۲ متر بود، در نظر گرفته شد/ فاصله مقطع ۱ از ابتدای بستر پوشیده از رسوب، ۲ متر است. با اندازه‌گیری عمق جریان (y) در مقاطع ۱ و ۲ و میانگین‌گیری از آنها، مقادیر سطح مقطع جریان (A)، محیط خیس شده (P)، شعاع هیدرولیکی (R) و سرعت متوسط جریان (V) محاسبه شدند. افت انرژی بین مقاطع ۱ و ۲ با استفاده از

ذره ( $\tau_b'$ ) تابعی از عمق نسبی ( $\frac{y}{d_{50}}$ )، عدد فروود جریان (Fr) و شیب بستر (S) است.

#### محاسبات

برای انجام محاسبات دو مقطع ۱ و ۲ که فاصله آنها از یکدیگر (L)

رابطه زیر محاسبه شد.

$$h_f = \left( y_1 + \frac{V_1^2}{2g} \right) - \left( y_2 + \frac{V_2^2}{2g} \right) + \Delta Z \quad (5)$$

در رابطه بالا  $y_1$  و  $y_2$  بترتیب عمق جریان در مقاطع ۱ و ۲،  $V_1$  و  $V_2$  بترتیب سرعت متوسط جریان در مقاطع ۱ و ۲ هستند.  $\Delta Z$  برابر اختلاف رقوم مقاطع ۱ و ۲ نسبت به سطح مبنا دلخواه است که با استفاده از رابطه  $\Delta Z = SL$  (L فاصله مقاطع ۱ و ۲ از یکدیگر و S شیب بستر است) تعیین شد. شیب خط انرژی  $(S_f)$  عدد رینولدز جریان  $(Re)$  و ضریب اصطکاک داریسی و یسباخ (f) طبق روابط زیر محاسبه شدند (۱۴).

$$S_f = \frac{h_f}{L} \quad (6)$$

$$Re = \frac{4VR}{\nu} \quad (7)$$

$$f = \frac{8RgS_f}{V^2} \quad (8)$$

در روابط فوق  $\nu$  لزوجت سینماتیک آب و  $g$  شتاب ثقل است ( $g=9.81 \text{ m/s}^2$ ).

در کانال‌های آزمایشگاهی با دیواره صاف، زمانی که عرض کانال از ۵ برابر عمق جریان کمتر باشد مقاومت دیواره جانبی با مقاومت بستر متفاوت خواهد بود. ضریب اصطکاک دیواره  $(f_w)$  برای کانال‌های با دیواره صاف را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد (۱۴):

$$f_w = 0.0026 \left( \log \left( \frac{Re}{f} \right) \right)^2 - 0.0428 \log \left( \frac{Re}{f} \right) + 0.1884 \quad (9)$$

بنابراین، ضریب اصطکاک بستر  $(f_b)$  و تنش برشی بستر  $(\tau_b)$  طبق روابط زیر محاسبه شدند (۱۴).

$$f_b = f + \frac{2y}{B}(f - f_w) \quad (10)$$

$$R_b = \left( \frac{f_b}{f} \right) R \quad (11)$$

$$\tau_b = \gamma R_b S_f \quad (12)$$

که در آن B عرض کانال است.

در رودخانه‌های با بستر درشت دانه، تنش برشی وارد بر بستر فقط تابع اندازه ذرات رسوبی بستر است اما در رودخانه‌های آبرفتی تنش برشی کل وارد بر بستر  $(\tau_b)$  به دو قسمت، تنش برشی ناشی از ذرات رسوبی بستر  $(\tau_b')$  و تنش برشی ناشی از فرم بستر  $(\tau_b'')$  تقسیم می‌شود. در این پژوهش از بستر بدون فرم (صاف)، برای تعیین تنش برشی ناشی از ذرات رسوبی بستر  $(\tau_b')$  استفاده شد. با استفاده از رابطه (۱۲)، مقدار تنش برشی مربوط به ذرات رسوبی  $(\tau_b')$  در آزمایش‌های بدون فرم بستر محاسبه شد. علاوه بر آن، مقدار تنش برشی کل  $(\tau_b)$  نیز توسط رابطه (۱۲) در آزمایش‌های با فرم بستر شکنج حساب شد. در نهایت با استفاده از رابطه زیر مقدار تنش برشی مربوط به فرم بستر  $(\tau_b'')$  برآورد شد (۳۰):

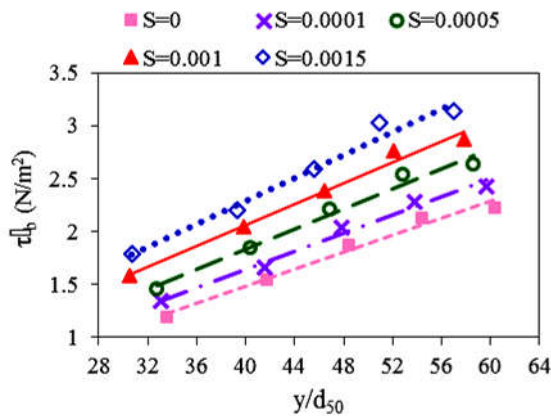
$$\tau_b = \tau_b' + \tau_b'' \quad (13)$$

لازم به ذکر است با توجه به اینکه در آزمایش‌های با فرم بستر، عمق جریان فاصله قائم بین تاج فرم و سطح آب است (شکل ۱ ب) بنابراین، مقادیر تنش برشی محاسبه شده مربوط به تاج فرم بستر است.

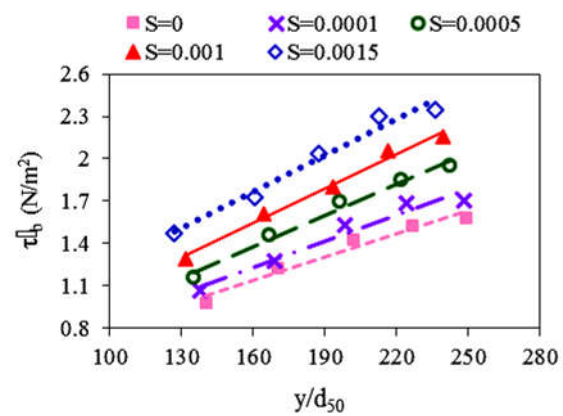
## نتایج و بحث

در این پژوهش اثر پارامترهای هیدرولیکی جریان و همچنین اندازه ذرات بستر بر تنش برشی ناشی از ذرات رسوبی بستر  $(\tau_b')$  مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۲ روند تغییرات تنش برشی ناشی از ذرات رسوبی بستر  $(\tau_b')$  در برابر عمق نسبی  $(y/d_{50})$  برای بسترهای صاف (بدون فرم) پوشیده از رسوبات با اندازه‌های ۰/۵۱ و ۲/۱۸ میلی‌متر نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش عمق نسبی، تنش برشی ناشی از ذرات رسوبی بستر افزایش می‌یابد. در شکل ۲ الف و ب افزایش  $y/d_{50}$  در اثر افزایش عمق جریان رخ داده است. بطور کلی تنش برشی و عمق جریان با یکدیگر رابطه مستقیم دارند. آرمان و فتحی مقدم (۱) که تغییرات تنش برشی بستر در کانال‌های مرکب با مقطع مستطیلی را بررسی کردند، نیز دریافتند که با افزایش عمق جریان تنش برشی بستر افزایش





ب) ۲/۱۸ میلی‌متر



الف) ۰/۵۱ میلی‌متر

شکل ۲. تغییرات تنش برشی ناشی از ذرات رسوبی بستر در برابر عمق نسبی برای بسترهای رسوبی با اندازه‌های مختلف (رنگی در نسخه الکترونیکی)

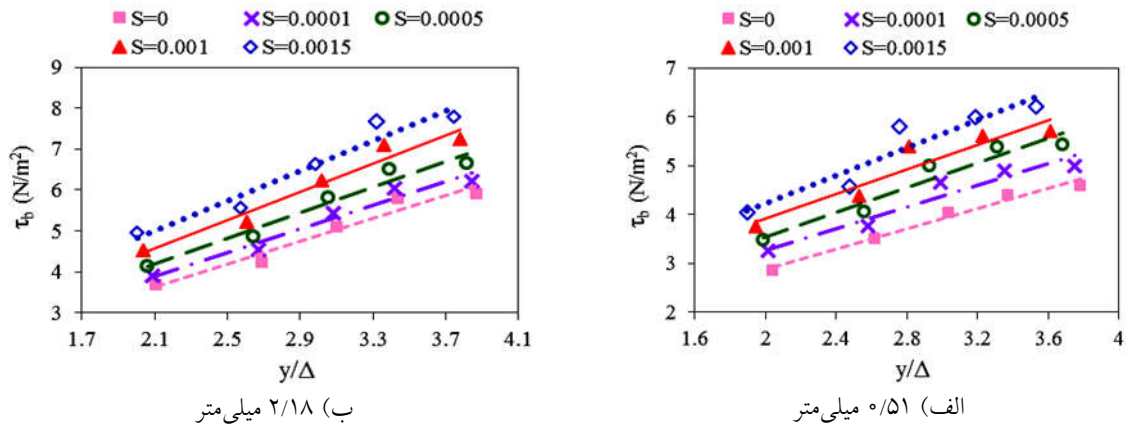
تنش برشی و شیب بستر در آبراهه‌های پوشیده از فرم بستر نیز همانند آبراهه‌های بدون فرم بصورت مستقیم است یعنی با افزایش شیب بستر، تنش برشی کل افزایش می‌یابد. علاوه بر این، شکل ۳ نشان می‌دهد که با افزایش عمق نسبی  $(y/\Delta)$ ، به دلیل ازدیاد دبی جریان و در نتیجه عمق جریان، تنش برشی کل افزایش یافت. توجه داشته باشید که افزایش دبی جریان منجر به ازدیاد سرعت و عمق جریان شد و همانگونه که توضیح داده شد تنش برشی بستر با عمق و سرعت جریان رابطه مستقیم دارد. در پژوهش حاضر محاسبات نشان داد که در بسترهای با رسوبات ۰/۵۱ میلی‌متر،  $\tau_b$  در شیب‌های ۰/۰۰۰۵، ۰/۰۰۰۱، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۱۵ به‌طور متوسط به ترتیب ۱۱/۱۴، ۲۰/۱۸، ۲۸/۱ و ۳۷/۲۴ درصد بیش از  $\tau_b$  در شیب صفر بود. علاوه بر این در بسترهای با رسوبات ۲/۱۸ میلی‌متر،  $\tau_b$  در شیب‌های ۰/۰۰۰۱، ۰/۰۰۰۵، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۱۵ به‌طور متوسط به ترتیب ۵/۷۷، ۱۳، ۲۲/۷۵ و ۳۲ درصد بیش از  $\tau_b$  در شیب صفر بود.

اثر اندازه ذرات رسوبی بر تنش برشی کل  $(\tau_b)$ ، تنش برشی ناشی از ذرات رسوبی بستر  $(\tau_b'')$  و تنش برشی ناشی از فرم بستر  $(\tau_b''')$  (برای شیب ۰/۰۰۱۵) در شکل ۴ نشان داده شده است. برای محاسبه مقادیر تنش برشی ناشی از فرم بستر  $(\tau_b''')$  از رابطه ۱۳ استفاده شد. این شکل نشان می‌دهد که با بزرگتر شدن اندازه ذرات رسوبی بستر، تنش برشی ناشی از اندازه ذرات

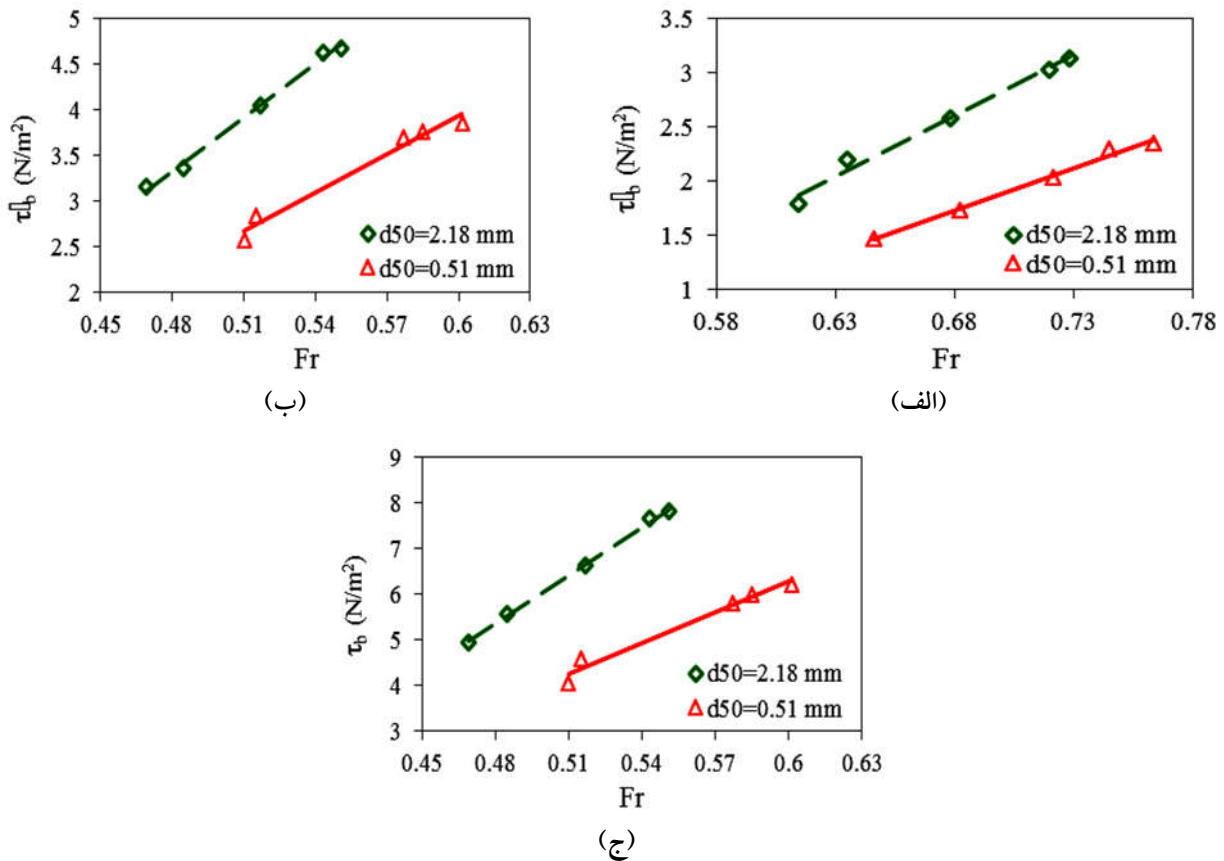
می‌یابد. علاوه بر این شکل ۲ نشان می‌دهد که با افزایش شیب بستر تنش برشی افزایش یافت که این امر به دلیل رابطه مستقیم شیب و تنش برشی طبق رابطه ۱۲ است. محاسبات نشان داد که در بسترهای با رسوبات ۰/۵۱ میلی‌متر،  $\tau_b'$  در شیب‌های ۰/۰۰۰۱، ۰/۰۰۰۵، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۱۵ به‌طور متوسط به ترتیب ۷/۶۵، ۲۰، ۳۲ و ۴۶/۸ درصد بیش از  $\tau_b'$  در شیب صفر بود. علاوه بر این، در بسترهای با رسوبات ۲/۱۸ میلی‌متر،  $\tau_b'$  در شیب‌های ۰/۰۰۰۱، ۰/۰۰۰۵، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۱۵ به‌طور متوسط به ترتیب ۸/۸۲، ۱۹/۱۹، ۳۰ و ۴۲/۶۸ درصد بیش از  $\tau_b'$  در شیب صفر بود.

در آزمایش‌های بستر با فرم، مقادیر تنش برشی کل  $(\tau_b)$  و تنش برشی ناشی از فرم بستر  $(\tau_b''')$  تعیین شدند و اثر پارامترهای هیدرولیکی جریان و همچنین اندازه ذرات بستر بر آنها ارزیابی شد. فرم‌های بستر شکنج و تلماسه در رژیم جریان پایینی تشکیل می‌شوند. در این رژیم عدد فرود جریان کوچک‌تر از ۱ است (۱۴ و ۳۰). در تمام آزمایش‌های مربوط به بستر با فرم، مقادیر عدد فرود جریان در محدوده ۰/۴۳۵ الی ۰/۶ قرار داشت که نشان دهنده رژیم جریان پایین است.

در شکل ۳ تغییرات تنش برشی کل  $(\tau_b)$  در برابر نسبت عمق جریان به ارتفاع فرم بستر  $(\Delta)$  (عمق نسبی) برای بسترهای پوشیده از رسوبات با اندازه‌های ۰/۵۱ و ۲/۱۸ میلی‌متر نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که رابطه



شکل ۳. تغییرات تنش برشی کل در برابر عمق نسبی برای بسترهای رسوبی با اندازه‌های مختلف (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۴. تغییرات تنش برشی در برابر عدد فرود جریان برای شیب ۰.۰۱۵ (الف) تنش برشی ناشی از اندازه ذرات رسوبی بستر، (ب) تنش برشی ناشی از فرم بستر، (ج) تنش برشی کل (رنگی در نسخه الکترونیکی)

در ضمن شکل ۴ نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود جریان، تنش برشی ناشی از اندازه ذرات ( $\tau'_b$ ) افزایش یافت. عدد فرود جریان طبق رابطه  $Fr = \frac{V}{\sqrt{gy}}$ ، با سرعت متوسط جریان رابطه

رسوبی بستر ( $\tau'_b$ ) افزایش یافت. بطور کلی هر چه قدر اندازه ذرات بستر بزرگتر شود میزان نیروی درگ اصطکاک و افت انرژی و در نتیجه تنش برشی وارد بر بستر افزایش می‌یابد. نتایج پژوهش آرمان و فتیحی مقدم (۱) نیز تأییدکننده این مسئله است.

۱۳/۵۶، ۱۷/۵۴ و ۱۹ درصد بیش از بسترهای رسوبی با ذرات ۰/۵۱ میلی‌متر بود. علاوه بر این مقدار  $\tau_b$  در بسترهای رسوبی با ذرات ۲/۱۸ میلی‌متر به ازای شیب‌های ۰، ۰/۰۰۰۵، ۰/۰۰۰۱، ۰/۰۰۱۵ و ۰/۰۰۱ بطور متوسط به ترتیب ۲۷/۱، ۲۱، ۱۹/۵۸، ۲۱/۸۸ و ۲۲/۳۸ درصد بیش از بسترهای رسوبی با ذرات ۰/۵۱ میلی‌متر بود.

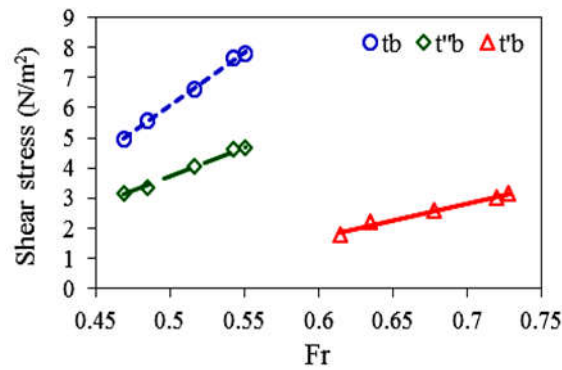
شکل ۴ نشان می‌دهد که رابطه تنش برشی و عدد فرود جریان در آبراهه‌های آبرفتی پوشیده از فرم بستر نیز همانند آبراهه‌های بدون فرم، به صورت مستقیم است یعنی با افزایش عدد فرود جریان  $\tau_b$  و  $\tau_b''$  افزایش یافتند.

در شکل ۵ تغییرات تنش برشی برای بسترهای پوشیده از رسوبات با اندازه ۲/۱۸ میلی‌متر و شیب ۰/۰۰۱۵ نشان داده شده است. در این شکل هر سه نمودار  $\tau_b$ ،  $\tau_b''$  و  $\tau_b'''$  ترسیم شده‌اند. مقادیر تنش برشی کل بیش از تنش برشی ناشی از اندازه ذرات رسوبی و تنش برشی ناشی از فرم بستر است چون طبق رابطه ۱۳ از مجموع آنها بدست می‌آید. در ضمن، مقادیر تنش برشی ناشی از فرم بستر بیش از مقادیر تنش برشی ناشی از اندازه ذرات رسوبی است زیرا میزان افت انرژی ناشی از فرم‌های بستر شکنج و تلماسه در رژیم جریان پایینی بیش از افت انرژی ناشی از اندازه ذرات بستر است. در واقع در رژیم جریان پایین، زبری ناشی از فرم بستر غالب است (۱۴ و ۳۰). بررسی نتایج نشان داد که تنش برشی ناشی از اندازه ذرات رسوبی ( $\tau_b$ ) برای ذرات با اندازه‌های ۰/۵۱ و ۲/۱۸ میلی‌متر بطور متوسط به ترتیب ۳۵/۱۹ و ۳۷/۶۲ درصد از تنش برشی کل ( $\tau_b$ ) را شامل می‌شود. علاوه بر این تنش برشی ناشی از فرم بستر ( $\tau_b''$ ) برای ذرات با اندازه‌های ۰/۵۱ و ۲/۱۸ میلی‌متر بطور متوسط به ترتیب ۶۴/۸۱ و ۶۲/۳۸ درصد از تنش برشی کل ( $\tau_b$ ) را شامل می‌شود. محاسبات بالا نشان می‌دهد که تنش برشی ناشی از فرم بستر، درصد بیشتری از تنش برشی کل را نسبت به تنش برشی ناشی از اندازه ذرات رسوبی شامل می‌شود که این امر ناشی از غالب بودن زبری (یا افت) ناشی از فرم‌های شکنج و تلماسه در رژیم جریان پایین است. در رژیم جریان

مستقیم دارد. از طرفی تنش برشی بستر نیز بر اساس رابطه شزی است، با سرعت متوسط جریان رابطه مستقیم دارد.

که در آن  $V$  سرعت متوسط جریان و  $C$  ضریب  $\tau_b = \frac{\gamma V^2}{C^2}$  می‌توان نتیجه گرفت که تنش برشی بستر و عدد فرود جریان با یکدیگر رابطه مستقیم دارند. محاسبات نشان داد که مقدار  $\tau_b'$  در بسترهای با ذرات ۲/۱۸ میلی‌متر به ازای شیب‌های ۰، ۰/۰۰۰۵، ۰/۰۰۰۱، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۱۵ بطور متوسط به ترتیب ۳۲، ۳۳/۳۵، ۳۱، ۲۹/۸ و ۲۸/۱۵ درصد بیش از بسترهای رسوبی با ذرات ۰/۵۱ میلی‌متر بود.

شکل ۴ نشان می‌دهد که با بزرگتر شدن اندازه ذرات بستر،  $\tau_b$  و  $\tau_b''$  نیز همانند  $\tau_b'$  افزایش پیدا کردند. تنش برشی ناشی از فرم بستر ( $\tau_b'''$ ) تابعی از اندازه فرم‌های بستر است و در اثر اختلاف فشار بین جلو و عقب فرم بستر بوجود می‌آید (۳۰). در این پژوهش اندازه فرم‌های بستر ثابت بودند اما همانگونه که شکل ۴ نشان می‌دهد بزرگتر شدن اندازه رسوبات تشکیل دهنده فرم بستر منجر به ازدیاد تنش برشی شده است که این به علت اثر اندازه ذرات رسوبی بر ابعاد ناحیه جداشدگی پس از تاج فرم بستر و تلاطم پس از فرم بستر است. با بزرگتر شدن اندازه ذرات رسوبی، ناحیه جداشدگی پس از تاج فرم بستر و همچنین تلاطم پس از آن افزایش می‌یابد که این امر منجر به ازدیاد افت جریان و افزایش تنش برشی می‌شود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که در آبراهه‌های آبرفتی پوشیده از فرم بستر نیز همانند آبراهه‌های بدون فرم، هر چقدر اندازه ذرات رسوبی تشکیل دهنده فرم بستر بزرگتر شود تنش برشی افزایش می‌یابد. به دلیل اینکه تنش برشی کل از مجموع تنش برشی ناشی از اندازه ذرات و تنش برشی ناشی از فرم بستر بدست می‌آید (رابطه ۱۳) بنابراین،  $\tau_b$  نیز همانند  $\tau_b'$  و  $\tau_b''$  با اندازه ذرات رسوبی رابطه مستقیم دارد و با ازدیاد اندازه ذرات رسوبی  $\tau_b$  نیز افزایش می‌یابد. محاسبات نشان داد که  $\tau_b''$  در بسترهای رسوبی با ذرات ۲/۱۸ میلی‌متر به ازای شیب‌های ۰، ۰/۰۰۰۵، ۰/۰۰۰۱، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۱۵ بطور متوسط به ترتیب ۲۴/۴۸، ۱۴/۶۸،



شکل ۵. تغییرات تنش برشی در برابر عدد فرود جریان برای شیب ۰/۰۱۵ (رنگی در نسخه الکترونیکی)

پارامترهای  $\tau_b$ ،  $\tau'_b$  و  $\tau''_b$  افزایش پیدا کردند. محاسبات نشان داد که پارامترهای  $\tau_b$ ،  $\tau'_b$  و  $\tau''_b$  در بسترهای رسوبی با اندازه ۲/۱۸ میلی‌متر بطور متوسط به ترتیب ۲۲/۳۸، ۳۰/۸۶ و ۲۲/۳ درصد بیش از بسترهای رسوبی با اندازه ۰/۵ میلی‌متر بودند. نتایج نشان داد که تنش برشی ناشی از فرم بستر، درصد بیشتری از تنش برشی کل را نسبت به تنش برشی ناشی از اندازه ذرات رسوبی شامل شد. برای ذرات با اندازه‌های ۰/۵۱ میلی‌متر،  $\tau_b$  و  $\tau'_b$  بطور متوسط به ترتیب ۳۵/۱۹ و ۶۴/۸۱ درصد از تنش برشی کل ( $\tau_b$ ) را شامل شدند. در صورتی که برای ذرات با اندازه‌های ۲/۱۸ میلی‌متر،  $\tau_b$  و  $\tau'_b$  بطور متوسط به ترتیب ۳۷/۶۲ و ۶۲/۳۸ درصد از تنش برشی کل ( $\tau_b$ ) را شامل شدند. مقدار  $\tau''_b$  برای ذرات با اندازه‌های ۰/۵۱ و ۲/۱۸ میلی‌متر بطور متوسط به ترتیب ۸۴/۷۶ و ۶۶/۵ درصد بیش از  $\tau_b$  محاسبه شد.

#### سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی از محل پژوهانه نویسنده دوم انجام شده است. بدینوسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز تشکر و قدردانی می‌شود (SCU.WH98.31373).

بالایی که فرم‌های بستر پادتلماسه تشکیل می‌گردند، مقاومت ناشی از زبری ذرات غالب است (۱۴ و ۳۰). با توجه به نتایج می‌توان دریافت که مقدار  $\tau''_b$  برای ذرات با اندازه‌های ۰/۵۱ و ۲/۱۸ میلی‌متر بطور متوسط به ترتیب ۸۴/۷۶ و ۶۶/۵ درصد بیش از  $\tau'_b$  است. مطالعات افصلی مهر و همکاران (۲) نشان می‌دهد که در حالت وجود فرم بستر، بیش از ۷۰ درصد مقاومت جریان ناشی از اثر فرم بستر بوده و فقط تا ۳۰ درصد ناشی از اندازه زبری ذره است.

#### نتیجه‌گیری

در این پژوهش به مطالعه تنش برشی در آبراهه پوشیده از فرم بستر شکنج با اندازه رسوبات متفاوت (۰/۵۱ و ۲/۱۸ میلی‌متر) تحت شیب‌ها و شرایط هیدرولیکی مختلف پرداخته شد. نتایج نشان داد که در بسترهای بدون فرم بستر، ازدیاد عمق نسبی ( $y/d_{50}$ ) سبب افزایش تنش برشی ناشی از اندازه ذرات رسوبی ( $\tau_b$ ) شد. در بسترهای پوشیده از فرم بستر نیز افزایش  $y/\Delta$  باعث افزایش تنش برشی کل شد. رابطه پارامترهای  $\tau_b$ ،  $\tau'_b$  و  $\tau''_b$  با عدد فرود جریان بصورت مستقیم مشاهده شد یعنی با ازدیاد عدد فرود جریان هر سه پارامتر  $\tau_b$ ،  $\tau'_b$  و  $\tau''_b$  افزایش یافتند. در ضمن با بزرگتر شدن اندازه ذرات بستر، مقادیر

#### منابع مورد استفاده

- Arman, A. and M. Fathi Moghaddam. 2013. Study of shear stress distribution in a compound rectangular section. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering* 36(3): 55-66 (In Persian).

2. Afzalimehr, H., V. P. Singh and E. Fazel Najafabadi. 2010. Determination of form friction factor. *Journal of Hydrologic Engineering* 15(3): 237-243.
3. Bahrami Yarahmadi, M., M. Shafai Bejestan and S. Pagliara. 2020. An experimental study on the secondary flows and bed shear stress at a 90-degree mild bend with and without triangular vanes. *Journal of Hydro-Environment Research* 33: 1-9.
4. Beygi, P. and B. Lashkara-Ara. 2019. Estimation of boundary shear stress in smooth rectangular open channel by considering the effect of velocity gradient. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research* 20(74): 107-120 (In Persian).
5. Brakenhoff, L., R. Schrijvershof, J. van der Werf, B. Grasmeyer, G. Ruessink and M. van der Veg. 2020. From ripples to large-scale sand transport: The effects of bedform-related roughness on hydrodynamics and sediment transport patterns in Delft3D. *Journal of Marine Science and Engineering* 8(11):892.
6. Chegini, A. H. N. and G. Pender. 2012. Determination of small size bed load sediment transport and its related bed form under different uniform flow conditions. *WSEAS Transactions on Environment and Development* 8(4): 158-167.
7. Davarpanah-Jazi, S., A.R. Kabiri-Samani and H. Afzalimehr. 2016. Effects of straight-crested gravel bed-forms and vegetated banks on turbulent flow characteristics. *Modares Civil Engineering Journal* 16(2): 103-115 (In Persian).
8. Dey, S., P. Paul, H. Fang and E. Padhi. 2020. Hydrodynamics of flow over two-dimensional dunes. *Physics of Fluids* 32(2): 025106.
9. Fazli, M. and E. kahrizi. 2018. Determination of substrate shear stress and current energy around impervious angular obstacles and all kinds of permeable barriers in the direct channel with moving bed. *Journal of Hydraulics* 13(3): 31-45 (In Persian).
10. Fedele, J. J. and M. H. Garcia. 2001. Alluvial roughness in streams with dunes: A boundary-layer approach. *River, Coastal and Estuarine Morphodynamics* 37-59.
11. Ghasemi, M., M. Heidarpour and S. H. Tabatabaei. 2016. Investigation of distribution of velocity and turbulence intensity in presence of dunes and vegetation in a rectangular open channel. *Journal of Hydraulics* 10(3): 1-14 (In Persian).
12. Guo, J. and P. Y. Julien. 2005. Shear Stress in smooth rectangular open-channel flows. *Journal of Hydraulic Engineering* 125(3): 30-37.
13. Jafari Meanai, S. and E. Keshavarzi. 2007. Investigation of stress and kinetic energy on ripples in the bed of open channels. In: 6th Iranian Hydraulic Conference, Shahrekord University, Shahrekord, Iran (In Persian).
14. Julien, P. Y. 2010. Erosion and Sedimentation. 2<sup>nd</sup> edition, United States of America by Cambridge University Press, New York.
15. Kabiri, F., H. Afzalimehr, G. Smart and A.N. Rousseau. 2014. Flow over gravel dunes. *British Journal of Applied Science and Technology* 4(6): 905-911.
16. Kwoil, E., J. G. Venditti, R. W. Bradley and C. Winter. 2016. Flow structure and resistance over subaqueous high- and low-angle dunes. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 121: 545-564.
17. Knight, D. W., M. Omran and X. Tang. 2007. Modeling depth-averaged velocity and boundary shear in trapezoidal channels with secondary flows. *Journal of Hydraulic Engineering* 133(1): 39-47.
18. Lane, E. W. and E. J. Carlson. 1953. Some factors affecting the stability of canals constructed in coarse granular materials. In: Proceedings of International Association of Hydraulic Research, Minneapolis.
19. Lashkar-Ara, B. and M. Fathi-Moghadam. 2014. Analysis of shear stress in rectangular open channels using force balance method. *Journal of Hydraulics* 9(3): 33-44 (In Persian).
20. Molinas, A., K. Kheireldin and W. Baosheng. 1998. Shear stress around vertical wall abutments. *Journal of Hydraulic Engineering* 124(8): 822-830.
21. Motamedi, A. and H. Afzalimehr. 2013. Experimental investigation of dune dimensions on flow structure and separation length using ADV and PIV. *Journal of Water and Soil* 27(2): 328-341.
22. Nasiri Dehsorkhi, E., H. Afzalimehr and V. P. Singh. 2011. Effect of bed forms and vegetated banks on velocity distributions and turbulent flow structure. *Journal of Hydrologic Engineering* 16(6): 495-507.
23. Okhravi, S. and S. Gohari. 2020. Form friction factor of armored riverbeds. *Canadian Journal of Civil Engineering* 47(11).
24. Omid, M. H., M. Karbasi and J. Farhoudi. 2010. Effects of bed-load movement on flow resistance over bed forms. *Sadhana* 35(6): 681-691.
25. Raudkivi, A. J. 2006. Transition from ripples to dunes. *Journal of Hydraulic Engineering* 132: 1316-1320.
26. Ramezani, Y. and M. Ghomeshi. 2014. Effect of non-submerged rigid vegetation in floodplain on bed shear stress around bridge abutment. *Journal of Hydraulics* 9(1): 45-57 (In Persian).
27. Roshani, E., A. hossienzade Dalir, D. Farsadzade and F. Salmasi. 2017. Study of width reduced transition effects on ripple bed form height in various hydraulic conditions. *Journal of Water and Soil* 31(1): 28-39 (In Persian).

28. Safarzadeh, A. and S. Salehi Neyshabouri. 2012. Study of the bed shear stress distribution around river structures using three ports preston tube. *Journal of Hydraulics* 7(2): 47-62 (In Persian).
29. Samadi-Boroujeni, H., P. Maleki, M. J. Ketabdari and D. Maleki. 2015. Experimental study of the effect of the ripple bed Forms on the bed shear stress. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering* 38(2): 125-135 (In Persian).
30. Shafai Bajestan, M. 2008. Basic Theory and Practice of Hydraulics of Sediment Transport. Second edition, Shahid Chamran University of Ahvaz Press. (In Persian).
31. Simons, D. B. and E. V. Richardson. 1966. Resistance to flow in alluvial channels. Geological survey Professional Paper, 422-J.
32. Talebbeydokhti, N., A. A. Hekmatzadeh and G. R. Rakhshandehroo. 2006. Experimental modeling of dune bed form in a sand-bed channel. *Iranian Journal of Science and Technology, Transaction B, Engineering* 30(B4): 503-516.

## Experimental Study of the Effect of Ripple Bedforms with Fine and Coarse Sediments on Bed Shear Stress

M. Heydari<sup>1</sup>, M. Bahrami Yarahmadi<sup>2\*</sup> and M. Shafai Bejestan<sup>2</sup>

(Received: August 18-2021; Accepted: October 20-2021)

### Abstract

Bed shear stress is one of the most important hydraulic parameters to determine the amount of bed and suspended load and the bed and bank scouring in rivers. Bed shear stress depends on bedforms (ripples, dunes, and anti-dunes) in alluvial rivers. In this study, the effect of artificial ripple bedforms on bed shear stress has been investigated. Two types of uniform granulation with average sizes ( $d_{50}$ ) of 0.51 and 2.18 mm were used to roughen the surface of the artificial ripples. The bedform length and height were 20 and 4 cm, respectively. The angles of its upstream and downstream to the horizon were selected equal to 16.4 and 32 degrees, respectively. Different flow rates ( $Q= 10, 15, 20, 25,$  and  $30$  l/s) and different bed slopes ( $S= 0, 0.0001, 0.0005, 0.001,$  and  $0.0015$ ) were examined. The results showed that by increasing the particle size on the bed surface, total shear stress ( $\tau_b$ ), grain-related bed-shear stress ( $\tau'_b$ ), and form-related bed-shear stress ( $\tau''_b$ ) increase. The value of  $\tau_b$ ,  $\tau'_b$ , and  $\tau''_b$  in bed form roughened by sediment size of 2.18 mm were, on average, 22.38, 30.86, and 22.3% more than the bed form roughened by sediment size of 0.51 mm, respectively.

**Keywords:** Ripple, Dune, Alluvial rivers, Bed shear stress

1. Civil Engineering-Water and Hydraulic Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

2. Department of Water Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

\*: Corresponding author, Email: m.bahrami@scu.ac.ir