

مطالعه آزمایشگاهی تنش برشی بستر در آبراهه‌های مستقیم پوشیده از تلماسه‌های با ابعاد مختلف

مرضیه بادزن‌چین^۱، محمد بهرامی یاراحمدی^{۲*} و محمود شفاعی بجستان^۲

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۶/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۸/۱۶)

چکیده

تشکیل شکل بستر در رودخانه‌های آبرفتی در اثر انتقال رسوب بر پارامترهای هیدرولیکی جریان مانند تنش برشی بستر تأثیر قابل توجهی دارد. از طرف دیگر تشکیل شکل بستر و هندسه آن به تنش برشی بستر وابسته است. بنابراین، ارتباط بین شکل بستر و پارامترهای جریان مانند تنش برشی بستر پیچیده است. بنابراین، در این پژوهش به بررسی اثر شکل بستر تلماسه با ارتفاع‌های مختلف بر تنش برشی بستر پرداخته شده است. برای این منظور از تلماسه‌های مصنوعی ساخته شده توسط ملات ماسه سیمان به طول موج ۲۵ سانتی‌متر و ارتفاع‌های یک، دو، سه و چهار سانتی‌متر استفاده شد. در آزمایش‌های این پژوهش از دبی‌های ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ لیتر بر ثانیه و شیب‌های بستر ۰، ۰/۰۰۰۱، ۰/۰۰۰۵، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۱۵ استفاده شد. نتایج نشان داد که تنش برشی در بسترهای پوشیده از تلماسه رابطه مستقیمی با استغراق نسبی و پارامتر Δ/l دارد. تشکیل شکل بستر تلماسه و افزایش ارتفاع آن منجر به ازدیاد تنش برشی بستر می‌شود. تنش برشی در بستر پوشیده از تلماسه با ارتفاع‌های یک، دو، سه و چهار سانتی‌متر بطور متوسط به ترتیب ۳۹، ۸۰، ۱۴۱ و ۱۴۶ درصد بیش از تنش برشی در بستر صاف بود. علاوه بر این، تنش برشی ناشی از شکل بستر برای بسترهای پوشیده از تلماسه‌های به ارتفاع یک، دو، سه و چهار سانتی‌متر، به‌طور متوسط به ترتیب ۲۷/۳۷، ۴۳، ۵۷/۱۱ و ۵۸/۷۴ درصد از تنش برشی کل را شامل شد.

واژه‌های کلیدی: انتقال رسوب، بار بستر، شکل بستر، تلماسه، تنش برشی

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد 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

برای هر اندازه ذره رسوب، تنش برشی خاصی وجود دارد که به ازای آن ذرات بستر شروع به حرکت می‌کنند که به آن تنش برشی آستانه حرکت می‌گویند. اگر تنش برشی وارد از طرف جریان بر بستر رودخانه بیش از تنش برشی آستانه حرکت باشد، حرکت رسوب اتفاق می‌افتد. پارامتر تنش برشی بستر در مباحث فرسایش و رسوبگذاری و انتقال رسوب اهمیت زیادی دارد و در روابط آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد (۲۱).

حرکت رسوب در رودخانه‌ها بصورت بار بستر (ذرات درشت دانه‌ای که در نزدیکی بستر حرکت می‌کنند) و یا بار معلق (ذرات ریز دانه‌ای که توسط جریان حمل می‌شوند) و یا ترکیبی از هر دو صورت می‌گیرد. انتقال رسوب در رودخانه‌های آبرفتی سبب می‌شود که بستر رودخانه شکل‌های گوناگونی به خود بگیرد که به آن شکل بستر گویند. شکل‌های بستر دارای انواع مختلفی هستند مانند شکنج (Ripple)، تلماسه (Dune)، پاد تلماسه (Anti-dune)، سرسره و استخر (Chute and pool). هر کدام از شکل‌های بستر تحت شرایط هیدرولیکی و رسوبی مشخصی تشکیل می‌شوند و شکل و هندسه آن‌ها با هم متفاوت است. شکل‌های بستر شکنج و تلماسه به شکل مثلث نامتقارن هستند و در اعداد فرود کوچکتر از یک تشکیل می‌شوند. البته هندسه تلماسه‌ها بزرگتر از شکنج‌ها است. نیمرخ پاد تلماسه‌ها سینوسی است و در اعداد فرود بزرگتر از یک تشکیل می‌شوند. سرسره و استخر در شیب‌های تند با سرعت جریان بالا و غلظت رسوب زیاد رخ می‌دهند (۶، ۱۲ و ۲۱). پژوهش‌هایی که روی شکل‌های بستر در داخل و خارج کشور صورت گرفته به قرار زیر است:

رانگاراچو و سونی (۱۸) به بررسی هندسه شکنج‌ها و تلماسه‌ها در آبراهه‌ها پرداختند. آنها بیان کردند که ویژگی‌های هندسی شکل‌های بستر تأثیر معنی‌داری بر زبری هیدرولیکی دارد. طالب بیدختی و همکاران (۲۳) 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 تأثیر مقاومت ناشی از شکل بستر ناچیز نبود، به گونه‌ای که مقاومت ناشی از شکل بستر تلماسه حدود ۲۵ تا ۵۵ درصد از مقاومت کل را شامل می‌شد. جعفری میانایی و کشاورزی (۱۱) پراکنش تنش برشی رینولدز و تغییرپذیری‌های انرژی جنبشی بر روی شکنج‌های مصنوعی را بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که میزان تنش برشی از لحاظ میزان در فاصله بین دو شکنج شروع به افزایش کرده و در ابتدای شیب وجه بالادست شکنج دوم، به بیشترین میزان خود رسید. اسماعیلی و همکاران (۷) به بررسی تأثیر شکل بستر تلماسه بر روی ضریب زبری در جریان غیر ماندگار پرداختند. نتایج نشان داد که روند تغییر ضریب مقاومت بستر (n) با گذشت زمان بنا بر شرایط فرسایش، در آغاز روند افزایشی داشت، پس از آن کاهش و بار دیگر افزایش یافت. امید و همکاران (۱۷) به بررسی تأثیر حرکت بار بستر بر مقاومت در برابر جریان در آبراهه‌های آبرفتی دارای شکل بستر تلماسه پرداختند. نتایج نشان داد که انتقال رسوب‌های با اندازه میانگین ۰/۵ میلی‌متر ضریب اصطکاک را برای شکل‌های بستر صاف و زبر به ترتیب ۲۲ و ۲۴ درصد کاهش داد در صورتی که انتقال رسوب‌های با اندازه میانگین ۲/۸۴ میلی‌متر ضریب اصطکاک را برای شکل‌های بستر صاف و زبر به ترتیب ۳۲ و ۳۹ درصد کاهش داد. افضل‌مهر و همکاران (۱) ضریب اصطکاک داریسی و یسباز در رودخانه‌های شنی با شکل بستر را مطالعه کردند. آن‌ها دریافتند که بخش عمده‌ای از ضریب اصطکاک داریسی و یسباز 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 شکل بستر وجود داشت. نصیری دهرسخی و همکاران (۱۵) به بررسی تأثیر شکل‌های بستر و ساحل‌های با پوشش گیاهی (ساقه‌های برنج) بر پراکنش سرعت و ساختار جریان متلاطم پرداختند. نتایج نشان داد که با کاهش فاصله از دیوار با پوشش گیاهی، بیشینه سرعت در فاصله دورتر از سطح آب رخ داد. پراکنش تنش رینولدزی بستگی به فاصله از دیوار داشت، به طور کلی با

نتایج نشان داد که در تلماسه‌های با تاج مسطح بر خلاف تلماسه‌های با تاج تیز، در هر دو حالت با و بدون پوشش گیاهی، پارامتر سرعت پس از تاج مسطح میزان‌های منفی به خود نمی‌گیرد. تنش‌های رینولدز در حالت با پوشش گیاهی نسبت به حالت بدون پوشش گیاهی بیشتر بود. روشنی و همکاران (۱۹) تأثیر تبدیل کاهش‌دهنده عرض بر ارتفاع شکل بستر شکنج را در شرایط هیدرولیکی مختلف بررسی کردند. نتایج نشان داد که کاهش عرض آبراهه به کمک تبدیل‌ها نقش مؤثری بر ارتفاع شکنج‌ها داشته و می‌توان تا حد زیادی به کمک تغییر در زاویه‌های تبدیل‌ها، حرکت‌های رسوب‌های به پایین‌دست را کنترل کرد. دقیق و همکاران (۴) به بررسی تشکیل و توسعه شکنج‌های رسوبی تحت امواج پرداختند. نتایج نشان دادند که با افزایش ارتفاع و پرپود موج، بر ارتفاع و طول موج شکنج‌ها افزوده شد. اخروی و گوهری (۱۶) فاکتور اصطکاکی ناشی از شکل بستر را در رودخانه‌های درشت‌دانه در حضور لایه سپر را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که فاکتور اصطکاکی مستقل از توزیع اندازه ذرات تشکیل‌دهنده بستر و حداکثر اندازه آن‌ها بود و پارامتر اصلی کنترل‌کننده آن شیب خط انرژی بود. فاکتور اصطکاکی ناشی از شکل بستر ۴۰ درصد از فاکتور اصطکاکی کل به‌دست آمد. حیدری و همکاران (۹ و ۱۰) به بررسی آزمایشگاهی اثر شکل‌های بستر با اندازه رسوبات مختلف بر مقاومت جریان و تنش برشی بستر پرداختند. آن‌ها در این پژوهش از شکل‌هایی به طول موج و ارتفاع به ترتیب ۲۰ و ۴ سانتی‌متر استفاده کردند. علاوه بر این، در این پژوهش از رسوبات با اندازه‌های ۵/۱ و ۲/۱۸ میلی‌متر برای زبرکردن سطح شکل‌های بستر مصنوعی استفاده شد. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که ضریب اصطکاکی کل و تنش برشی کل در بسترهای رسوبی با اندازه ۲/۱۸ میلی‌متر به‌طور متوسط ۳۲ و ۲۲ درصد بیش از بسترهای رسوبی با اندازه ۵/۱ میلی‌متر بود.

شکل، هندسه و ابعاد فرم بستر بر میزان تنش برشی بستر مؤثر است (۶). بررسی‌های نویسندگان این پژوهش نشان می‌دهد که

کاهش فاصله از دیوار تنش رینولدزی کمتر شد. چگنی و پندر (۳) به بررسی آزمایشگاهی بار بستر ریزدانه و شکل‌های بستر مربوط به آن در شرایط جریان یکنواخت پرداختند. نتایج نشان داد که بار بستر و شکل‌های تشکیل شده مرتبط با آن، با افزایش شیب بستر و نسبت عمق آب به اندازه ذرات رسوبی تغییر می‌کنند. میزان پارامتر بار بستر و شدت انتقال، با افزایش اندازه ذرات رسوب کاهش یافت. کبیری و همکاران (۱۳) به بررسی جریان روی تلماسه‌های شنی پرداختند. نتایج نشان داد که زبری سطح تلماسه نقش مهمی در پراکنش سرعت ناحیه نزدیک بستر ($Z/H < 0.3$) که در آن ارتفاع تلماسه و H عمق جریان است) دارد اما هیچ تأثیری در پراکنش سرعت در ناحیه جریان بیرونی ($Z/H > 0.3$) ندارد. با افزایش زبری سطح تلماسه‌های شنی، میزان‌های بیشینه تنش‌های برشی رینولدز روی ناحیه‌های فرورفتگی، تاج و وجه‌بالادست افزایش یافت. صمدی بروجنی و همکاران (۲۰) اثر دو نوع شکنج (موازی و پولکی) را روی ضریب زبری مانینگ بررسی کردند. نتایج نشان داد که زبری شکل شکنج در حالت موازی حدود ۴۷ درصد و در حالت پولکی حدود ۴۳ درصد از زبری کل را تشکیل داد. کول و همکاران (۱۴) به بررسی ساختار و مقاومت در برابر جریان روی تلماسه‌ها پرداختند. نتایج نشان داد که مقاومت در برابر جریان با کاهش شیب تلماسه کاهش یافت. برای تلماسه‌های با شیب‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه تنش برشی به ترتیب ۸، ۳۳ و ۹۰ درصد بیشتر از بستر بدون شکل بود. قاسمی و همکاران (۸) به بررسی پراکنش سرعت و شدت آشفته‌گی در حضور تلماسه و پوشش گیاهی (ساقه برنج) در یک آبراهه مستطیلی روباز پرداختند. نتایج نشان داد که افزایش ارتفاع تاج تلماسه از چهار به هشت سانتی‌متر، ناحیه جدایی جریان را از نزدیکی تاج تلماسه با ارتفاع چهار سانتی‌متر به نزدیکی بخش فرورفته انتقال داد. با افزایش ارتفاع تاج تلماسه میزان بیشینه تنش در فاصله دورتری از بستر رخ داد. داورپناه جزئی و همکاران (۵) اثرات تلماسه‌های شنی با تاج مسطح و پوشش گیاهی در دیواره (خومه) بر پارامترهای جریان آشفته را مورد مطالعه قرار دادند.

عدد رینولدز جریان است و با توجه به اینکه در جریان‌های متلاطم تأثیر این پارامتر ناچیز است بنابراین، از این پارامتر نیز صرف نظر می‌شود. F_r عدد فرود جریان است که پارامتر مؤثری است. θ پارامتری ثابت در این مطالعه بود ($\theta=32^\circ$) بنابراین، این پارامتر نیز از رابطه فوق حذف می‌شود. $\frac{y}{\Delta}$ پارامتر استغراق نسبی جریان است که از تقسیم عمق جریان بر ارتفاع شکل بستر محاسبه می‌شود. $\frac{\Delta}{\lambda}$ از تقسیم ارتفاع به طول موج شکل بستر محاسبه می‌شود. با توجه به اینکه پارامتر α تابعی از نسبت ارتفاع شکل بستر به طول آن است بنابراین، از این پارامتر نیز به علت آنکه پارامتر $\frac{\Delta}{\lambda}$ در رابطه نهایی وجود دارد، صرف نظر می‌شود. بنابراین، پارامترهای بی‌بعد مؤثر بر تنش برشی بستر در مجاری پوشیده از تلماسه به قرار زیر است:

$$\tau = f\left(\frac{y}{\Delta}, \frac{\Delta}{\lambda}, S_f, F_r\right) \quad (3)$$

تجهیزات آزمایشگاهی و روش انجام آزمایش‌ها

آزمایش‌ها در یک فلوم مستقیم به طول ۱۲ متر و عرض ۰/۳ متر و در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی آب و محیط زیست دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. این فلوم شیب‌پذیر بوده و دارای دیواره‌های شیشه‌ای است. در شکل ۲ پلان فلوم آزمایشگاهی بصورت شماتیک ترسیم شده است. دبی جریان توسط یک شیر فلکه که بر روی لوله ورودی به فلوم نصب شده بود، تنظیم می‌شد. برای اندازه‌گیری دبی جریان از دبی‌سنج اولتراسونیک (مدل +Digi Sonic E) استفاده شد. میزان دقت دستگاه به‌ازای سرعت‌های بزرگتر و مساوی ۰/۵ متر بر ثانیه برابر $\pm 1\%$ میزان قرائت شده و برای سرعت‌های کوچکتر از ۰/۵ متر بر ثانیه معادل ± 0.5 سانتی‌متر بر ثانیه بود. برای اندازه‌گیری عمق جریان، از یک عمق‌سنج با دقت ۰/۱ میلی‌متر استفاده شد.

شکل‌های بستر شکنج و تلماسه به شکل مثلث نامتقارن با شیب ملایم طولانی در وجه بالادست و شیب تند کوتاه در وجه پایین دست هستند. شیب وجه پایین دست مثلث برابر با زاویه

تاکون در هیچ پژوهشی به بررسی اثر ارتفاع تلماسه بر تنش برشی بستر پرداخته نشده است. بنابراین، در پژوهش حاضر به بررسی پارامتر تنش برشی در بستر پوشیده از تلماسه با ارتفاع‌های مختلف در یک فلوم مستقیم پرداخته شد. برای این منظور شکل بستر تلماسه بصورت مصنوعی و با استفاده از ملات ماسه سیمان و با ارتفاع‌های یک، دو، سه و چهار سانتی‌متر ساخته شدند. طول موج تلماسه‌ها ثابت و برابر ۲۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. آزمایش‌های این پژوهش تحت دبی‌ها و شیب‌های مختلف بستر انجام شد. مقادیر تنش برشی بستر برای تلماسه‌های با ارتفاع‌های مختلف (تحت دبی‌ها و شیب‌های مختلف بستر) محاسبه و تجزیه و تحلیل شدند.

مواد و روش‌ها

آنالیز ابعادی

متغیرهای مؤثر بر تنش برشی بستر در بسترهای با تلماسه به شرح زیر است:

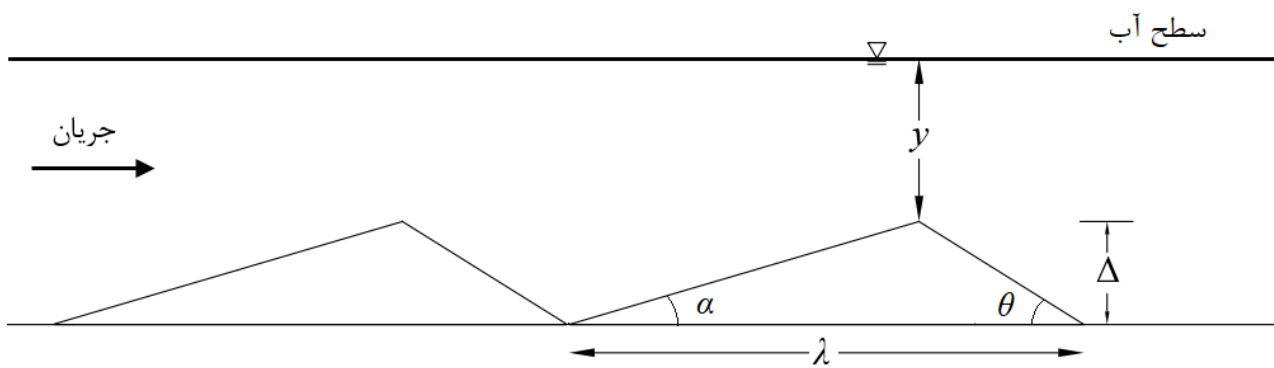
$$\tau = f(V, y, g, \rho_w, \mu, \rho_s, d_{50}, B, S_f, \lambda, \Delta, \alpha, \theta) \quad (1)$$

که در آن، τ تنش برشی بستر، V سرعت متوسط جریان، y عمق متوسط جریان، g شتاب ثقل، ρ_w جرم مخصوص آب، μ گرانروی دینامیکی آب، ρ_s جرم مخصوص ذرات رسوب، d_{50} قطر متوسط ذرات رسوب، B عرض مجرا، S_f شیب خط انرژی، λ طول موج شکل بستر، Δ ارتفاع شکل بستر تلماسه، α زاویه وجه بالادست شکل بستر نسبت به افق و θ زاویه وجه پایین دست شکل بستر نسبت به افق است. در شکل ۱ متغیرهای مربوط به شکل بستر تلماسه نشان داده شده است.

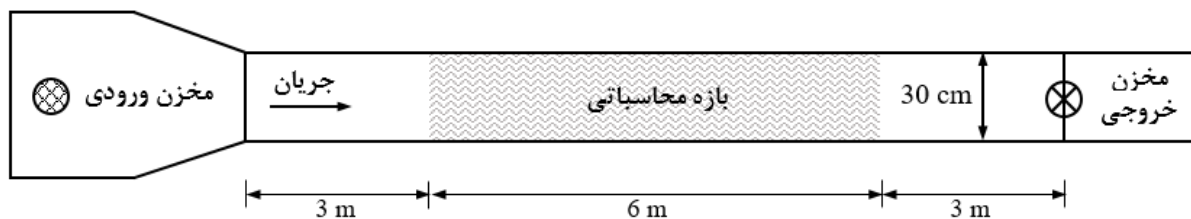
با استفاده از تئوری π باکینگهام، پارامترهای بی‌بعد مطابق رابطه ۲ استخراج شد:

$$\tau = f\left(\frac{y}{\Delta}, \frac{\Delta}{\lambda}, \alpha, \theta, S_f, F_r, R_e, G_s\right) \quad (2)$$

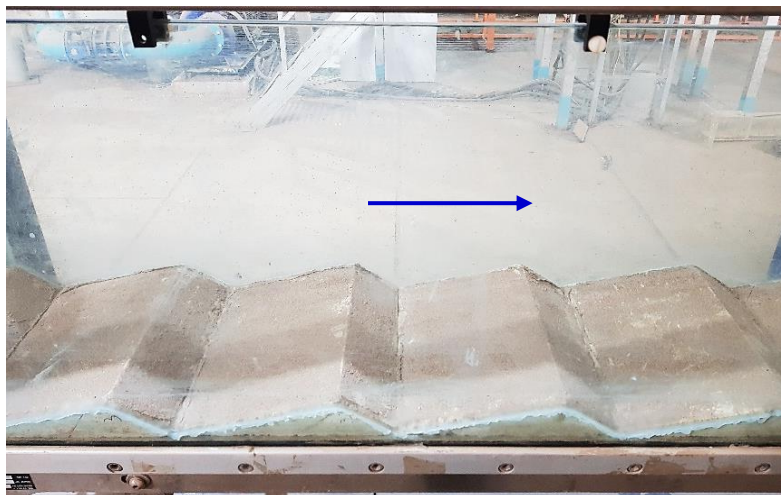
در رابطه فوق، G_s چگالی نسبی ذرات رسوبی است که با توجه به اینکه در این پژوهش از ماسه برای ذرات رسوبی استفاده شده است، این پارامتر ثابت و برابر ۲/۶۵ است. R_e



شکل ۱. نمای جانبی از شکل بستر تلماسه و متغیرهای آن



(الف)



(ب)

شکل ۲. الف: پلان فلوم آزمایشگاهی و ب: نمای جانبی از بستر با تلماسه

انتخاب شد. در این پژوهش ۴ ارتفاع مختلف برای تلماسه (یک، دو، سه و چهار سانتی‌متر) در نظر گرفته شد تا اثر ارتفاع شکل بستر بر تنش برشی بستر بررسی شود.

برای ساخت تلماسه‌ها ابتدا قالب آن‌ها با ارتفاع‌های یک، دو، سه و چهار سانتی‌متر و طول ۲۵ سانتی‌متر و از جنس ورق گالوانیزه ساخته شد. از ملات ماسه سیمان برای ساخت تلماسه‌ها استفاده شد. قبل از ریختن ملات درون قالب‌های

ایستایی رسوبات بستر ($\approx 32^\circ$) است (۶ و ۲۱). شکل‌های بستر شکنج دارای طول موج کمتر از ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع حداکثر پنج سانتی‌متر هستند. البته طول موج شکل بستر تلماسه می‌تواند بزرگتر از شکنج باشد (۲۱ و ۲۲). بنابراین، در این پژوهش شکل بستر تلماسه به شکل مثلث نامتقارن و با استفاده از ملات ماسه سیمان درست شد. طول موج هر تلماسه برابر ۲۵ سانتی‌متر و زاویه وجه پایین‌دست آن برابر ۳۲ درجه

فاصله مقطع یک از ابتدای بستر پوشیده از رسوب، دو متر بود. با اندازه‌گیری عمق جریان (y) در مقاطع یک و دو 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 یک و دو با استفاده از رابطه ۴ محاسبه شد.

$$h_f = \left(y_1 + \frac{V_1^2}{2g} \right) - \left(y_2 + \frac{V_2^2}{2g} \right) + \Delta Z \quad (4)$$

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

$$S_f = \frac{h_f}{L} \quad (5)$$

$$Re = \frac{4VR}{v} \quad (6)$$

$$f = \frac{8RgS_f}{V^2} \quad (7)$$

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

در فلوم‌های آزمایشگاهی با دیواره صاف، زمانی که عرض فلوم از پنج برابر عمق جریان کمتر باشد مقاومت دیواره جانبی با مقاومت بستر متفاوت خواهد بود. ضریب اصطکاک دیواره (f_w) برای فلوم‌های با دیواره صاف را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد (۱۲):

$$f_w = 0.0026 \left(\log \left(\frac{Re}{f} \right) \right)^2 - 0.0428 \log \left(\frac{Re}{f} \right) + 0.1884 \quad (8)$$

بنابراین، ضریب اصطکاک بستر (f_b) و تنش برشی بستر (τ) طبق روابط زیر محاسبه شدند (۱۲):

فلزی، درون قالب‌ها با روغن چرب می‌شد تا ملات پس از خشک شدن به راحتی از قالب‌ها جدا شود. پس از جداکردن تلماسه‌های سیمانی از قالب، چند روز در معرض آفتاب قرار می‌گرفتند. در حین خشک شدن تلماسه‌های سیمانی به‌طور مداوم به آن‌ها آب اضافه می‌شد تا مقاومت آن‌ها به بالاترین حد برسد و شکل‌ها پس از خشک شدن شکننده نباشند. پس از ساخت تلماسه‌ها با ملات ماسه سیمان و خشک شدن آن‌ها، برای زیرکردن سطح آن‌ها از رسوبات با اندازه‌ی متوسط ۰/۴۵ میلی‌متر استفاده شد. رسوبات با استفاده از چسب آهن بر روی تلماسه‌های سیمانی چسبانده شدند. برای هر ارتفاع شکل بستر، تعداد ۲۴ عدد شکل بستر سیمانی ساخته شد. بنابراین، مجموع تلماسه‌های سیمانی ساخته شده برای ارتفاع‌های مختلف ۹۶ عدد بود. در آزمایش‌های مربوط به هر ارتفاع شکل بستر، تلماسه‌های سیمانی در طولی معادل شش متر و در کف فلوم چسبانده شدند. فاصله ابتدای بستر پوشیده از تلماسه، از ابتدای فلوم ۳ متر انتخاب شد.

آزمایش‌های پژوهش حاضر به دو دسته بستر بدون تلماسه و بستر با تلماسه تقسیم می‌شود. در آزمایش‌های بدون تلماسه نیز از رسوبات با اندازه متوسط ۰/۴۵ میلی‌متر برای زیرکردن بستر استفاده شد. رسوبات مذکور در طولی حدود ۶ متر به کف کانال آزمایشگاهی چسبانده شدند. فاصله کف پوشیده از رسوبات از ابتدای فلوم برابر سه متر در نظر گرفته شد.

در آزمایش‌های این پژوهش از دبی‌های ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ لیتر بر ثانیه و شیب‌های بستر ۰، ۰/۰۰۰۱، ۰/۰۰۰۵، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۱۵ استفاده شد. در مجموع تعداد کل آزمایش‌ها برابر ۱۲۵ عدد بود.

محاسبات

برای انجام محاسبات دو مقطع یک و دو در کف فلوم که فاصله آن‌ها از یکدیگر (L) حدود دو متر بود، در نظر گرفته شد.

(به‌عنوان نمونه) برای تلماسه‌های با ارتفاع مختلف نشان داده شده است. در محور عمودی این شکل تنش برشی بستر بر حسب نیوتن بر متر مربع است. با دقت در شکل ملاحظه می‌کنید که با افزایش پارامتر استغراق نسبی تنش برشی بستر افزایش یافته است و این نتیجه برای همه شیب‌ها و همچنین برای تلماسه‌های با ارتفاع مختلف صادق است. در بسترهای پوشیده از تلماسه با ارتفاع معین، افزایش γ/Δ در اثر افزایش دبی جریان و در نتیجه عمق جریان رخ داده است. البته افزایش دبی جریان باعث ازدیاد سرعت جریان نیز شده است. از آنجایی که تنش برشی بستر با عمق و سرعت جریان رابطه مستقیم دارد بنابراین، افزایش γ/Δ منجر به ازدیاد تنش برشی بستر می‌شود. آرمان و فتحی مقدم (۲) که تغییرات تنش برشی بستر صاف (بدون تلماسه) در کانال‌های مرکب با مقطع مستطیلی را بررسی کردند، نیز دریافتند که با افزایش عمق جریان تنش برشی بستر افزایش می‌یابد. نتایج پژوهش حیدری و همکاران (۱۰) که بر روی شکنج‌های با اندازه ذرات رسوبی متفاوت پژوهش کردند، نیز تأییدکننده این نتیجه است.

شکل ۵ تغییرات تنش برشی بستر (برحسب نیوتن بر متر مربع) در برابر پارامتر (Δ/λ) برای شیب بستر ۰/۰۰۰۱ را نشان می‌دهد. پارامتر Δ/λ برابر با نسبت ارتفاع به طول موج تلماسه است. با دقت در شکل ملاحظه می‌کنید که به‌ازای هر دبی، با افزایش پارامتر Δ/λ تنش برشی بستر افزایش می‌یابد. افزایش پارامتر Δ/λ در اثر افزایش ارتفاع تلماسه اتفاق افتاده است. با افزایش این پارامتر، میزان جداشدگی جریان در پایین‌دست تاج تلماسه و در نتیجه میزان تلاطم در پایین‌دست تاج تلماسه بیشتر می‌شود که این امر منجر به ازدیاد افت جریان و افزایش تنش برشی بستر می‌شود. در دیگر شیب‌های بستر (صفر، ۰/۰۰۰۵، ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۱۵) نیز افزایش Δ/λ منجر به افزایش تنش برشی بستر شده است. محاسبات نشان داد که برای شیب بستر ۰/۰۰۰۱، تنش برشی بستر تلماسه‌های با Δ/λ برابر ۰/۰۸، ۰/۱۲ و ۰/۱۶ در دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه به‌طور متوسط ۲۹/۸، ۶۴/۱۱ و ۸۶/۹۱ درصد، در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه به‌طور

$$f_b = f + \frac{2y}{B}(f - f_w) \quad (9)$$

$$R_b = \left(\frac{f_b}{f}\right)R \quad (10)$$

$$\tau = \gamma R_b S_f \quad (11)$$

که در آن B عرض فلوم است.

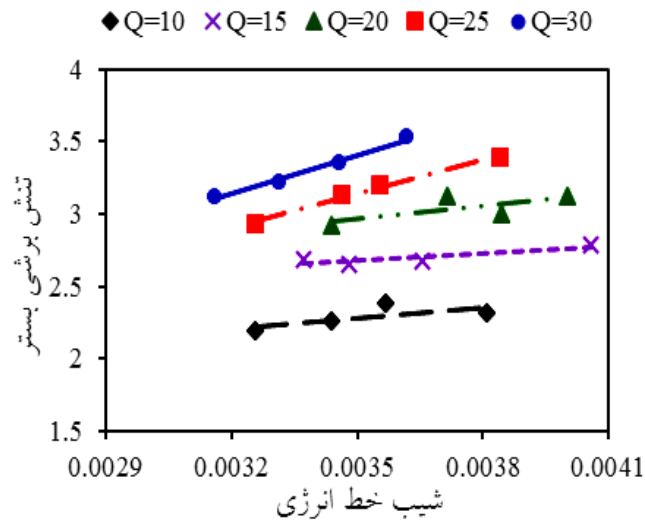
در آبراهه‌های پوشیده از شکل بستر، تنش برشی کل وارد بر بستر (τ) به دو قسمت، تنش برشی ناشی از ذرات رسوبی بستر (τ') و تنش برشی ناشی از شکل بستر (τ'') تقسیم می‌شود. در این پژوهش از بستر بدون تلماسه (صاف)، برای تعیین تنش برشی ناشی از ذرات رسوبی بستر (τ') استفاده شد. با استفاده از رابطه (۱۱)، مقدار تنش برشی مربوط به ذرات رسوبی (τ') در آزمایش‌های بدون تلماسه محاسبه شد. علاوه بر آن، مقدار تنش برشی کل (τ) نیز توسط رابطه (۱۱) در آزمایش‌های با تلماسه حساب شد. در نهایت با استفاده از رابطه زیر مقدار تنش برشی مربوط به شکل بستر (τ'') محاسبه شد (۲۱):

$$\tau = \tau' + \tau'' \quad (12)$$

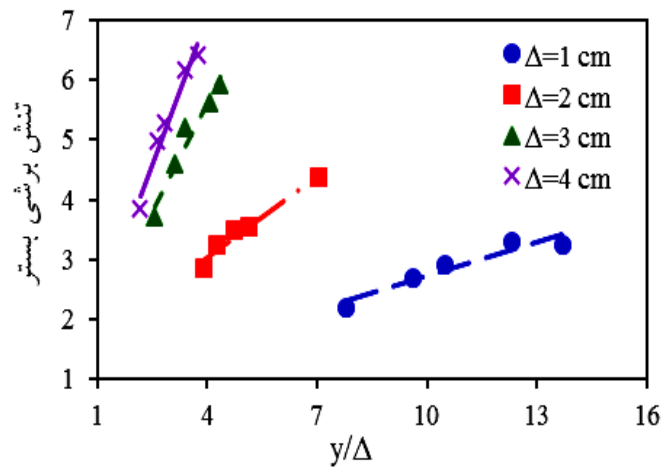
نتایج و بحث

در شکل ۳ تغییرات تنش برشی بستر (برحسب نیوتن بر متر مربع) در برابر شیب خط انرژی برای تلماسه با ارتفاع یک سانتی‌متر به‌عنوان نمونه ارائه شده است. این شکل نشان می‌دهد که در همه دبی‌ها با افزایش شیب خط انرژی، تنش برشی بستر افزایش یافته است که این ناشی از رابطه مستقیم تنش برشی بستر و شیب خط انرژی طبق رابطه $\tau = \gamma R S_f$ است. روند تغییرات تنش برشی بستر در برابر شیب خط انرژی در دبی‌های کوچکتر مساوی ۲۰ لیتر بر ثانیه ملایم‌تر و در دبی‌های بیشتر از ۲۰ لیتر بر ثانیه شدیدتر است. محاسبات نشان داد که در بسترهای پوشیده از تلماسه‌های با ارتفاع یک سانتی‌متر، تنش برشی در دبی‌های ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ لیتر بر ثانیه به‌طور متوسط به‌ترتیب ۱۸، ۳۳، ۳۸ و ۴۴ درصد بیش از تنش برشی در دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه است.

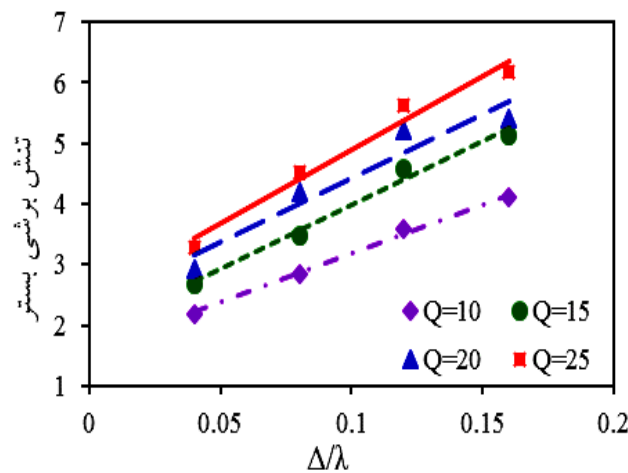
در شکل ۴ تغییرات تنش برشی بستر (برحسب نیوتن بر متر مربع) در برابر استغراق نسبی (γ/Δ) به‌ازای شیب ۰/۰۰۰۱



شکل ۳. تغییرات تنش برشی بستر در برابر شیب خط انرژی برای بستر پوشیده از تلماسه با ارتفاع یک سانتی‌متر (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۴. تغییرات تنش برشی بستر در برابر استغراق نسبی برای تلماسه‌های با ارتفاع‌های مختلف (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۵. تغییرات تنش برشی بستر در برابر پارامتر Δ/λ (رنگی در نسخه الکترونیکی)

شکل بستر بیشتر شود، میزان افت جریان و در نتیجه تنش برشی ناشی از شکل بستر (τ') نیز افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه افزایش ارتفاع تلماسه منجر به افزایش میزان جداشدگی جریان در پایین دست تاج تلماسه می‌شود بنابراین، شاهد افزایش افت جریان و τ' هستیم. با افزایش τ' ، تنش برشی کل (τ) افزایش می‌یابد.

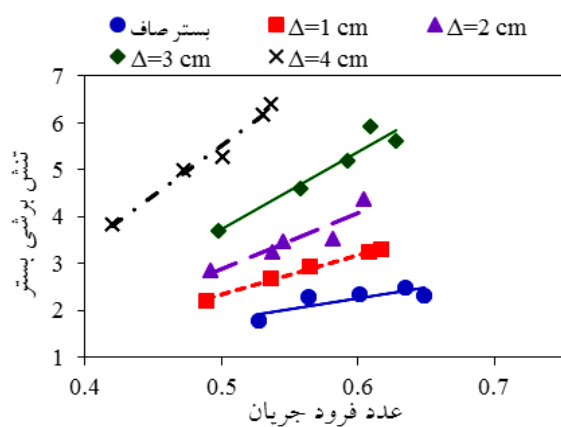
محاسبات نشان داد که تنش برشی در بستر پوشیده از تلماسه با ارتفاع‌های یک، دو، سه و چهار سانتی‌متر در شیب صفر بطور متوسط $24/20$ ، $59/22$ ، $107/95$ و $113/17$ درصد، در شیب $1/1000$ بطور متوسط $28/41$ ، $75/35$ ، $129/71$ و 140 درصد، در شیب $5/1000$ بطور متوسط $44/83$ ، $84/55$ ، $145/37$ و $165/51$ درصد، در شیب $1/100$ بطور متوسط 45 ، $86/95$ ، $154/56$ و $161/93$ درصد و در شیب $15/1000$ بطور متوسط $52/59$ ، $95/63$ ، $169/95$ و $149/30$ درصد بیش از تنش برشی در بستر صاف است.

همان‌گونه که توضیح داده شد در بسترهای پوشیده از تلماسه، تنش برشی کل (τ) متشکل از تنش برشی ناشی از اندازه ذره (τ') و تنش برشی ناشی از تلماسه (τ'') است. در شکل ۷ به‌عنوان نمونه تغییرات تنش برشی کل، تنش برشی ناشی از اندازه ذره و تنش برشی ناشی از شکل بستر (بر حسب نیوتن بر متر مربع) در برابر عدد فرود جریان به‌ازای شیب $1/1000$ نشان داده شده است. شکل ۷ نشان می‌دهد که سهم تنش برشی ناشی از اندازه ذره و تنش برشی ناشی از تلماسه در بسترهای پوشیده از تلماسه با ارتفاع یک سانتی‌متر متفاوت با بسترهای پوشیده از تلماسه با ارتفاع چهار سانتی‌متر است. بررسی نتایج نشان داد که در تلماسه‌های با ارتفاع یک و دو سانتی‌متر سهم τ' از τ بیش از τ'' است. علت آن این است که مقدار τ'' بستگی به اندازه ناحیه جداشدگی جریان و در نتیجه میزان تلاطم جریان در پایین دست تاج شکل بستر دارد. هر چقدر میزان جداشدگی جریان افزایش یابد میزان τ'' بیشتر می‌شود و بنابراین، سهم آن از تنش برشی کل (τ) افزایش می‌یابد. میزان جداشدگی جریان در پایین دست تاج شکل بستر در تلماسه‌های با ارتفاع یک و دو سانتی‌متر کمتر از تلماسه‌های

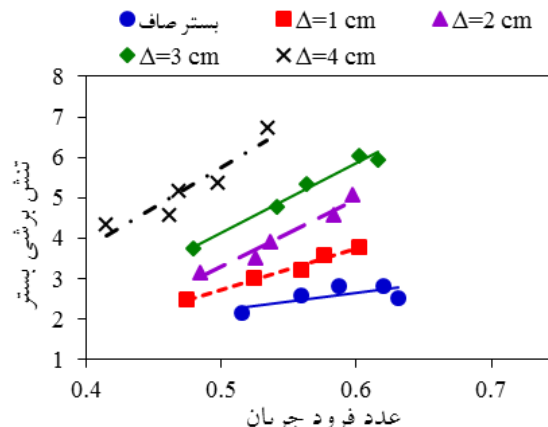
متوسط $29/57$ ، $70/8$ و 91 درصد، در دبی 20 لیتر بر ثانیه به‌طور متوسط $43/55$ ، $77/91$ و $84/57$ درصد و در دبی 25 لیتر بر ثانیه به‌طور متوسط $37/53$ ، $70/87$ و $87/61$ درصد بیش از تنش برشی بستر تلماسه با Δ/l برابر $0/04$ است.

تغییرات تنش برشی بستر (برحسب نیوتن بر متر مربع) نسبت به عدد فرود جریان برای آزمایش‌های بدون تلماسه و با تلماسه در شکل ۶ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که در بستر پوشیده از تلماسه‌های با ارتفاع مختلف، همانند بستر صاف، با افزایش عدد فرود جریان تنش برشی بستر نیز افزایش یافته است. این نتیجه مطابق با پژوهش حیدری و همکاران (۱۰) است. عدد فرود جریان طبق رابطه $Fr = \frac{V}{\sqrt{gy}}$ ، با سرعت متوسط جریان رابطه مستقیم دارد. از طرفی تنش برشی بستر نیز بر اساس رابطه $\tau = \frac{\gamma V^2}{C}$ ، که در آن V سرعت متوسط جریان و C ضریب شزی است، با سرعت متوسط جریان رابطه مستقیم دارد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که تنش برشی بستر و عدد فرود جریان با یکدیگر رابطه مستقیم دارند.

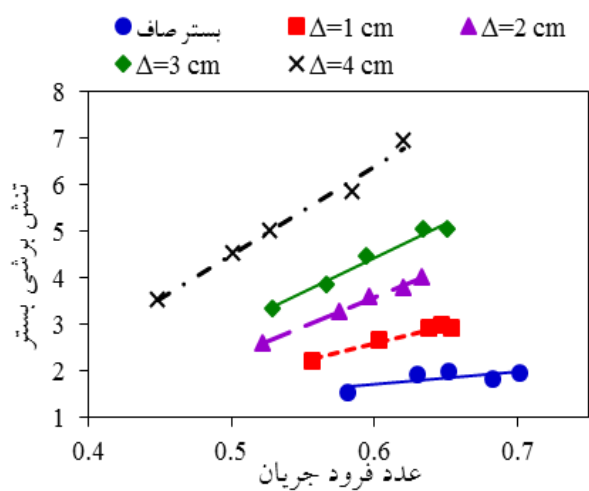
شکل ۶ نشان می‌دهد که در همه شیب‌ها، تنش برشی بستر در بستر پوشیده از تلماسه بیش از بستر صاف است. علاوه بر این، با افزایش ارتفاع تلماسه، تنش برشی در بسترهای پوشیده از تلماسه افزایش می‌یابد. تنش برشی کل (τ) در بسترهای پوشیده از شکل بستر برابر است با مجموع تنش برشی ناشی از اندازه ذره (τ') و تنش برشی ناشی از هندسه و اندازه شکل بستر (τ''). در بسترهای صاف با توجه به اینکه شکل بستر تشکیل نمی‌شود بنابراین، تنش برشی کل برابر است با تنش برشی ناشی از اندازه ذره ($\tau = \tau'$) و مقدار تنش برشی ناشی از شکل بستر برابر صفر است (۲۱). بنابراین، تنش برشی در بسترهای پوشیده از شکل بستر بیش از تنش برشی در بسترهای بدون شکل است. در بسترهای پوشیده از شکل بستر، مقدار τ'' به میزان جداشدگی جریان در پایین دست تاج شکل بستر و در نتیجه اختلاف فشار بین جلو و عقب شکل بستر بستگی دارد. هر چقدر میزان جداشدگی جریان در پایین دست تاج



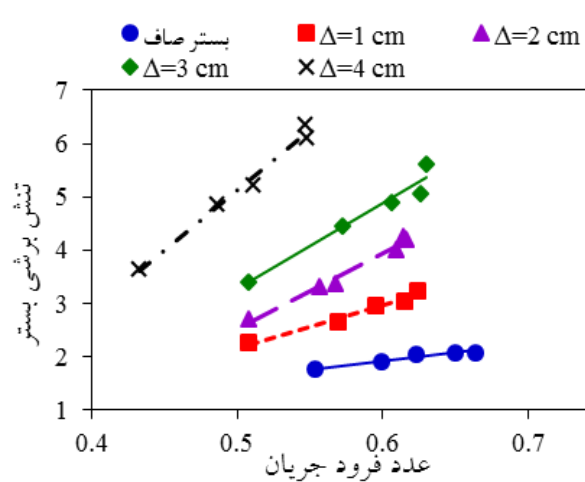
(ب)



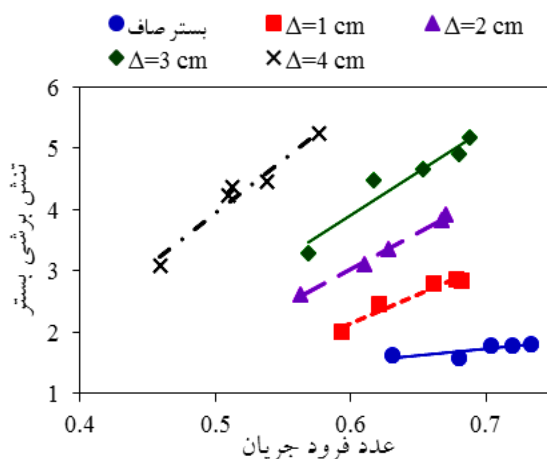
(الف)



(د)



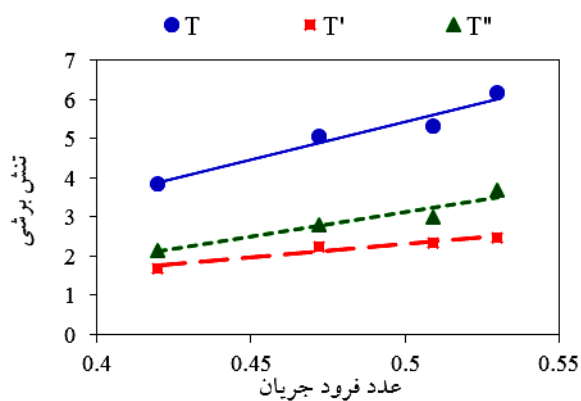
(ج)



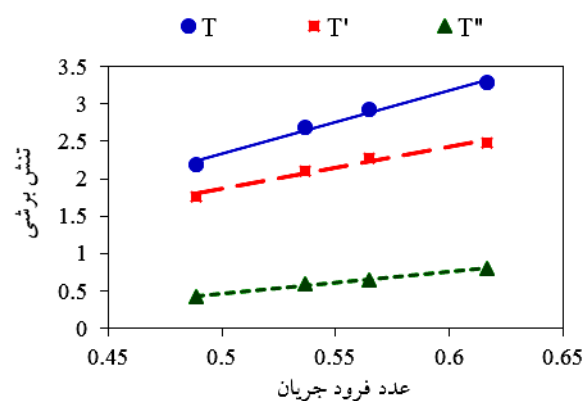
(و)

شکل ۶. تغییرات تنش برشی بستر در برابر عدد فرود جریان برای بستر صاف و بستر پوشیده از تلماسه در شیب‌های الف) صفر،

ب) ۰/۰۰۰۱، ج) ۰/۰۰۰۵، د) ۰/۰۰۱ و و) ۰/۰۰۱۵ (رنگی در نسخه الکترونیکی)



(ب)



(الف)

شکل ۷. تغییرات تنش برشی کل، ذره و شکل بستر در برابر عدد فرود جریان به‌ازای شیب $0/0001$ (الف) تلماسه با ارتفاع یک سانتی‌متر و (ب) تلماسه با ارتفاع چهار سانتی‌متر (رنگی در نسخه الکترونیکی)

تلماسه باعث افزایش تنش برشی بستر می‌شود به‌گونه‌ای که در بسترهای پوشیده از تلماسه، تنش برشی در تلماسه‌های با ارتفاع یک و چهار سانتی‌متر به‌ترتیب کمترین و بیشترین مقدار را داشت. محاسبات نشان داد که تنش برشی در بستر پوشیده از تلماسه‌های با ارتفاع یک، دو، سه و چهار سانتی‌متر به‌طور متوسط به‌ترتیب ۳۹، ۸۰، ۱۴۱ و ۱۴۶ درصد بیش از تنش برشی در بستر صاف است.

در تلماسه‌های با ارتفاع یک و دو سانتی‌متر سهم تنش برشی ناشی از شکل بستر (T'') از تنش برشی کل (T)، کمتر از تنش برشی ناشی از اندازه ذره (T') است اما در تلماسه‌های با ارتفاع سه و چهار سانتی‌متر سهم تنش برشی ناشی از شکل بستر (T'') از تنش برشی کل (T)، بیشتر از تنش برشی ناشی از اندازه ذره (T') است. محاسبات نشان داد که تنش برشی ناشی از شکل بستر (T'') برای بسترهای پوشیده از تلماسه‌های با ارتفاع یک، دو، سه و چهار سانتی‌متر، به‌طور متوسط به‌ترتیب ۲۷/۳۷، ۴۳، ۵۷/۱۱ و ۵۸/۷۴ درصد از تنش برشی کل (T) را شامل می‌شود.

تقدیر و تشکر

این تحقیق با حمایت مالی از محل پژوهانه نویسنده دوم انجام شده است. بدینوسیله از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز تشکر و قدردانی می‌شود. (SCU.WH1400.31373)

با ارتفاع سه و چهار سانتی‌متر است. محاسبات نشان داد که تنش برشی ناشی از شکل بستر (T'') برای بسترهای پوشیده از تلماسه‌های با ارتفاع یک، دو، سه و چهار سانتی‌متر، به‌طور متوسط به‌ترتیب ۲۷/۳۷، ۴۳، ۵۷/۱۱ و ۵۸/۷۴ درصد از تنش برشی کل (T) است. در پژوهش حیدری و همکاران (۱۰) تنش برشی ناشی از شکل بستر (T'') برای شکل‌های شکنج به ارتفاع چهار سانتی‌متر و متشکل از ذرات رسوبی با اندازه‌های ۰/۵۱ و ۲/۱۸ میلی‌متر به‌طور متوسط به‌ترتیب ۶۴/۸۱ و ۶۲/۳۸ درصد از تنش برشی کل بود.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه تأثیر پارامترهای هندسی تلماسه مانند ارتفاع و شیب وجه بالادست تلماسه بر تنش برشی بستر بررسی شده است. برای انجام آزمایش‌های این مطالعه از تلماسه‌های با ارتفاع یک، دو، سه و چهار سانتی‌متر و شیب‌های صفر، ۰/۰۰۰۱، ۰/۰۰۰۵، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۱۵ برای کف فلوم استفاده شد. بررسی داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که با افزایش y/Δ (استغراق نسبی)، Δ/λ و عدد فرود جریان تنش برشی در بسترهای پوشیده از تلماسه افزایش می‌یابد. علاوه بر این نتایج نشان داد که تنش برشی در بسترهای پوشیده از تلماسه بیش از تنش برشی در بستر صاف است. افزایش ارتفاع

منابع مورد استفاده

1. Afzalimehr, H., V. P. Singh and E. Fazel Najafabadi. 2010. Determination of form friction factor. *Journal of Hydrologic Engineering* 15(3): 237-243.
2. 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 Farsi).
3. 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.
4. Daghigh, H., A. Karami Khaniki and A. Ali Akbari Bidokhti. 2017. Evaluation of sandy bed ripples geometry using physical model and correcting existed practical relations factors. *Iranian Journal of Marine Technology* 4(1): 64-74 (In Farsi).
5. 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 Farsi).
6. Dey, S. 2014. *Fluvial Hydrodynamics: Hydrodynamic and Sediment Transport Phenomena*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
7. Esmaili, K., S. M. Kashefipour and M. Shafaie Bajestan. 2009. The effect of bed form on roughness coefficient in unsteady flows using a combined numerical and laboratory method. *Journal of Water and Soil* 23(3): 136-144 (In Farsi).
8. 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 Farsi).
9. Heydari, M., M. Bahrami Yarahmadi and M. Shafai Bejestan. 2022a. Experimental study of the effect of bed forms on Darcy-Weisbach friction coefficient in the straight open channels. *Journal of Hydraulics* 17(1): 35-49 (In Farsi).
10. Heydari, M., M. Bahrami Yarahmadi and M. Shafai Bejestan. 2022b. Experimental study of the effect of bed forms with different sediment sizes on bed shear stress. *Journal of Water and Soil Science* 26(2): 283-297. (In Farsi).
11. 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 Farsi).
12. Julien, P.Y. 2010. *Erosion and Sedimentation*. 2nd edition, Cambridge University Press, New York, USA.
13. 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.
14. Kwoil, E., J. G. Venditti, R. W. Bradley and C. Winter. 2016. Flow structure and resistance over sub-aqueous high- and low-angle dunes. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 121: 545-564.
15. 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.
16. Okhravi, S. and S. Gohari. 2020. Form friction factor of armored riverbeds. *Canadian Journal of Civil Engineering* 47(11): 1238-1248
17. 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.
18. Ranga-Raju, K. G. and J.P. Soni. 1976. Geometry of ripples and dunes in alluvial channels. *Journal of Hydraulic Research* 14(3): 241-249.
19. Roshani, E., A. Hossienzade Dalir, D. Farsadizade 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 Farsi).
20. Samadi-Boroujeni, H., P. Maleki, R. Fattahi-Nafchi and M.J. Ketabdari. 2014. Experimental study on the effect of the parallel and flake ripple bed forms on the Manning roughness coefficient. *Journal of Hydraulics* 8(4): 55-65 (In Farsi).
21. Shafai Bajestan, M. 2008. *Basic Theory and Practice of Hydraulics of Sediment Transport*. Shahid Chamran University of Ahvaz Press, Ahvaz, Iran (In Farsi).
22. Simons, D. B. and E. V. Richardson. 1966. Resistance to flow in alluvial channels. Geological Survey Professional paper, 422-J.
23. 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 Bed Shear Stress in Straight Channels Covered with Dunes of Different Sizes

M. Badzanchin¹, M. Bahrami Yarahmadi^{2*} and M. Shafai Bejestan²

(Received: September 17-2022 ; Accepted: November 17-2022)

Abstract

The formation of bed form in alluvial rivers due to sediment transport has a significant effect on the hydraulic parameters of the flow such as bed shear stress. The formation of the bed form and its shape and geometry depends on the bed shear stress. Therefore, the relationship between bed form and flow parameters (such as bed shear stress) is complicated. In the present study; the effect of dune bed forms with different heights on bed shear stress has been investigated. Artificial dunes made by sand-cement mortar with a length of 25 cm and heights of 1, 2, 3, and 4 cm were used. In the tests of this research, flow discharge of 10, 15, 20, 25, and 30 l/s and bed slopes of 0, 0.0001, 0.0005, 0.001, and 0.0015 were used. The results showed that with increasing the relative submergence and Δ/λ , the bed shear stress increased in dune-covered beds. The formation of the dune bed form and the increase in its height leads to an increase in the bed shear stress. The bed shear stress in dunes with a height of 1, 2, 3, and 4 cm was, on average, 39, 80, 141, and 146% more than in plane beds, respectively. Moreover, form shear stress for dunes with a height of 1, 2, 3, and 4 cm was, on average, 27.37, 43, 57.11, and 58.74% of the total shear stress, respectively.

Keywords: Sediment transport, Bed load, Bed form, Dune, Shear stress

1. M.Sc. Student of 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