

بررسی آزمایشگاهی تأثیر شکل بستر ریپل بر روی تغییرات تنش برشی بستر

حسین صمدی بروجنی^۱، پری ملکی^{۲*}، محمد جواد کتابداری^۳ و داریوش ملکی^۴

۱- دانشیار سازه های آبی، دانشگاه شهرکرد

۲- نویسنده مسئول، کارشناس ارشد سازه های آبی، دانشگاه شهرکرد Pmaleki_6771@yahoo.com

۳- دانشیار سازه های دریایی، دانشگاه امیرکبیر

۴- کارشناس ارشد سازه های دریایی دانشگاه امیرکبیر

تاریخ پذیرش: ۹۳/۴/۳

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۰/۳

چکیده

اثر متقابل بین جریان آب و بستر فرسایش پذیر که همراه با انتقال رسوب می باشد، باعث ایجاد شکل های بستر می شود. ریپل ها کوچک ترین شکل بستر هستند. در این تحقیق به بررسی تنش برشی بستر، بر روی شکل بستر ریپل پرداخته شده است. بدین منظور آزمایش هایی در ۴ شیب (۰/۰۰۰۵ تا ۰/۰۰۳) و با دبی های (۱۰ تا ۴۰ لیتر بر ثانیه) بر روی ریپل های مصنوعی ساخته شده در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد انجام شد، برای اندازه گیری تنش برشی از دستگاه سرعت سنج سه بعدی ADV استفاده شد. نتایج برای ریپل های ساخته شده در این تحقیق نشان داد که میزان تنش برشی بستر در روی تاج ریپل ها حداقل مقدار خود و در روی نقطه میانی وجه بالادست ریپل حداکثر مقدار خود را دارد به طوری که با حرکت از تاج ریپل به سمت وجه بالادست آن روند افزایشی دارد. همچنین نتایج نشان داد که میزان تنش برشی ناشی از شکل بستر ۲۶ درصد از کل تنش برشی را شامل می شود.

کلیدواژه ها: شکل بستر، ریپل، رودخانه های آبرفتی، تنش برشی بستر

Experimental Study Of The Effect Of The Ripple Bed Forms On The Bed Shear Stress

H. Samadi-Boroujeni¹, P. Maleki^{2*}, M. j. ketabdari³ and D. Maleki⁴

1- Associated Professor , Department. of Water Engineering, Shahrekord University, Shahrekord , Iran.

2*- M.Sc, Hydraulic Structures, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

3- Associate Professor Faculty of Marine Technology, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

4- M.Sc, Hydraulic Structures, Amirkabir University, Tehran. Iran.

Received: 24 December 2013

Accepted: 24 June 2014

Abstract

Interaction between water flow and bed erodibility, which is associated with sediment transport and creat bed forms. Ripples are the smallest of the bed forms. Experiments were performed with variety slopes of 0.0005 to 0.003 and discharges of 10 to 40 L/S, on the artificial ripple in the hydraulic Laboratory of Shahrekord University. Velocity measurements were collected using an Acoustic Doppler Velocimeter. It was observed the peak value of bed shear stress was appear on the midpoint of upstream surface and the lowest value appear on the crest. From the crest to trough, the general bed shear stress was in a trend of increasing. It was also observed that in the case of ripples bed forms were consist of about 26% of total bed shear stress.

Keywords: Bed form, Ripple, Alluvial river, Bed shear stress.

مقدمه

اثر متقابل بین جریان آب و بستر فرسایش پذیر که همواره با پدیده انتقال رسوب همراه است باعث ایجاد انواع شکل‌های بستر می‌شود. از رایج‌ترین شرایط مرزی در رودخانه‌های آبرفتی، بسترهای متحرک پوشیده از ریپل‌ها و تلماسه‌ها می‌باشند. این شکل‌ها، در بسیاری از سیستم‌های آبرفتی نقش حیاتی در تقابل بین جریان، دبی رسوب و مورفولوژی بستر بازی می‌کنند (مولر و گیرا، ۱۹۸۶).

بنابراین اطلاع از نحوه شکل‌گیری، مهاجرت و نحوه تأثیر شکل‌های بستر بر ساختار جریان از مسائل ضروری در فهم فرآیند حمل رسوب در رودخانه‌ها می‌باشد. مطالعات اخیر بر آبرفت‌های کف رودخانه‌ها نشان داد ریپل‌ها و تلماسه‌ها می‌توانند قسمت اعظم تجمعات حوایش رودخانه‌های با بستر آبرفتی را تشکیل دهند (بست و کوستاسچوک^۱، 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^۲، ۱۹۹۳). با این وجود هنوز دانش انسان در مورد نحوه 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.

به عقیده دیگران در سال ۱۹۸۴ (به نقل از کارلینگ^۳، ۱۹۹۹) ریپل‌ها اغلب دو بعدی با قله‌های گسترده و طولانی عمود بر خطوط جریان هستند. پشته‌های کوچک در رسوبات کوچکتر از ۰/۷ میلی‌متر و بزرگتر از ۰/۱۵ میلی‌متر شکل می‌گیرند. این دسته از شکل‌های بستر در رسوبات درشت‌تر از ۰/۷ میلی‌متر تشکیل نمی‌شوند، چرا که شرط لازم برای شکل‌گیری ریپل‌ها این است که جریان از نظر هیدرولیکی صاف باشد (کارلینگ، ۱۹۹۹).

ریپل‌ها طول موجی کمتر از ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاعی تقریباً کمتر از ۳ سانتی‌متر دارند 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 (چین و وان^۴، ۱۹۹۹).

طبق نظر کارلینگ (۱۹۹۹) طول ریپل‌ها با اندازه ذره و به طور دقیق‌تر با عدد رینولدز ذره متناسب است. در مقطع طولی رودخانه تقریباً به شکل مثلث می‌باشند 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 مواد بستر است. از بین پژوهش‌هایی که برای شناسایی ساختار جریان در کانال‌ها با بستر ناهموار انجام شده می‌توان به پژوهش‌های (ایکدا و آسیدا^۵، ۱۹۸۳) اشاره نمود. در این تحقیق مشاهده گردید که جریان درون یک کانال با بستر ناهموار شامل ریپل، دارای نواحی جداشدگی و جریان‌های گردابی نعلی شکل در قسمت پایین دست ریپل می‌باشد و حداکثر انتشار تلاطم در این نواحی اتفاق می‌افتد.

مطالعات دیگری که توسط سجادی و همکاران در سال ۱۹۹۶ بر روی ساختار جریان بر روی بسترهای با شکل ریپل انجام شد نشان داد که جریان‌های گردابی تشکیل شده در پشت ریپل‌ها تأثیر بسیاری بر روی حرکت رسوب خواهد داشت (نبوی و همکاران، ۱۳۸۷). از جمله تحقیقاتی که برای شبیه‌سازی عددی جریان حامل رسوب بر روی ریپل انجام شده است می‌توان به تحقیقات (زدلر و استریت^۶، ۲۰۰۱) اشاره کرد. در این تحقیق از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ برای شبیه‌سازی میدان جریان استفاده شد و نشان دادند که گردابه‌های تشکیل شده نزدیک بستر عامل تعیین‌کننده در حرکت رسوبات می‌باشند.

فلمینگ نیز در سال ۱۹۸۸ (به نقل از جویپ و همکاران^۷، ۱۹۹۹) بر پایه داده‌های آزمایشگاهی رابطه زیر را برای ریپل‌ها پیشنهاد داد:

$$h_m = 0.0677 L^{0.8098} \quad (1)$$

در این رابطه h_m : متوسط ارتفاع ریپل‌ها برحسب متر و L : طول ریپل برحسب متر است.

مقاومت ذره قسمتی از مقاومت جریان می‌باشد که در اثر نیروی رانش سطحی به وجود می‌آید در حالی که مقاومت شکل در اثر اختلاف فشار بین سطح جلو و سطح انتهایی فرم بستر به وجود می‌آید، این مقاومت صرفاً به دلیل تشکیل شکل بستر و ایجاد جداشدگی خطوط جریان به وجود می‌آید. در نتیجه رودخانه‌های آبرفتی مقدار تنش برشی در بستر رودخانه را می‌توان به صورت زیر نوشت:

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

که در آن τ' : بخشی از تنش برشی است که صرف مقاومت ذره می‌شود و τ'' : بخش دیگری از تنش برشی که صرف مقاومت شکل بستر می‌گردد.

- 1 - Muller and Gyra
- 2 - Best and Kostaschuk
- 3 - Nelson *et al.*
- 4 - Carling
- 5 - Chien and Wan

- 6 - Ikeda and Asaeda
- 7 - Zedler and Street

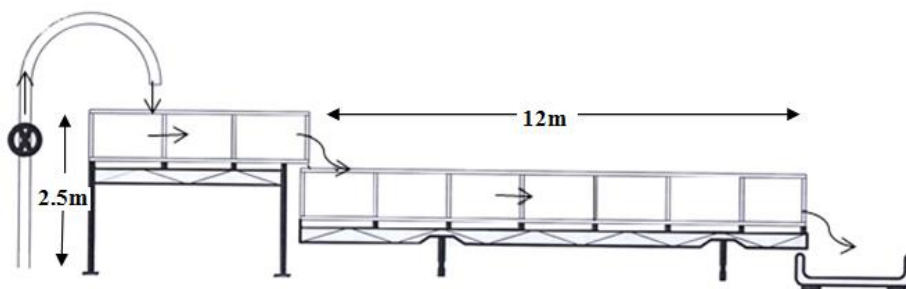
ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر واقع در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد ۳۲ آزمایش بر روی ریپل‌ها با ابعاد ثابت صورت گرفت. فلوم دارای کف فلزی و دیواره‌های شیشه‌ای می‌باشد، که شیب پذیر بوده و امکان تغییر شیب کف به کمک چک‌های هیدرولیکی فراهم می‌باشد. در انتهای مخزن فلوم یک سرریز مثلی قرار دارد که امکان اندازه‌گیری دبی را فراهم می‌کند. همچنین برای مستهلک کردن انرژی از توری‌های سرعت گیر در قسمت مخزن فلوم استفاده شد. شکل (۱) شماتیکی از فلوم را نشان می‌دهد.

بدیهی است چنانچه شکل بستر وجود نداشته باشد، تمام تنش برشی بستر صرف مقاومت در مقابل ذره می‌شود (شفاعی بجستان، ۱۳۸۷). در این پژوهش با ساخت ریپل‌های مصنوعی با ابعاد ثابت، به بررسی توزیع تنش برشی کف بر روی ریپل و مقایسه تنش برشی بر روی بستر ریپل با بستر مسطح (بدون شکل بستر) پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

فلوم آزمایشگاهی

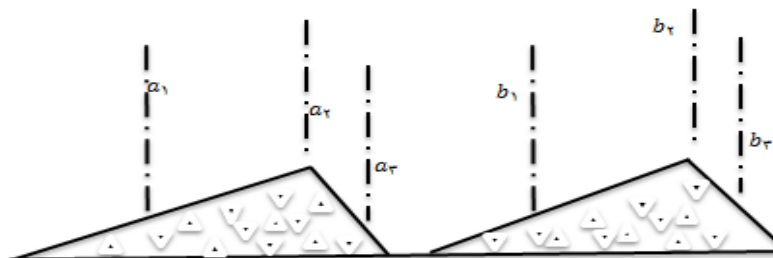
در این پژوهش با ساخت ریپل‌های مصنوعی به صورت متناوب در طول یک فلوم آزمایشگاهی با طول ۱۲ متر، عرض ۴۰ سانتی‌متر و



شکل ۱- شماتیکی از فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده



شکل ۲- نمایی از ریپل‌های موازی در کف فلوم آزمایشگاهی و موقعیت سرعت سنج ADV

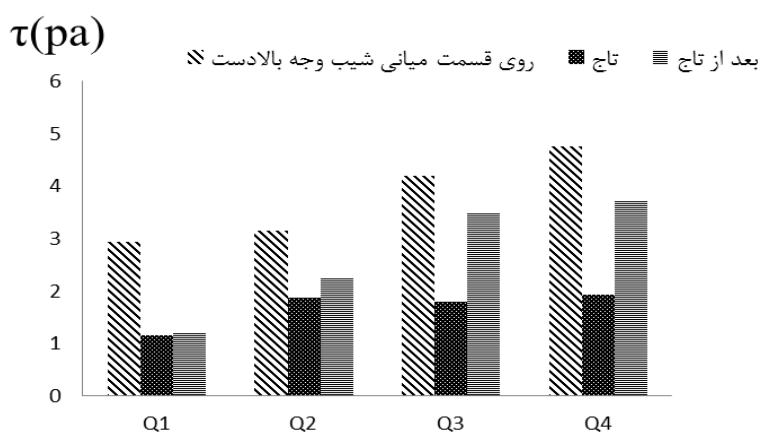


شکل ۳- شکل شماتیکی از ریپل‌ها و مقاطع اندازه‌گیری سرعت بر روی آنها

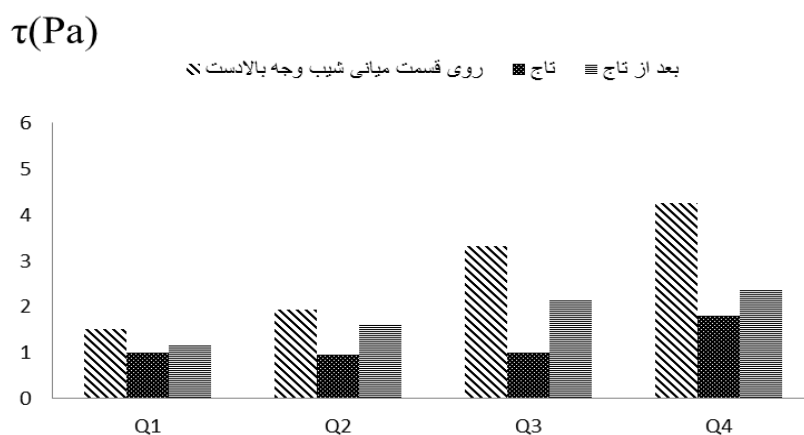
صمدی بروجنی و همکاران: بررسی آزمایشگاهی تأثیر شکل بستر ریپل بر روی...

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

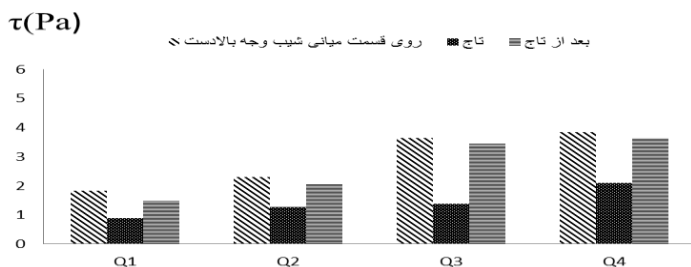
محدوده شیب		محدوده سرعت (m/s)		محدوده دبی (l/s)		نام روش
پیشینه	کمینه	پیشینه	کمینه	پیشینه	کمینه	
۰/۰۲	۰/۰۰۰۲	۰/۷۸۶	۰/۱۳۴	۵۰	۱۰	آلبرتسون
۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۰۱	۰/۲۵	۰/۰۸۹	۵۰	۱۰	هیل
۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۱	۰/۳۳۴	۰/۰۸۹	۵۰	۱۰	سایمونز و ریچاردسون
۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۱	۰/۲۰۸	۰/۰۸۹	۵۰	۱۰	انگلوند و هانسن
۰/۱	۰/۰۰۰۱	۱	۰/۱	۵۰	۱۰	عطاءاله
۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۵	۰/۳۲۱	۰/۱۶۷	۵۰	۱۰	مطالعات آزمایشگاهی دیگران



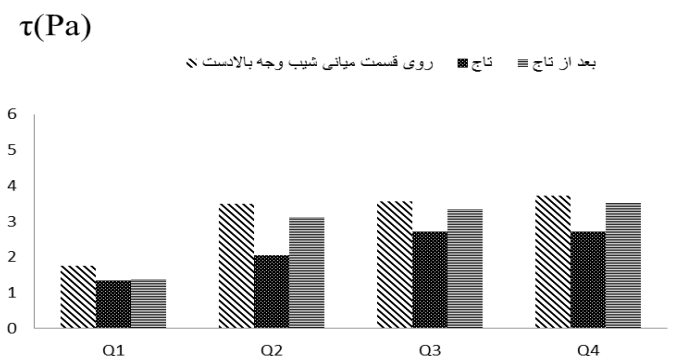
شکل ۴- مقادیر تنش برشی بستر در شیب ۰/۰۰۰۵



شکل ۵- مقادیر تنش برشی بستر در شیب ۰/۰۰۱



شکل ۶- مقادیر تنش برشی بستر در شیب ۰/۰۰۲



شکل ۷- مقادیر تنش برشی بستر در شیب ۰/۰۰۳

ایستایی برای ذرات با قطر متوسط ۰/۵۲ میلی‌متر برابر ۳۲ درجه اندازه‌گیری شد، لذا شیب وجه پایین دست ریپل‌ها برابر ۳۲ درجه و شیب وجه بالادست آنها ملایم و برابر ۸ درجه در نظر گرفته شد. تمام پارامترهای فیزیکی مانند ارتفاع و زاویه ایستایی مواد بستر و طول موج ریپل‌ها در تمام آزمایش‌ها ثابت فرض شد. شکل (۲) نمایی از ریپل‌های ساخته شده در فلوم را در حین اندازه‌گیری سرعت نشان می‌دهد.

ریپل‌های موجود در طبیعت طول موجی کمتر از ۳۰ سانتی‌متر دارند و ارتفاع آنها بین ۰/۵ تا ۳ سانتی‌متر می‌باشد. بیشترین ارتفاع ریپل‌ها هم ۵ سانتی‌متر مشاهده شده است. در مقطع طولی رودخانه تقریباً به شکل مثلث می‌باشند. شیب وجه بالا دست آنها نسبتاً ملایم و بلند و شیب وجه پایین دست آنها تند و کوتاه است.

برنامه آزمایش‌ها

برای انجام آزمایش‌ها لازم است تا ابتدا شیب و دبی‌هایی مناسبی که در آنها شکل بستر ریپلی اتفاق می‌افتد تعیین شود. بدین منظور به کمک روش‌هایی از جمله روش‌های آلبرتسون به نقل از (چین و وان، ۱۹۹۹)، هیل به نقل از (چین و وان، ۱۹۹۹)، عطاءاله (۱۹۶۸) به نقل از شفافی بجستان (۱۳۸۷) و سایر روش‌های آزمایشگاهی، با اشتراک‌گیری محدوده مناسب از روش‌ها، دبی و

براساس مطالعات سایمونز و ریچاردسون^۱ (۱۹۶۶) قطر متوسط ذرات ریپل باید کمتر از ۰/۷ میلی‌متر باشد، لذا رسوبات مورد استفاده دارای قطر متوسط ۰/۵۲ میلی‌متر با ضریب دانه بندی $C_D = 1/58$ و مقدار ضریب انحناء $C_{II} = 1/0.5$ انتخاب شد، برای محاسبه ضرایب انحناء و دانه بندی به ترتیب از روابط (۳) و (۴) استفاده شد.

$$C_{II} = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (3)$$

$$C_D = \frac{D_{30}^2}{D_{10} D_{60}} \quad (4)$$

که در این روابط D_{10} و D_{30} ، D_{60} : به ترتیب قطری از ذرات است که ۱۰ و ۳۰ و ۶۰ درصد ذرات قطری کمتر از آن را دارند. براساس مطالعات انجام شده شیب وجه پایین دست ریپل‌ها تند و کوتاه بوده و تقریباً برابر با زاویه ایستایی (θ) مواد بستر می‌باشد (چین و وان، ۱۹۹۹).

برهمن اساس در این تحقیق مقدار طول موج ریپل‌ها ثابت و برابر ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع آنها ۳ سانتی‌متر فرض شد. مقدار زاویه

فرکانس نمونه برداری (۲۰۰ هرتز) که در نتیجه آن تعداد زیادی داده‌های سرعت ثبت می‌گردند، تأثیر غربال نمودن داده‌ها بر متوسط زمانی سرعت جریان محاسبه شده را ناچیز می‌کند. 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 مورد استفاده قرار گرفتند. به دلیل اینکه در جریان‌های آشفته سرعت جریان دائماً در نوسان است و ثابت نیست، برای محاسبه تنش‌های رینولدز از مقادیر کواریانس در داده‌های دستگاه ADV استفاده می‌شود، مفهوم اصلی کواریانس در این پژوهش وابستگی بین دو یا سه مؤلفه سرعت است که در زیر روابط مربوط به آن آمده است:

$$Cov-xz = ((\sum v_z v_x) / n - 1) - ((\sum v_z \sum v_x) / n(n-1)) \quad (5)$$

$$Cov-yz = ((\sum v_z v_y) / n - 1) - ((\sum v_z \sum v_y) / n(n-1)) \quad (6)$$

در این روابط n : تعداد نمونه‌ها و V_x ، V_y و V_z : به ترتیب مؤلفه‌های سرعت در راستای محورهای مختصات x ، y و z است. وال (۱۹۹۶) (به نقل از کیونگ سیپ، ۲۰۱۰) نشان داد که تنش‌های رینولدز (τ_{xz} و τ_{yz}) به کمک داده‌های ADV بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = -\rho (cov-xz) \quad (7)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = -\rho (cov-yz) \quad (8)$$

$$\tau_{Bed} = \sqrt{\tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2} \quad (9)$$

که در این روابط:

ρ : چگالی آب بر حسب مترمکعب بر ثانیه، τ_{xz} و τ_{yz} : به ترتیب عبارتست از عرض از مبدأ معادله رگرسیون خطی تنش‌های رینولدز و عمق جریان در هر مقطع در صفحه XOZ و YOZ و τ_{Bed} تنش برشی بستر بر حسب پاسکال می‌باشد. در این تحقیق به مقادیر به دست آمده تنش برشی به کمک داده‌های دستگاه سرعت سنج و همچنین روابط بالا، برای تمام آزمایش‌ها محاسبه و در شکل‌های (۴) تا (۷) ترسیم شده است. قسمت میانی وجه بالادست^۲، تاج^۳ و مقطع بعد از تاج^۴ روی ریپل با هم مقایسه شده است.

شیب مناسب برای انجام آزمایش‌ها تعیین می‌شود. جدول (۱) حدود کمینه و بیشینه از دبی، شیب و سرعت در روش‌های مختلف را نشان می‌دهد. آزمایش‌ها در چهار شیب ۰/۰۰۵، ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۲ و ۰/۰۰۳ و در چهار دبی ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ لیتر در ثانیه انجام شد. به تعداد ۳۲ آزمایش در کل انجام شد. در هر آزمایش عمق متوسط جریان با استفاده از یک عمق سنج مجهز به کولیس با دقت ۰/۰۱ سانتی‌متر که بر روی فلوم نصب شده بود در تمام طول فلوم اندازه‌گیری شد. همچنین عمق جریان توسط دریچه انتهایی فلوم تنظیم شد. اندازه-گیری سرعت جریان به کمک دستگاه سرعت‌سنج سه‌بعدی ADV ساخت نروژ 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 ۲ دقیقه بود. با توجه به شرایط توسعه یافتگی جریان که با مشاهده و همچنین تثبیت پروفیل جریان انجام می‌شد، اندازه‌گیری سرعت در سه ایستگاه در مسیر جریان (نواحی ابتدایی، میانی و انتهایی جریان در فاصله‌ی ۶، ۸ و ۱۰ متری از ابتدای فلوم و در هر ایستگاه در سه مقطع (قبل، روی و بعد از ریپل) انجام گرفت. بدین ترتیب در هر آزمایش اندازه‌گیری سرعت در سه مقطع جریان انجام گرفت. 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 انجام گرفت. یعنی به طور متوسط ۱۲ نقطه در هر مقطع اندازه‌گیری شد. با توجه به محدودیت‌های دستگاه سرعت سنج اندازه‌گیری‌ها در فاصله ۳/۵ سانتی‌متری از سطح ریپل‌ها انجام می‌گرفت. به طور متوسط در هر آزمایش سرعت جریان در ۱۰۸ نقطه انجام شد. در شکل (۳) شماتیکی از مقاطع اندازه‌گیری بر روی ریپل‌های مصنوعی را نشان می‌دهد. همچنین به منظور مقایسه شکل‌های بستر با حالت بدون شکل بستر، بستر صافی با رسوبات مورد استفاده در ساخت ریپل‌ها، به کمک چسب‌های مخصوص (به منظور تثبیت رسوبات) ساخته شدند. برای ساخت این نوع بستر، کف قاب‌های ساخته شده رسوبات به کمک چسب به گونه‌ای که امکان انتقال آنها به پایین دست وجود نداشته باشد پاشیده شدند. اندازه‌گیری در این شکل بستر نیز مشابه بستر با ریپل مصنوعی بود، یعنی در سه مقطع ۶، ۸ و ۱۰ متری از ابتدای فلوم اندازه‌گیری‌ها انجام شد.

نتایج و بحث

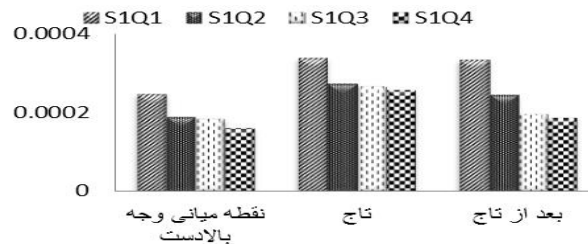
به منظور بررسی میزان خطای بین داده‌های غربال شده و غربال نشده (خام)، در محاسبه پارامترهای جریان از جمله سرعت جریان، تنش‌های رینولدز و نوسانات سرعت اغلب از نرم افزار Win ADV استفاده می‌شود. بررسی‌های عطار(۱۳۸۷)، نصیری (۲۰۱۱) فاضل (۲۰۱۰) و داور پناه (۱۳۹۰) به نقل از معتمدی و افضلی مهر (۱۳۹۱) نشان می‌دهد که طولانی بودن زمان اندازه‌گیری و مقدار بزرگ

1 - Kyung-Seop

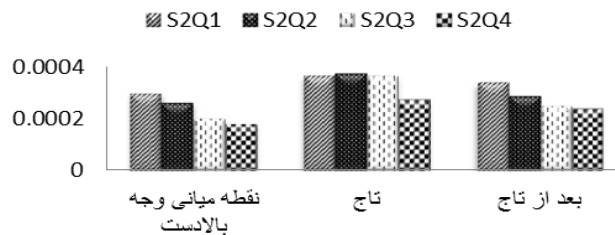
2- Midpoint of upstream face

3 - crest

4 - After crest

$\delta(m)$ 

شکل ۸- مقادیر ضخامت لایه مرزی در شیب ۰/۰۰۰۵

 $\delta(m)$ 

شکل ۹- مقادیر ضخامت لایه مرزی در شیب ۰/۰۰۱

همچنین وجود فرسایش شدید در شیب بالادست ریپل مقدار تنش برشی را در این ناحیه افزایش می‌دهد، به تدریج هرچه که به سمت تاج ریپل پیش می‌رویم فرسایش کمتر شده و بر مقدار رسوبگذاری افزوده می‌شود لذا در این ناحیه تنش کمترین مقدار خود را خواهد داشت (منظور از فرسایش و رسوبگذاری مکانیسم ساخت شکل بستر ریپل است که در ابتدا روی وجه بالادست رسوبات شسته شده و فرسایش می‌یابند و با گذشت زمان دوباره روی تاج ریپل انباشته شده و مجدداً این فرآیند تکرار می‌شود)، با فاصله گرفتن از تاج ریپل و در روی وجه پایین دست مقادیر سرعت در جهت عمود بر جهت جریان منفی بوده که نشان دهنده وجود جریان‌های گردابی در این ناحیه می‌باشد و در نتیجه افزایش مجدد تنش را به دنبال خواهد داشت، که با نتایج جعفری میانایی و کشاورزی (۱۳۸۶) تطابق خوبی دارد. در شکل‌های (۸) تا (۱۱) مقادیر ضخامت لایه مرزی در شیب-های مختلف بر روی سه مقطع از ریپل محاسبه و برای دبی‌های مختلف براساس رابطه زیر محاسبه و به صورت نمودار نمایش داده شده است:

$$\delta = 11.6(v/u^*)$$

(۱۰)

همانطور که از شکل‌های (۴) تا (۷) قابل برداشت است، مقادیر تنش برشی کف در تمام آزمایش‌ها از یک روند خاص تبعیت می‌کند، بطوری که در تمام شیب‌ها با افزایش دبی مقدار تنش برشی کف در سه مقطع نقطه میانی وجه بالادست ریپل، تاج و وجه پایین دست ریپل نیز افزایش یافته است. از طرفی در هر شیب مقدار تنش در قسمت میانی وجه بالادست ریپل بیشترین مقدار تنش را دارد و هرچه که به طرف تاج ریپل نزدیک‌تر می‌شویم از مقدار تنش کاسته شده و به حداقل مقدار خود می‌رسد سپس با عبور از روی تاج ریپل و رسیدن به وجه پایین دست آن یعنی شیب پشت به جریان مقدار تنش برشی کف افزایش می‌یابد ولی مقدار آن از وجه بالادست کمتر است. در توجیه این مسئله می‌توان گفت به دلیل شکل هندسی بستر و نیز طبق رابطه پیوستگی، واگرایی در خطوط جریان بعد از تاج و همگرایی در وجه بالادست انتظار می‌رود، همچنان که پژوهشگرانی چون بنت و بست (۱۹۹۵) و وندیتی و بنت^۱ (۲۰۰۰) در کارهای خود چنین الگویی را در خطوط جریان مشاهده کردند.

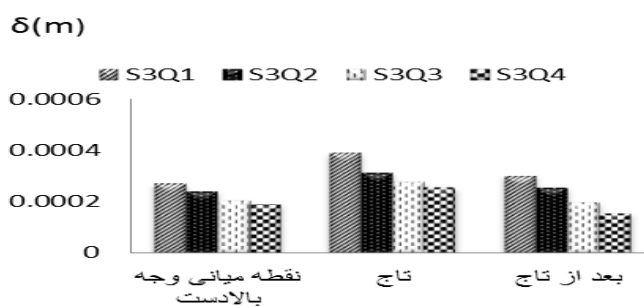
1 -Bennett and Best

2 - Venditti J.G., and Bennett

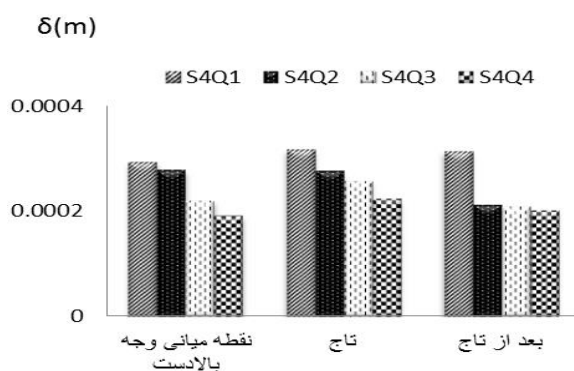
صمدی بروجنی و همکاران : بررسی آزمایشگاهی تأثیر شکل بستر ریپل بر روی...

باشد. ضخامت لایه مرزی در روی شیب بالادست ریپل کمتر بوده و در نتیجه باعث افزایش سرعت برشی و در نهایت افزایش تنش برشی کف خواهد شد.

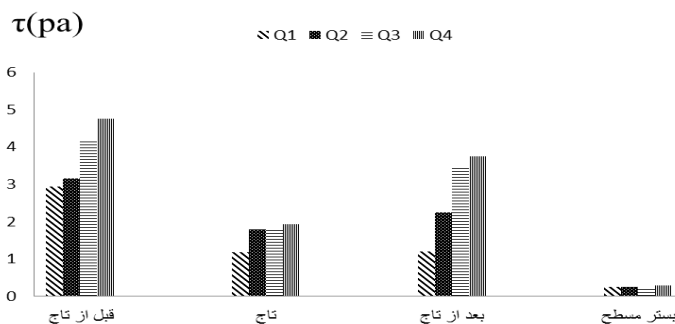
که در این رابطه v : لزجت سینماتیک آب و u^* : سرعت برشی است. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش دبی مقدار ضخامت لایه مرزی کاهش می‌یابد از طرفی مقادیر آن در روی تاج ریپل بیشتر است در نتیجه ضخامت لایه مرزی در روی تاج ضخیم‌تر می‌-



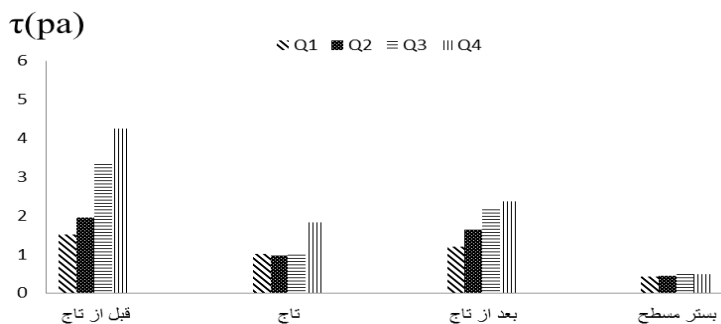
شکل ۱۰- مقادیر ضخامت لایه مرزی در شیب ۰/۰۰۲



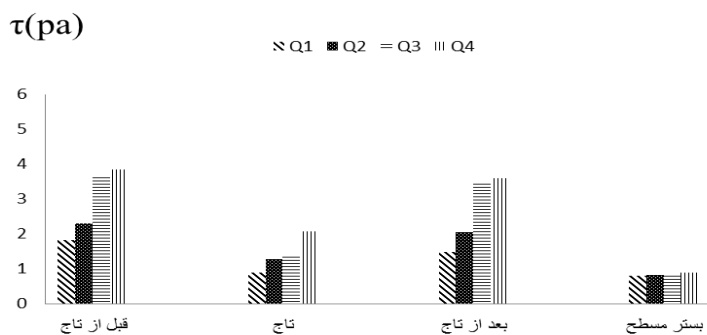
شکل ۱۱- مقادیر ضخامت لایه مرزی در شیب ۰/۰۰۳



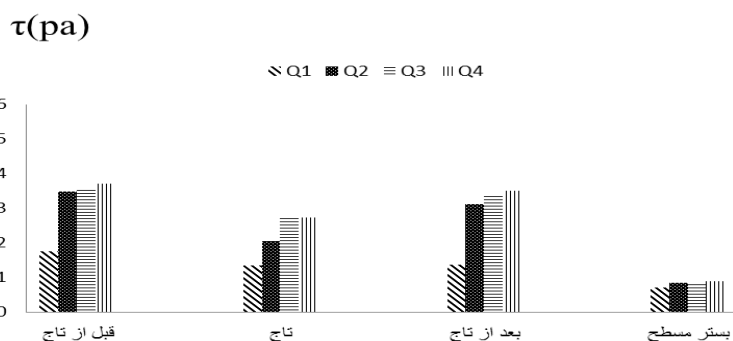
شکل ۱۲- مقایسه مقادیر تنش برشی بستر در روی ریپل‌ها و بر روی بستر مسطح در شیب ۰/۰۰۰۵



شکل ۱۳- مقایسه مقادیر تنش برشی بستر در روی ریپل‌ها و بر روی بستر مسطح در شیب ۰/۰۰۱



شکل ۱۴- مقایسه مقادیر تنش برشی بستر در روی ریپل‌ها و بر روی بستر مسطح در شیب ۰/۰۰۲



شکل ۱۵- مقایسه مقادیر تنش برشی بستر در روی ریپل‌ها و بر روی بستر مسطح در شیب ۰/۰۰۳

صمدی بروجنی و همکاران: بررسی آزمایشگاهی تأثیر شکل بستر ریپل بر روی...

طراحی سازه‌های آبی در نظر گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش با نتایج به دست آمده توسط سجادی و همکاران (۱۹۹۶) به نقل از نبوی (۱۳۸۷)، ایکدا و آسیدا (۱۹۸۳) و نبوی و همکاران (۱۳۸۷) همخوانی دارد.

نتیجه گیری

عموماً در تحقیقاتی که در زمینه جریان بر روی بستر ناهموار انجام شده خصوصیات کلی جریان مانند نرخ انتقال رسوب مدنظر قرار گرفته است. در این تحقیق با انجام ۳۲ سری آزمایش بر روی شکل بستر هموار و ریپل سعی شد که به تأثیر هندسه ریپل بر توزیع تنش و مقایسه آن با بستر هموار پرداخته شود. با تحلیل داده‌های بدست آمده مشخص گردید که میزان تنش در تمام آزمایش‌ها روند ثابتی داشته بطوری که بر روی وجه بالادست ریپل حداکثر مقدار خود را دارد و هر چه که به سمت تاج نزدیک می‌شویم از مقدار آن کاسته شده و در تاج کمترین مقدار خود را دارد، بتدریج که به سمت وجه پایین دست ریپل نزدیک می‌شویم تحت تأثیر جریان‌های گردابی به مقدار آن افزوده می‌شود. علاوه بر این با مقایسه تنش بر روی بستر هموار و ریپل مشاهده می‌شود که قریب ۲۶ درصد از تنش برشی بستر ناشی از شکل بستر است لذا در طراحی پروژه‌ها این مسئله باید مدنظر قرار بگیرد.

به منظور بررسی تأثیر شکل بستر بر تنش برشی کف، در شکل‌های (۱۲) تا (۱۵) مقادیر تنش برشی کف در روی ریپل‌ها و بر روی بستر مسطح (بدون شکل بستر) با هم مقایسه شدند.

همان طور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود در تمام شیب‌ها با افزایش دبی میزان تنش برشی بستر در روی بستر مسطح نیز افزایش یافته ولی مقادیر آن در تمام دبی و شیب‌ها از مقادیر تنش برشی کف بر روی ریپل‌ها کمتر است. که نشان دهنده این است که بخشی از تنش برشی کل، صرف مقاومت ذره (τ') و بخش دیگری از آن صرف مقاومت شکل بستر (τ'') می‌گردد. بدیهی است چنان چه شکل بستر وجود نداشته باشد، تمام تنش برشی بستر صرف مقاومت در مقابل ذره می‌شود. به کمک رابطه (۲) (روابط اینشتین-بارباروسا) مقادیر تنش مربوط به شکل ریپل (τ'') و مقدار تنش حاصل از ذره (τ') محاسبه شد. شایان ذکر است که مقاومت کل (τ) با استفاده از داده‌های دستگاه ADV و روابط (۵) تا (۹) محاسبه شده است. سپس به کمک نرم افزار SPSS و Excle محاسبات آماری انجام شد. نتایج نشان داد که تنش ناشی از شکل بستر ۲۶ درصد از تنش برشی کل را تشکیل می‌دهد. در نتیجه می‌توان گفت با اینکه ریپل‌ها کوچک‌ترین و در واقع اولین شکل بستر به وجود آمده در بستر رودخانه‌ها بشمار می‌روند ولی قادرند بخش زیادی از تنش برشی بستر را شامل شوند به طوری که باید حضور شکل‌های بستر را در

منابع

- ۱- جعفری میانائی، س و ع. کشاورزی. ۱۳۸۶. بررسی تنش و انرژی جنبشی بر روی ریپل‌ها 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.
- ۳- معتمدی، آ و ح. افضلی مهر. ۱۳۹۱. بررسی برهمکنش هندسه تلماسه بر ساختار جریان و طول ناحیه جدایی با استفاده از دستگاه های سرعت سنج PIV و ADV. نشریه آب و خاک، ۲۷(۲): ۳۴۱-۳۲۸.
- ۴- نبوی، س. ه. کشاورزی، ع. کاظم زاده پارسی، م. و ب سیستانی. ۱۳۸۷. بررسی عددی و آزمایشگاهی میدان جریان متلاطم در بین دو ریپل در کف کانال باز. مجله دانشکده فنی دانشگاه تبریز، ۳۸(۳): ۶۸-۶۳.
- 5- Bennett, S. J. and J.L. Best. 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 R. Kostaschuk. 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 Z. Wan. 1999. Mechanics of sediment transport. Reston, VA: ASCE Press. pp 913: 195-245.
- 9- Ikeda, S. and T. Asaeda. 1983. Sediment suspension with rippled bed. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE, 109 (3):409-423.

- 10-Joep,A., Storms Remke, L. V and L.Suzanne F. 1999. Preservation of cross-sets due to migration of current ripples over aggrading and non- aggrading beds: Comparison of experimental data with theory. Journal of International Association of sedimentologists,.,sedimentology,46 (1):189-200.
- 11-Kyung-Seop , S. 2010. Methodology for calculating shear stress in a meandering channel. Master of Science Dissertation, The Universityof Colorado State.
- 12-Muller ,A. and A. Gyra. 1986. On the vortex formation in the mixing layer behind dune. Journal of Hydraulic Research, 24 (5):359-375.
- 13-Nelson ,J. M. , McLean, S. R. and S. R. Wolfe. 1993. Mean flow and turbulence fields over two-dimensional bed forms. Water Resources. Research, 29 (12):3935-3953.
- 14-Simons ,D. B. and E. V. Richardson. 1966. Resistance to flow in alluvial channels. USGS Professional .61-422.
- 15-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.
- 16-Zedler, E. A. and R. L Street. 2001. Largeeddy simulation of sediment transport: Current over ripples over ripples. Journal of Hydraulic Engineering, 127 (6): 444-452.