

بررسی آزمایشگاهی اثر شکل بستر شکنج در دو حالت موازی و پولکی بر تنش برشی بستر

حسین صمدی بروجنی^۱، پری ملکی^{۲*}، روح‌اله فتاحی نافچی^۳ و داریوش ملکی^۴

چکیده

رودخانه‌ها، در طی زمان برای رسیدن به پایداری، شکل‌های بستر متفاوتی را با رسوب‌گذاری یا فرسایش در بستر خود ایجاد می‌کنند. از راه‌های شناسایی رفتار رودخانه‌ها، مطالعه و بررسی ساختار جریان و شیوه‌ی شکل‌گیری شکل‌های بستر در آن‌ها است. در رودخانه‌های آبرفتی بخشی از تنش برشی مربوط به شکل بستر است. در این پژوهش به بررسی تنش برشی بستر، روی دو نوع شکل بستر شکنج (موازی و پولکی) پرداخته شده است. بدین‌منظور آزمایش‌هایی در چهار شیب و چهار دبی روی شکنج‌های مصنوعی ساخته شده در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد انجام شد. برای اندازه‌گیری تنش و سرعت جریان از دستگاه سرعت‌سنج سه‌بعدی ADV استفاده شد. نتایج نشان داد میزان تنش در تمام آزمایش‌ها، روند ثابتی داشته است؛ به‌گونه‌ای که روی وجه بالادست شکنج، ماکزیمم مقدار را دارد و با نزدیک شدن به تاج از مقدار آن کاسته می‌شود و در تاج، کمترین مقدار را دارد. همچنین نتایج نشان داد شکنج‌های موازی و پولکی به‌ترتیب ۲۶ و ۲۳ درصد از میزان کل تنش برشی را تشکیل می‌دهند. میزان تنش برشی بستر، در روی شکنج‌های موازی، ۲۷ درصد بیشتر از مقدار تنش برشی بستر روی شکنج‌های پولکی است.

واژه‌های کلیدی: تنش برشی بستر، رودخانه‌های آبرفتی، شکل بستر، شکنج.

ارجاع: صمدی بروجنی ح. ملکی پ. فتاحی نافچی ر. و ملکی د. ۱۳۹۷. بررسی آزمایشگاهی اثر شکل بستر شکنج در دو حالت موازی و پولکی بر تنش برشی بستر. مجله پژوهش آب ایران، ۲۹: ۸-۱.

۱- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۲- کارشناس ارشد سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۴- کارشناس ارشد سازه‌های دریایی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

* نویسنده مسئول: parima_6771@yahoo.com

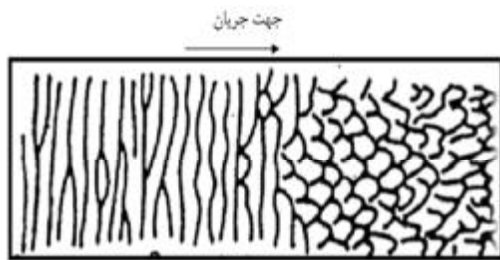
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۸/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۳/۰۵

مقدمه

$$\frac{(U^*D)}{\rho} < 10 \quad (1)$$

شکنج‌ها دارای طول موجی کمتر از ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاعی تقریباً کمتر از ۳ سانتی‌متر هستند و در سرعت‌های بسیار کمتر از سرعت متوسط جریان به سمت پایین دست مهاجرت می‌کنند و به صورت چشم‌گیری با افزایش در انتقال رسوب، ارتفاع، طول موج و سرعت مهاجرت آن‌ها افزایش می‌یابد. با گذشت زمان، شکل پلان شکنج‌ها، از خطوط موازی به منحنی و سپس به الگویی مانند پولک‌های ماهی، به صورت متقارن یا نامتقارن گسترش می‌یابد. شکل ۱ الگوی شکل‌گیری شکنج‌ها را نشان می‌دهد (چین و ون، ۱۹۹۹).



شکل ۱- الگوی توسعه شکل شکنج (چین و ون، ۱۹۹۹)

طبق نظر کارلینگ (۱۹۹۹) طول شکنج‌ها با اندازه ذره و به طور دقیق‌تر با عدد رینولدز ذره متناسب است. در مقطع طولی رودخانه تقریباً به شکل مثلث هستند که دارای شیب وجه طولانی ملایم، در بالادست و شیب وجه کوتاه تند، در پایین دست است. شیب وجه پایین دست این مثلث تقریباً برابر با زاویه‌ی ایستایی (ϕ) مواد بستر است. از بین پژوهش‌هایی که برای شناسایی ساختار جریان در کانال‌ها با بستر ناهموار انجام شده است می‌توان به پژوهش ایکدا و آسیدا در سال ۱۹۸۳ اشاره کرد. در این پژوهش مشاهده شد که جریان درون یک کانال با بستر ناهموار شامل شکنج، دارای نواحی جداشدگی و جریان‌های گردابی نعلی شکل در قسمت پایین دست شکنج است و حداکثر انتشار تلاطم در این نقاط اتفاق می‌افتد. زدلو و استریت (۲۰۰۱) در بررسی عددی نشان دادند گردابه‌های تشکیل شده نزدیک بستر، عامل تعیین‌کننده در حرکت رسوبات هستند.

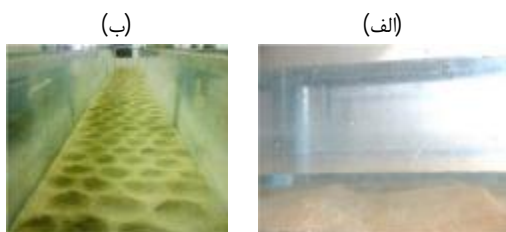
مقاومت ذره، قسمتی از مقاومت جریان است که در اثر نیروی رانش سطحی به وجود می‌آید؛ در حالی که مقاومت

پیدایش شکل‌های بستر در رودخانه‌های آبرفتی را نخستین بار گیلبرت (۱۹۱۴) تشریح کرد. از آن جایی که محاسبات در رابطه‌ی دبی- اشل (به خصوص در هنگام عبور سیل) و سرعت جریان کاملاً به تعیین زبری شکل بستر بستگی دارد، شناخت شکل بستر از اهمیت زیادی برخوردار است (شفاعی بجستان، ۱۳۸۷). تقریباً همزمان با شروع حرکت ذرات بستر در رودخانه‌ها، شکل‌های مختلف بستر شروع به شکل‌گیری می‌کنند. از رایج‌ترین شرایط مرزی در رودخانه‌های آبرفتی، بسترهای متحرک پوشیده از شکنج‌ها^۱ و تلماسه‌ها^۲ هستند. این شکل‌ها، در بسیاری از سیستم‌های آبرفتی، نقش حیاتی در تقابل بین جریان، دبی رسوب و مورفولوژی بستر دارند (مولر و گیر، ۱۹۸۶).

بنابراین اطلاع از شیوه‌ی شکل‌گیری، مهاجرت و نحوه‌ی تأثیر آن‌ها بر ساختار جریان از مسایل ضروری در فهم فرآیند حمل رسوب در رودخانه‌ها است. مطالعات اخیر بر آبرفت‌های کف رودخانه‌ها نشان داد شکنج‌ها و تلماسه‌ها می‌توانند قسمت اعظم تجمعات حواشی رودخانه‌های ماسه‌ای را تشکیل دهند (بست و کوستاچوک، ۲۰۰۲). شکل‌گیری، انهدام و پایداری شکل‌های بستر، به شرایط جریان پیرامون وابستگی شدیدی دارد و در عین حال حضور آن‌ها نقش حیاتی در ساختار جریان رودخانه‌ها ایفا می‌کند (نلسون و همکاران، ۱۹۹۳). با این وجود، هنوز دانش ما در مورد شیوه‌ی توزیع سرعت جریان در نزدیکی بستر و توزیع تنش برشی و مؤلفه‌های شدت آشفتگی در حضور شکل‌های بستر کافی نیست. بنابراین ضروری است که با اندازه‌گیری نیمرخ‌های سرعت جریان و توزیع تنش برای دبی‌های مختلف به همراه تغییر در شیب‌های مختلف بستر، به شناخت و درک بیشتری از این پدیده دست یافته شود. پشته‌های کوچک در رسوبات کوچک‌تر از ۰/۷ میلی‌متر و بزرگ‌تر از ۰/۱۵ میلی‌متر شکل می‌گیرند. شرط لازم برای شکل‌گیری شکنج‌ها این است که جریان از نظر هیدرولیکی، یک جریان صاف باشد، شرایط جریان صاف بدین شکل است که در این رابطه u^* سرعت برشی، D قطر متوسط ذرات و ν لزجت سینماتیک سیال است (کارلینگ، ۱۹۹۹):

1- Ripples
2- Dunes

بستر و مقایسه آن‌ها با بستر مسطح است؛ بنابراین تمام پارامترهای فیزیکی مانند ارتفاع و زاویه ایستایی مواد بستر و طول موج شکنج‌ها در تمام آزمایش‌ها ثابت در نظر گرفته شد. بر این اساس، دو شکل مختلف فرم بستر شامل شکنج موازی و شکنج پولکی، در بستر فلوم ایجاد و برای انجام آزمایش‌های بعدی، شکل بستر ثابت شد. شکل ۲ نمایشی از شکنج‌های ساخته شده در فلوم را نشان می‌دهد.



شکل ۲- نمایشی از شکنج‌های پولکی و موازی در کف فلوم آزمایشگاهی و موقعیت سرعت‌سنج ADV، الف- شکنج موازی، ب- شکنج پولکی

برنامه‌ریزی و نحوه‌ی انجام آزمایش‌ها

برای انجام آزمایش‌ها، لازم است تا ابتدا شیب و دبی‌های مناسبی که در آن‌ها شکل بستر شکنجی اتفاق می‌افتد، تعیین شود. بدین منظور به کمک روش‌هایی از جمله روش‌های آلبرتسون، هیل (چین و ون، ۱۹۹۹)، عطاءاله (شفاعی بجستان، ۱۳۸۷) و سایر روش‌های آزمایشگاهی و با اشتراک‌گیری محدودی مناسب از روش‌ها، دبی و شیب مناسب برای انجام آزمایش‌ها تعیین می‌شود.

جدول ۱ حدود کمینه و بیشینه از دبی، شیب و سرعت در روش‌های مختلف را برای فلوم آزمایشگاهی مذکور با عرض ۴۰ سانتی‌متر نشان می‌دهد که در تمام آزمایش‌ها عرض آن ثابت در نظر گرفته شد. تمامی آزمایش‌ها در چهار شیب ۰/۰۰۵، ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۲ و ۰/۰۰۳ و در ۴ دبی ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ لیتر در ثانیه انجام شد. تعداد کل آزمایش‌ها ۴۸ مورد بود. در هر آزمایش عمق متوسط جریان با استفاده از یک عمق‌سنج مجهز به کولیس با دقت ۰/۰۱ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری سرعت جریان به کمک دستگاه سرعت‌سنج سه‌بعدی ADV که دارای دقت اندازه‌گیری ± 1 میلی‌متر بر ثانیه بود، انجام گرفت. در این اندازه‌گیری از فرکانس ۲۰۰ هرتز استفاده شد و مدت اندازه‌گیری سرعت جریان در هر نقطه حداقل دو دقیقه بود. در شکنج‌های موازی اندازه‌گیری سرعت در سه ایستگاه در مسیر جریان (نواحی ابتدایی، میانی و

شکل در اثر اختلاف فشار بین سطح جلو و سطح انتهایی شکنج بستر به وجود می‌آید. این مقاومت فقط به دلیل تشکیل شکل بستر و ایجاد جداشدگی خطوط جریان شکل می‌گیرد. در نتیجه مقدار تنش برشی بستر در رودخانه‌های آبرفتی را می‌توان به شکل زیر نوشت (شفاعی بجستان، ۱۳۸۷):

$$\tau = \tau' + \tau'' = \gamma s(R' + R'') \quad (2)$$

که در آن τ' بخشی از تنش برشی است که صرف مقاومت ذره می‌شود و τ'' بخش دیگری از تنش برشی است که صرف مقاومت شکل بستر می‌شود. R' و R'' شعاع هیدرولیکی مربوط به ذره و شکل بستر، S شیب کف بستر و γ وزن مخصوص سیال است. بدیهی است چنانچه شکل بستر وجود نداشته باشد، تمام تنش برشی بستر صرف مقاومت در مقابل ذره می‌شود (شفاعی بجستان، ۱۳۸۷).

مواد و روش‌ها

مشخصات شکنج‌های موجود در این تحقیق، بر اساس نتایج مطالعات محققان گذشته همچون چین و ون در سال ۱۹۹۹ که ابعاد و مشخصات شکنج‌های موجود در طبیعت را بررسی کردند، استوار است. لذا در این پژوهش طول موج شکنج‌ها برابر ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع آن‌ها ۳ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. مقدار زاویه ایستایی برای ذرات با قطر متوسط ۰/۵۲ میلی‌متر برابر ۳۲ درجه اندازه‌گیری شد؛ لذا شیب وجه پایین‌دست شکنج‌ها برابر ۳۲ درجه و شیب وجه بالادست آن‌ها ملایم و برابر ۸ درجه در نظر گرفته شد. بسترهای مصنوعی در قاب‌های فلزی گالوانیزه به عرض ۳۹/۵ سانتی‌متر و به طول ۵ متر، به کمک اشلی با زاویه ۳۲ درجه (پایین‌دست) و ۸ درجه (بالادست) و به طول ۳۰ سانتی‌متر (طول موج شکنج)، با استفاده از پودر سیمان سفید و پودر سنگ ساخته شدند. برای این که دانه‌بندی شکنج‌ها حفظ شود بعد از خشک شدن آن‌ها، با استفاده از چسب‌های مخصوص در تمام سطوح ساخته شده، رسوبات پاشیده شد و تمام سطوح شکنج‌هایی که با سیمان سفید و پودر سنگ ساخته شد، با رسوبات دانه‌بندی شده پوشش داده شدند. برای مقایسه شکل‌های بستر با حالت بدون شکل بستر، بستر صافی با رسوبات مورد استفاده در ساخت شکنج‌ها، ساخته شد. نظر به این که هدف از انجام این پژوهش، بررسی تأثیر دو نوع شکل بستر شکنج (یعنی موازی و پولکی) بر تنش برشی

آزمایش سرعت جریان در ۱۰۸ نقطه انجام شد. در شکنج‌های پولکی نیز اندازه‌گیری‌های مشابه شکل گرفت، با این تفاوت که در هر ایستگاه در دو مقطع (قسمت گودی و بعد از گودی شکنج) صورت پذیرفت. همچنین به منظور مقایسه تأثیر شکل بستر شکنج با بستر صاف و هموار در شیب و دبی‌های مذکور، شانزده مورد آزمایش روی بستر صاف با دانه‌بندی مشابه انجام شد.

انتهایی جریان) و در هر ایستگاه در سه مقطع (قبل، روی و بعد از شکنج) انجام گرفت. بدین ترتیب در هر آزمایش اندازه‌گیری سرعت در نه مقطع جریان انجام شد. در هر مقطع اندازه‌گیری سرعت در سه نقطه در عرض فلوم (به فواصل ۵، ۲۰ و ۳۵ سانتی‌متر از جدار فلوم) و چهار نقطه در امتداد عمق جریان صورت گرفت؛ یعنی به طور متوسط دوازده نقطه در هر مقطع اندازه‌گیری شد؛ بنابراین در هر

جدول ۱- حدود مناسب از دبی، شیب و سرعت برای تشکیل بستر شکنج

نام روش	محدوده دبی (l/s)		محدوده سرعت (m/s)		محدوده شیب	
	کمینه	بیشینه	کمینه	بیشینه	کمینه	بیشینه
آلبرتسون ۱۹۹۶	۱۰	۵۰	۰/۱۳۴	۰/۷۸۶	۰/۰۰۰۲	۰/۰۲
هیل	۱۰	۵۰	۰/۰۸۹	۰/۲۵	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۹
سایمونزورچاردسون	۱۰	۵۰	۰/۰۸۹	۰/۲۳۴	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۸
انگلووندوهانسن	۱۰	۵۰	۰/۰۸۹	۰/۲۰۸	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۷
عطاءاله	۱۰	۵۰	۰/۱	۱	۰/۰۰۰۱	۰/۱

نتایج و بحث

برای بررسی میزان خطای بین داده‌های غربال شده و غربال نشده (خام)، در محاسبه پارامترهای جریان از جمله سرعت جریان، تنش‌های رینولدز و نوسانات سرعت اغلب از نرم‌افزار Win ADV استفاده می‌شود. بررسی‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد طولانی بودن زمان اندازه‌گیری و مقدار بزرگ فرکانس نمونه‌برداری (۲۰۰ هرتز) که در نتیجه آن تعداد زیادی داده‌های سرعت ثبت می‌شوند، تأثیر غربال کردن داده‌ها بر متوسط زمانی سرعت جریان محاسبه شده را ناچیز می‌کند (معمدی و افضلی‌مهر، ۱۳۹۱). همچنین در این تحقیق برای کاهش خطای احتمالی و شکل‌گیری بهتر نوسانات سرعت و تنش‌های رینولدز داده‌ها با شرایط نسبت سیگنال به نویز بیشتر از ۵ دسی بل و همبستگی بیشتر از ۷۰ درصد استفاده شدند. به دلیل این که در جریان‌های آشفته سرعت جریان داریم در نوسان است، برای محاسبه تنش‌های رینولدز از مقدار کواریانس در داده‌های دستگاه ADV استفاده می‌شود. مفهوم اصلی کواریانس در این پژوهش وابستگی بین دو یا سه مؤلفه سرعت (V_x ، V_y و V_z) است.

$$\text{COV-XZ} = \frac{\sum v_z v_x}{n-1} - \frac{\sum v_z \sum v_x}{n(n-1)} \quad (۳)$$

$$\text{COV-YZ} = \frac{\sum v_z v_y}{n-1} - \frac{\sum v_z \sum v_y}{n(n-1)} \quad (۴)$$

وال (۱۹۹۶) نشان داد تنش‌های رینولدز به کمک داده‌های ADV به صورت زیر محاسبه می‌شود (کینگ سیپ، ۲۰۱۰):

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = -\rho \times (\text{cov-xz}) \quad (۵)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = -\rho \times (\text{cov-yz}) \quad (۶)$$

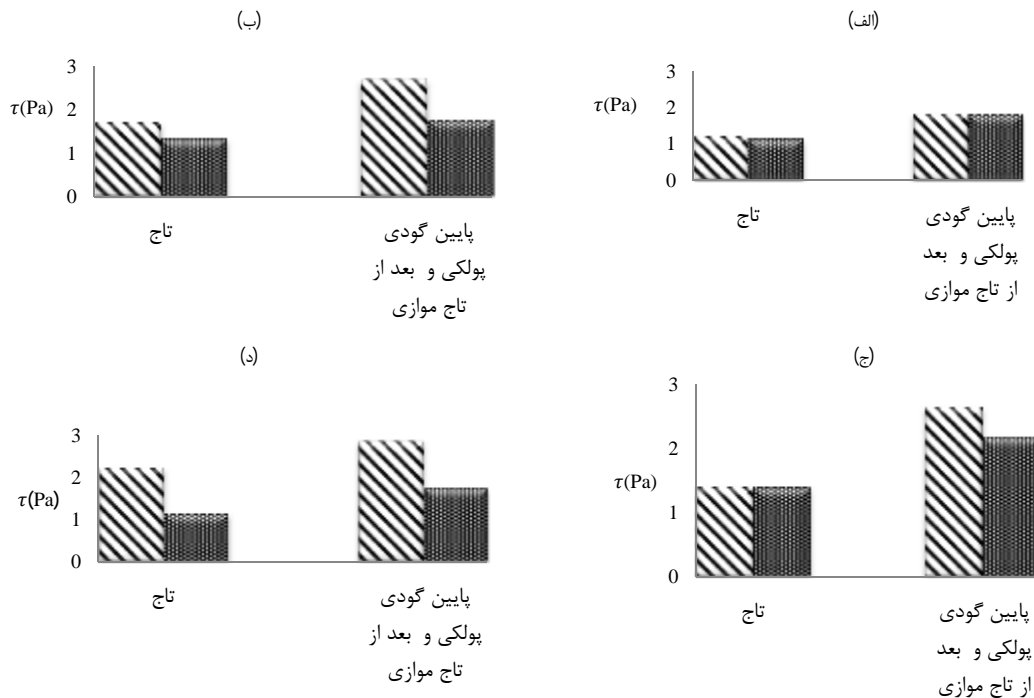
$$\tau_{bed} = \sqrt{\tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2} \quad (۷)$$

که در این معادلات n تعداد نمونه‌ها، ρ دانسیته آب بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب، τ_{xz} و τ_{yz} به ترتیب عبارت است از عرض از مبدأ معادله‌های رگرسیون خطی که بر اساس تنش‌های رینولدز و عمق جریان در هر مقطع در صفحه xoz و yoz و برای تمام آزمایش‌ها محاسبه می‌شود و τ_{bed} تنش برشی بستر بر حسب پاسکال است.

در این مطالعه، با استفاده از داده‌های دستگاه سرعت‌سنج ADV و معادلات (۳) تا (۷) مقادیر تنش برشی برای دبی‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ لیتر در ثانیه و در چهار شیب ۰/۰۰۰۵، ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۲ و ۰/۰۰۳ محاسبه شد. بدین ترتیب امکان بررسی میزان تأثیر هندسه شکنج روی تنش برشی بستر و مقایسه تنش برشی بستر در شکنج‌های موازی و پولکی به وجود می‌آید. با توجه به مقاطع هندسی شکنج‌ها مشاهده شد که مقطع تاج^۱ در دو نوع شکل بستر و همچنین مقطع بعد از تاج شکنج، موازی

شکل ۳ در تمام شیب‌های مورد آزمایش بر اساس متوسط دبی آزمایش‌ها، ترسیم شده است.

با مقطع پایین گودی در شکنج پولکی از نظر خصوصیات هندسی مشابه بوده لذا قابل قیاس با یکدیگر هستند. به منظور مقایسه تنش برشی در دو نوع شکل بستر شکنج،



شکل ۳- مقادیر تنش برشی بستر در شکنج موازی با پولکی، الف- شیب ۰/۰۰۵؛ ب- شیب ۰/۰۰۱؛ ج- شیب ۰/۰۰۲؛ د- شیب ۰/۰۰۳.

در روی شکنج‌های موازی و پولکی و روی بستر شاهد در شیب ۰/۰۰۵ ارائه شده است. شایان ذکر است که در سایر شیب‌ها نیز روند مشابه است.

در تمام شیب‌ها، با افزایش دبی، میزان تنش برشی کف در روی بستر شاهد روند افزایشی بوده ولی مقادیر آن در تمام دبی و شیب‌ها از مقادیر تنش برشی کف روی شکنج‌ها کمتر است که بیانگر این است که بخشی از تنش برشی کل، صرف مقاومت ذره و بخش دیگری از آن صرف مقاومت فرم بستر می‌شود (شفاعی بجستان، ۱۳۸۷). بدیهی است چنان‌چه شکل بستر وجود نداشته باشد، تمام تنش برشی بستر صرف مقاومت در مقابل ذره می‌شود. به کمک معادله (۲) مقدار تنش مربوط به شکل شکنج و مقدار تنش حاصل از ذره محاسبه شد. نتایج نشان داد تنش برشی ناشی از شکل بستر موازی ۲۶ درصد و تنش برشی ناشی از شکنج‌های پولکی ۲۳ درصد از تنش برشی کل را تشکیل می‌دهد؛ لذا هنگامی که شکنج‌ها در شرایط اولیه شکل‌گیری خود هستند، تأثیر بیشتری روی تنش برشی بستر خواهند داشت زیرا در هنگام شکل‌گیری اولیه

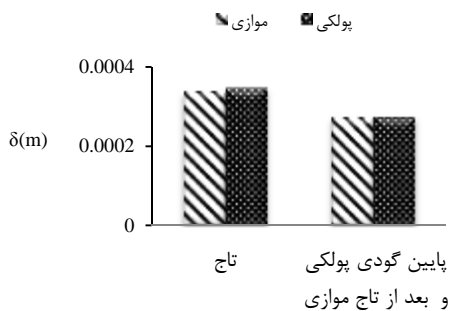
همان‌طور که از شکل ۳ برمی‌آید در مقطع تاج و دیگر مقطع قابل مقایسه، در هر دو نوع شکل بستر شکنج موازی و پولکی، مقدار تنش برشی کف در ریپل موازی بیشتر از شکنج پولکی است. به این معنی که شکنج موازی تأثیر بیشتری بر تنش برشی بستر دارد؛ به گونه‌ای که مقدار تنش برشی بستر در شکنج‌های موازی در هر دو مقطع مورد مقایسه، به اندازه ۲۷ درصد از تنش برشی در شکنج پولکی بیشتر است. در شکل ۴ مقدار ضخامت لایه مرزی در شیب‌های مختلف روی ریپل و برای دبی‌های مختلف بر اساس معادله زیر محاسبه و به صورت نمودار نمایش داده شده است.

$$\delta = 11.6 \left(\frac{\rho}{u_*} \right) \quad (8)$$

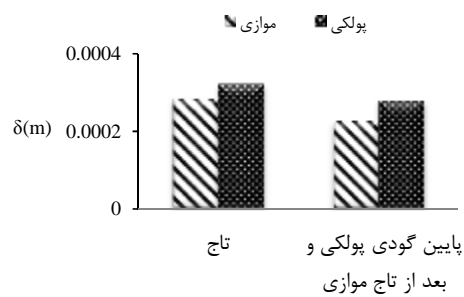
نتایج محاسبات نشان می‌دهد که میزان ضخامت لایه مرزی روی شکنج‌های موازی کمتر از مقاطع برداشت شده روی شکنج‌های پولکی است که در نتیجه باعث افزایش سرعت برشی و در نهایت تنش برشی خواهد شد. به منظور مقایسه تأثیر دو نوع شکل بستر شکنج بر تنش برشی بستر، در شکل‌های ۵ و ۶ مقادیر تنش برشی بستر

شکل بستر میزان فرسایش و رسوبگذاری آن‌ها بیشتر

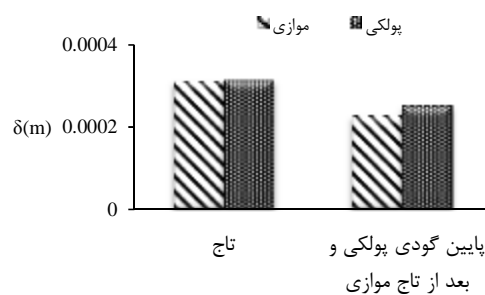
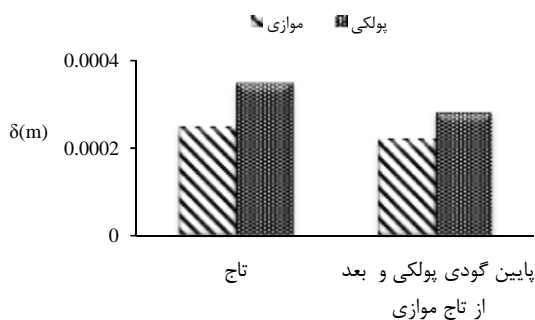
است، بنابراین تأثیر بیشتری بر میزان تنش خواهند داشت.



(د)



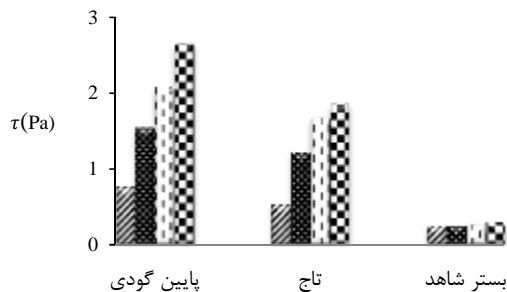
(ج)



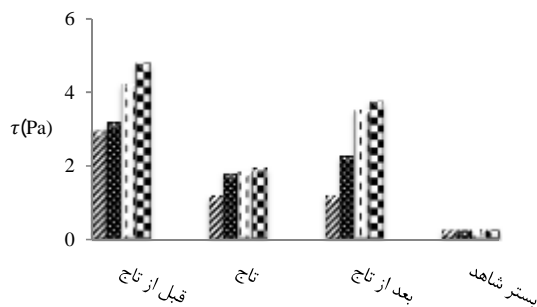
شکل ۴- مقدار ضخامت لایه مرزی در شکنج موازی با پولکی، الف- شیب ۰/۰۰۰۵؛ ب- شیب ۰/۰۰۱؛ ج- شیب ۰/۰۰۲؛ د- شیب ۰/۰۰۳.

محاسبات انجام شده، نشان می‌دهد در بستر با شکنج پولکی در شیب ثابت با افزایش دبی مقدار تنش برشی بستر افزایش یافته است. همچنین مقدار تنش در حالت پولکی در مقطع پایین گودی شکنج بیشتر از مقطع تاج در آن است که می‌تواند ناشی از وجود جریان‌های گردابی در این ناحیه باشد. در مقطع پایین گودی از شکنج به دلیل فرسایش زیاد در طبیعت به صورت گودی و فرورفتگی است، در نتیجه باعث افزایش تلاطم و تنش برشی بستر در این ناحیه می‌شود. در قسمت تاج، خطوط جریان به نسبت مستقیم بود و میزان تلاطم و تنش برشی کمتر خواهد بود که نتایج حاصل از این پژوهش با نتایج پژوهش‌های سجادی و همکاران (۱۹۹۶)، ایکدا و آسیدا (۱۹۸۳) و نبوی و همکاران (۱۳۸۷) همخوانی دارد.

در بستر با شکنج‌های موازی مقدار تنش برشی کف در تمام آزمایش‌ها از یک روند خاص تبعیت می‌کند؛ به طوری که در تمام شیب‌ها با افزایش دبی، مقدار تنش برشی کف در سه مقطع نقطه میانی وجه بالادست، تاج و وجه پایین دست شکنج موازی نیز افزایش یافته است. از طرفی در هر شیب مقدار تنش در نقطه میانی وجه



شکل ۵- مقایسه مقدار تنش برشی کف در روی شکنج‌های پولکی و بر بستر شاهد در شیب ۰/۰۰۰۵



شکل ۶- مقایسه مقدار تنش برشی کف در روی شکنج‌های موازی و بر روی بستر شاهد در شیب ۰/۰۰۰۵

که به مرحله توسعه یافتگی کامل خود رسیده‌اند؛ یعنی در حالتی که پولکی هستند.

همچنین نتایج بررسی بر روی شکنج‌های موازی نشان داد که میزان تنش در تمام آزمایش‌ها روند ثابتی داشته به گونه‌ای که روی وجه بالادست شکنج ماکزیمم مقدار خود را دارد و با نزدیک شدن به سمت تاج، از مقدار آن کاسته می‌شود و در تاج کمترین مقدار را دارد، به تدریج با حرکت به سمت وجه پایین‌دست شکنج، جریان تحت تأثیر جریان‌های گردابی قرار گرفته، و به مقدار آن افزوده می‌شود.

منابع

۱. جعفری میانائی س. و کشاورزی ع. ۱۳۸۶. بررسی تنش و انرژی جنبشی بر روی شکنج‌ها در بستر کانال‌های باز. ششمین کنفرانس هیدرولیک ایران، ۱۳-۱۵ شهریور، دانشگاه شهرکرد.
۲. شفاعی بجستان م. ۱۳۸۷. مبانی نظری و عملی هیدرولیک انتقال رسوب. انتشارات دانشگاه شهید چمران. ۵۴۹ ص.
۳. معتمدی آ. و افضل‌مهر ح. ۱۳۹۱. بررسی برهم‌کنش هندسه تلماسه بر ساختار جریان و طول ناحیه جدایی با استفاده از دستگاه‌های سرعت‌سنج PIV و ADV. نشریه آب و خاک. ۲۷(۲): ۳۲۸-۳۴۱.
۴. نبوی س. ه. کشاورزی ع. کاظم‌زاده پارسی م. و سیستانی ب. ۱۳۸۷. بررسی عددی و آزمایشگاهی میدان جریان متلاطم در بین دو شکنج در کف کانال باز. مجله دانشکده فنی دانشگاه تبریز. ۳: ۶۳-۶۸.
5. Bennett S. J. and Best J. L. 1995. Mean flow and turbulence structure over fixed, two – dimensional dunes: Implication for sediment transport and bed form stability. Journal of the International Association of Sedimentology. 42(3): 491-513.
6. Best J. and Kostaschuk R. 2002. An experimental study of turbulent flow over a low-angle dune. Journal of Geophysical Research. 107(9): 3135-3145.
7. Carling P. A. 1999. subaqueous gravel dunes. Journal of Sedimentary Research. 69(3): 534-545.
8. Chien N. and Wan Z. 1999. Mechanics of Sediment Transport. Reston, VA: ASCE Press. 913: 195-245.

بالادست شکنج، بیشترین مقدار تنش را دارد و با نزدیک‌تر شدن به تاج شکنج، از مقدار تنش کاسته می‌شود و به مینیمم مقدار خود می‌رسد. سپس با عبور از روی تاج شکنج و رسیدن به وجه پایین‌دست آن، یعنی شیب پشت به جریان مقدار تنش برشی کف افزایش می‌یابد؛ ولی مقدار آن از وجه بالادست کمتر است. در توجیه این مسأله می‌توان گفت به دلیل شکل هندسی بستر و نیز طبق رابطه‌ی پیوستگی، واگرایی در خطوط جریان بعد از تاج و همگرایی در وجه بالادست انتظار می‌رود؛ هم چنان که پژوهشگرانی چون بنت و بست (۱۹۹۵) و ونیدی و بنت (۲۰۰۰) در کارهای خود چنین الگویی را در خطوط جریان مشاهده کردند. از طرفی وجود فرسایش شدید در شیب بالادست شکنج، مقدار تنش برشی را در این ناحیه افزایش می‌دهد. به تدریج با حرکت به سمت تاج شکنج میزان فرسایش کمتر شده و بر میزان رسوب‌گذاری افزوده شده است؛ لذا در این ناحیه، تنش کمترین مقدار را دارد، با فاصله گرفتن از تاج شکنج و در روی وجه پایین‌دست، مقدار سرعت در جهت عمود بر جهت جریان، منفی است که نشان‌دهنده‌ی وجود جریان‌های گردابی در این ناحیه است. در نتیجه افزایش مجدد تنش را به دنبال خواهد داشت که با نتایج جعفری میانائی و کشاورزی (۱۳۸۶) تطابق خوبی دارد. به طور کلی نتایج به دست آمده از این پژوهش با نتایج محققانی همچون سجادی و همکاران (۱۹۹۶)، ایکدا و آسیدا (۱۹۸۳)، نبوی و همکاران (۱۳۸۷) و جعفری میانائی و کشاورزی (۱۳۸۶) تطابق خوبی دارد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش با انجام ۴۸ آزمایش روی دو نوع شکل بستر در حالت‌های شکنج‌های موازی و پولکی و همچنین روی شکل بستر هموار سعی شد تأثیر بستر شکنجی بر توزیع تنش و مقایسه آن با بستر هموار بررسی شود. با تحلیل داده‌های به دست آمده مشخص شد میزان تنش در تمام آزمایش‌ها، روند ثابتی داشت و شکل بستر بخشی از تنش برشی کل را تشکیل می‌دهد؛ به طوری که بستر، با شکنج‌های موازی و پولکی به ترتیب ۲۶ و ۲۳ درصد از تنش برشی بستر را به خود اختصاص می‌دهند. همچنین میزان این تنش در زمانی که شکنج‌ها در مراحل اولیه شکل‌گیری خود هستند، ۲۷ درصد بیشتر از حالتی است

9. Ikeda S. and Asaeda T. 1983. Sediment suspension with rippled bed. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE. 109(3): 409-423.
10. Kyung-Seop S. 2010. Methodology for calculating shear stress in a meandering channel. Master of Science Dissertation The University of Colorado State.
11. Muller A. and Gyr A. 1986. On the vortex formation in the mixing layer behind dune. *Journal of Hydraulic Research*. 24(5): 359-375.
12. Nelson J. M. McLean S. R and Wolfe S. R. 1993. Mean flow and turbulence fields over two-dimensional bed forms. *Water Resources Research*. 29(12): 3935-3953.
13. Simons D. B. and Richardson E. V. 1966. Resistance to flow in alluvial channels. *USGS Professional*. 422-61.
14. Venditti J. G. and Bennett S. J. 2000. Spectral analysis of turbulent flow and suspended sediment transport over fixed dunes. *Journal of Geophysical Research*. 105: 22035-22047.
15. Zedler E. A. and Street R. L. 2001. Large eddy simulation of sediment transport: current over ripples over ripples. *Journal of Hydraulic Engineering*. 127(6): 444-452.