

ارزیابی مقاومت جریان در رودخانه های رسوبی با فرم بسترریپل در شرایط هیدرولیکی مختلف

الهام روشنی^{۱*}، علی حسین زاده دلیر^۲، داود فرسادی زاده^۳، فرزین سلماسی^۴

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۵/۱۲ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۴/۱۲

^۱ دانشجوی دکتری تخصصی گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

^۲ استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

^۳ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

^۴ مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: elhm.roshani@gmail.com

چکیده

در آبراهه‌های آبرفتی، حرکت رسوبات و فرم بستر ناشی از آن، تأثیر زیادی بر مقاومت در مقابل جریان آب دارد. در تحقیق حاضر برای بررسی تأثیر فرم بستر ریپل بر روی تنش برشی جریان آزمایش‌هایی در یک فلوم آزمایشگاهی با تغییر در دبی، شیب و عمق جریان انجام شد تا تأثیر این پارامترها بر روی مقاومت جریان مطالعه شود. در بسترهای دارای فرم، تنش برشی از دو بخش تشکیل می‌شود. T_b' که تنش برشی مؤثری است که بر تک تک ذرات رسوب وارد می‌شود و T_b'' نیز تنش برشی است که از مقاومت شکلی یا فرم ایجاد می‌گردد. همچنین با تشکیل بیشتر فرم‌های بستر تنش برشی و ضریب زبری افزایش یافت. نتایج نشان داد که با تشدید پارامترهای جریان و در نتیجه تشدید ایجاد تلاطم در پایین دست تاج فرم بستر، مقدار پارامترهای مورد مطالعه افزایش یافت. نتایج بیان‌گر آن بود که با افزایش سرعت جریان، در محدوده مشخصی از دبی (۱۰ تا ۱۴ لیتر بر ثانیه) و شیب کف (۰ تا ۰/۱۵) ارتفاع ریپل‌ها زیاد شده و همچنین تعداد ریپل‌های تشکیل شده بیشتر می‌شوند. بیشترین محدوده تغییرات مشاهده شده در ۷۰ سانتی‌متری انتهایی کانال بود. افزایش ارتفاع ریپل، موجب شد که انتقال رسوبات نیز زیاد شده و به‌ازای افزایش ۳۵ درصدی پارامتر بی‌بعد $\frac{\Delta}{\lambda}$ (ارتفاع فرم بستر به طول آن)، دبی رسوب بی‌بعد در حدود ۴۰ درصد افزایش نشان داد. با بررسی روند تغییرات تنش برشی ناشی از فرم بستر نسبت به ارتفاع فرم بستر مشخص شد که با افزایش ۴۵ درصدی ارتفاع فرم بستر به‌میزان ۵۸ درصد به تنش برشی ناشی از ریپل‌ها اضافه شد.

واژه‌های کلیدی: انتقال رسوبات، بسترهای آبرفتی، تنش برشی، ریپل، فرم بستر

Evaluation of Flow Resistance in Alluvial Streams with Ripples in Various Hydraulic Conditions

E Roshani^{1*}, A Hossienzade Dalir², D Farsadizade³, F Salmasi⁴

Received: 3 July 2015 Accepted: 2 July 2016

¹ Ph.D Student, Dpet. of Water Engineering, Univ. of Tabriz, Iran

²⁻³ Prof., Dept. of Water Engineering, Univ. of Tabriz, Iran

⁴ Assoc. Prof., Dept. of Water Engineering, Univ. of Tabriz, Iran

*Corresponding Author, Email: elhm.roshani@gmail.com

Abstract

Sediment transport and bedforms in alluvial streams, significantly affect the flow resistance. In the present research to discuss the effect of ripple bedform on the flow shear stress, a series of experiments were done and the influences of ripples on flow roughness coefficient were investigated. These experiments were carried out in a laboratory flume with changing discharge, slope and flow depth alternatively to create different hydraulic conditions. In flow surfaces having bedforms, shear stress includes two parts. The first part is the τ'_b , which is imposed on each particle of the sediment and the second part is the τ''_b , which is the stress created by bedforms. The results showed that the shear stress and roughness coefficient increased with formation of bedforms. Also, with intensifying the flow parameters the turbulences were grown in the downstream of the bedform crest and the studied factors increased accordingly. In a certain limit of discharge (10 to 14 lit/s) and slope (0 to 0.015), results showed that with increasing flow velocity, the height of ripple increased and the number of them increased too. The most variation area was at the last 70 cm length from the end of the channel. With ripple height increasing, sediment transportation was increased more and there was a 40 percent growth of dimensionless sediment discharge, when the $\frac{\Delta}{\lambda}$ (bedform height to the length) increased about 35 percent. Studying the shear stress caused by bedform in relation with bedform height, it was obvious when the ripple height increased about 45 percent, the bedform shear stress increased about 58 percent.

Keywords: Alluvial streams, Bedform, Ripple, Sediment transportation, Shear stress

مقدمه

حرکت توده‌ای ذرات رسوبی در محیط سیال در یک بستر طبیعی با جنس رسوبات مشابه، انتقال رسوب نامیده می‌شود. زمانی که سرعت برشی کمی بیشتر از مقدار بحرانی آن می‌شود، ذرات شروع به غلطیدن و لغزیدن بر روی بستر کرده و دائماً با بستر در تماس هستند. با افزایش

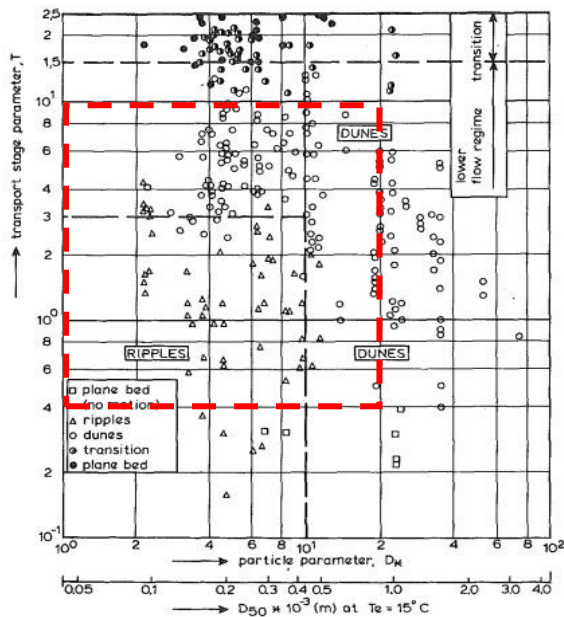
سرعت برشی، ذرات دچار پرش‌های منظم می‌شوند که به حرکات جهشی موسوم هستند. تحت شرایط هیدرولیکی مختلف، حرکت رسوبات در بستر جریان قادر است مقاومتی در مقابل جریان آب ایجاد کند. در بسترهای آبرفتی ضریب زبری از چهار بخش تشکیل می‌شود: (۱) زبری ذرات (۲) زبری ناشی از فرم بستر (۳) زبری ناشی

که در آن Δ ارتفاع فرم بستر، λ طول فرم بستر و $\phi = \Delta/\lambda$ شیب فرم بستر و k_s ضریب زبری کل هستند. کولوسیمو و همکاران (۱۹۸۸) براساس ۲۹ سری داده در بازه‌های مختلف رودخانه‌ای به ارائه رابطه‌ای برای تعیین ضریب مقاومت جریان در رودخانه با رسوبات درشت دانه پرداختند. بایامونته و فرو (۱۹۹۷) به بررسی تأثیر زبری هندسی و پارامتر شیلدز بر روی مقاومت کانال‌های با بستر شنی درشت پرداختند. کریم (۱۹۹۹) در مطالعه خود به بررسی و پیش‌بینی ارتفاع نسبی ($\frac{h}{d}$) ارتفاع فرم بستر و d عمق جریان) فرم‌های مختلف بستر پرداخت. وی براساس افت انرژی که بر اثر نیروی درگ ناشی از فرم بستر ایجاد می‌شود و با توجه به افت کلی بار به پیش‌بینی ارتفاع نسبی فرم بستر پرداخته و رابطه‌ای برای تمامی فرم‌های بستر ارائه نمود. رکینگ و همکاران (۲۰۰۸) برای بررسی بهتر مقاومت جریان ضریب زبری را به صورت خطی تجزیه کردند. در این حالت ضریب زبری f شامل مجموع ضریب زبری مرتبط با جریان آب زلال (f_c) و ضریب زبری مرتبط با بار بستر (f_b) شد. امید و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی تأثیر حرکت بار بستر بر روی مقاومت جریان با دونه‌های مصنوعی پرداختند. نتایج آنها نشان داد که انتقال ذرات رسوبی نرم ($D_{50} = 0.5 \text{ micron}$) در بستر صاف هیدرولیکی تا ۲۲ درصد و در بستر زبر هیدرولیکی تا ۲۴ درصد ضریب مقاومت جریان را کاهش می‌دهد. سیمونس و همکاران (۱۹۶۵) به منظور محاسبه میزان رسوبات انتقالی در جریان همراه با فرم بستر به ارائه رابطه‌ای پرداختند. برای رسیدن به چنین معادله‌ای آنها در حین انجام آزمایش‌های خود سرعت حرکت فرم بستر در جهت جریان و ارتفاع متوسط فرم بستر را به کمک پروب‌هایی

از بارمعلق و ϵ) زبری ناشی از بار بستر. در این تحقیق بار معلق وجود ندارد و هدف مطالعه زبری ناشی از ذرات به‌همراه فرم بستر تشکیل شده از آن است. مطالعات پیشینی که در زمینه انتقال رسوب و زبری بستر انجام یافته است توسط محققانی چون گراف (۱۹۸۷)، یالین (۱۹۷۲)، برای رژیم رودخانه، ون راین و همکاران (۱۹۹۳) و ون راین (۲۰۰۷، ۱۹۸۴a و ۱۹۸۴b) برای رژیم ساحلی صورت گرفته است. یکی از مشکلات اساسی در پیش‌بینی انتقال رسوبات، پیش‌بینی زبری بستر است. ون راین (۱۹۸۴b) در مطالعه خود بر اساس تعداد زیادی از داده‌های منتج شده از فلوم‌ها و همچنین داده‌های صحرایی برای تعیین نوع فرم بستر از پارامتر مرحله انتقال (T) استفاده نموده و براساس آن دیاگرامی طراحی نمود که در شکل ۱ آورده شده است. کاربرد پارامتر T در طبقه‌بندی فرم بستر در رژیم‌های جریان پایین و انتقالی با توجه به این نمودار قابل بیان است. همان‌طور که در شکل ۱ دیده می‌شود پارامتر مرحله انتقال برای تحقیق حاضر محاسبه شد و محدوده‌ای که با خط چین نشان داده شده است محدوده پارامتر انتقال محاسبه شده است. با توجه به این شکل بیشینه میزان قطر متوسط ذراتی که ون راین (۱۹۸۴b) برای تشکیل ریپل‌ها مد نظر قرار داده است ۴۵۰ میکرون می‌باشد اما در این تحقیق $D_{50} = 860 \text{ micron}$ می‌باشد، در نتیجه محدوده تشکیل ریپل نسبت به منطقه پیشنهادی ون راین کمی فراتر خواهد رفت. وی در ادامه مطالعات خود بیان کرد که زبری هیدرولیکی که ناشی از سطح بستر متحرک است به وسیله زبری ذرات و زبری فرم بستر ایجاد می‌شود و از رابطه ۱ به دست می‌آید:

$$k_s = 3D_{90} + 1.1\Delta(1 - e^{-25\phi}) \quad [۱]$$

چگونه ابعاد فرم بستر را می‌توانند تغییر دهند و از سوی دیگر، با تغییر ویژگی‌های ریپل، چه تغییری در خصوصیات جریان اتفاق می‌افتد. در حقیقت به بررسی یک رابطه دو طرفه بین خصوصیات جریان و خصوصیات رسوب پرداخته شده‌است.



شکل ۱- دیاگرام طبقه‌بندی فرم بستر برای رژیم پایین و انتقالی (ون راین ۱۹۸۴).

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های تحقیق حاضر در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز انجام شد. فلوم مورد استفاده دارای طول ۶ m، ارتفاع ۵۰ cm و عرض ۸۰ cm می‌باشد که به‌منظور تسهیل در انجام آزمایش‌ها عرض آن به ۵۰ cm کاهش داده شد (شکل ۲). مواد رسوبی با مشخصات $D_{50} = ۸۶۰$ micron و $G_s = ۲/۳$ مورد استفاده قرار گرفت. جریان رسوب به‌صورت بستر زنده بوده و از بالادست، همراه با جریان آب به‌صورت منظم رسوب نیز به داخل فلوم تزریق گردید. سطح آب به‌کمک اشلهایی که در دیواره شیشه‌ای فلوم نصب شده بود با دقت $\pm 1/۱۰$

اندازه‌گیری و قرائت کردند. کولمن و ملویل (۱۹۹۴) در آزمایش‌های خود پروفیل بستر را در بازه‌های زمانی مشخص اندازه‌گیری کردند تا تغییرات بستر را بر اثر جریان آب تشخیص دهند. براساس نتایج آنها سرعت انتشار فرم بستر با افزایش ارتفاع فرم بستر کاهش می‌یابد. وو و یانگ (۱۹۹۹) با ارتباط دادن چندین پارامتر هیدرولیکی و رسوبی با یکدیگر به تخمین ضریب مانینگ پرداختند. بنت و بریج (۱۹۹۵) دینامیک و هندسه فرم بسترها را در حالت رسوبات ناهمگن بررسی کرد. سوتارد و باکی‌چوال (۱۹۷۳) به ارائه دیاگرامی براساس سرعت متوسط جریان، اندازه ذرات و نوع فرم بستر تشکیل شونده پرداختند. وندیتی و همکاران (۲۰۰۵) در مطالعه‌ای به بررسی نحوه شروع حرکت ذرات رسوبی پرداخته و آن را به دو دسته تقسیم کردند. دسته اول حرکات ناقصی بودند که در سطوح پایین جریان اتفاق افتاده و به‌صورت پراکنده هستند اما دسته دوم که به حرکات‌های فوری موسومند شامل حرکت توده‌های رسوبات بوده که در سطوح بالاتر جریان اتفاق افتاده و حجم بیشتری از رسوبات را انتقال می‌دهند. لاجونس و همکاران (۲۰۱۰) به‌کمک سیستم تصویربرداری با سرعت بالا توانستند حرکت ذرات رسوبی را با دقت بالا دیده و دوره‌های حرکتی آنها را شامل پرواز ذرات، افزایش سرعت و در نهایت دوره استراحت آنها را تعیین و مشاهده نمودند. هدف نهایی از محاسبه ضرایب مقاومت جریان، بررسی تغییرات میزان انتقال بار بستر و در صورت امکان حذف یا تقلیل اثرات منفی بر شرایط مورفولوژی رودخانه و کاهش هزینه‌های ساخت، بهره‌برداری و نگهداری می‌باشد. هدف از انجام این تحقیق بررسی تأثیر فرم بستر ریپل بر روی زبری جریان بوده تا مشخص گردد که پارامترهای هیدرولیکی جریان



شکل ۲- نمایی از فلوم مورد استفاده با کاهش عرض.



شکل ۳- تله ماسه نصب شده در انتهای فلوم.

پس از انجام هر آزمایش و با پایین رفتن سطح آب پروفیل بستر به کمک مترلیزری مدل Leica DISTO D2 اندازه گیری شد. این متر دارای دقت ± 0.025 میلی متر در هر متر بود. این دستگاه قابلیت اندازه گیری در دو جهت طولی و عرضی کانال را داشت. آزمایش ها در سه دبی ۱۰ و ۱۲ و ۱۴ لیتر بر ثانیه تحت شیب های صفر، 0.006 ، 0.009 ، 0.012 و 0.015 انجام پذیرفت. در دو شیب 0.009 و 0.012 برای چهار عمق مختلف آب، آزمایش ها تکرار شد. در جدول ۱ خلاصه ای از آزمایش ها انجام شده قابل مشاهده است.

جدول ۱- خلاصه مشخصات آزمایش ها.

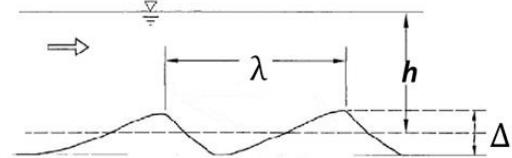
عمق m	شیب	دبی $l s^{-1}$
d_1	0.015 و 0.006	
d_2 و d_3	0.012 و 0.009	۱۴ و ۱۰
d_4 و d_5		

میلی متر قرائت گردید. به کمک یک تله ماسه که در انتهای فلوم نصب شده بود میزان رسوبات منتقل شده پس از خشک کردن، توزین شد تا دبی رسوب مشخص گردد (شکل ۳).

بر طبق تحقیقات ویلیامز (۱۹۷۰) که آزمایش هایی را برای بررسی تأثیر عرض فلوم و عمق آب بر روی نرخ انتقال رسوبات انجام داد، عرض انتخاب شده برای فلوم مناسب بوده و تأثیری بر شرایط و نتایج نخواهد داشت. وی در مطالعات خود نمودارهایی را ترسیم کرد که بر طبق آنها تأثیر عرض کانال به صورت انحراف از دبی واحد متوسط بیان می شد. بر طبق نتایج وی تنها در عرض 0.25 فوت بود که بیشترین انحراف از دبی واحد به میزان ۸ تا ۱۲ درصد مشاهده شد و در سایر حالات این مقدار بین ۰ تا ۶ درصد گزارش شده بود. عرض انتخاب شده فلوم ۵۰ سانتی متر ($1/69$ فوت) است که در محدوده مطلوب از لحاظ تأثیر ناچیز عرض خواهند بود. همچنین ویلیامز (۱۹۷۰) اشاره می کند که برای تمامی اهداف کاربردی، عرض کانال تأثیر معناداری بر روی روابط انتقال رسوب و دبی در یک عمق ثابت نخواهد داشت. در ابتدای هر آزمایش بستر رسوبی با استفاده از ابزار صاف کننده تا حد امکان صاف می گردید. آزمایش ها با سرعت نسبی $1/1$ - $\frac{V}{V_c} = 1$ انجام گرفت و تا زمانی ادامه یافت که بستر به حالت تعادل رسیده باشد. عدد رینولدز مرزی ($U_* \cdot D_{50} / \nu$) که U_* سرعت برشی بستر می باشد) در محدوده ۲۰ الی ۱۰۰ بود و بستر از نظر هیدرولیکی در حالت زبر قرار داشت.

تحلیل ابعادی

پارامترهای مورد استفاده در تحقیق حاضر به قرار شکل ۴ می باشند. همچنین نمایی از فرم بستر تشکیل شده در شکل ۵ دیده می شود.



شکل ۴- نمایی از پارامترهای مورد استفاده.

پارامترهای فوق عبارتند از: h عمق آب متوسط، Δ ارتفاع فرم بستر، λ طول فرم بستر. سایر پارامترهای مورد استفاده نیز عبارتند از: ρ چگالی آب، ρ_s چگالی ذرات رسوبی، μ ویسکوزیته دینامیک، g شتاب ثقل، K_s ضریب زبری، τ تنش برشی، U سرعت متوسط جریان، U_c سرعت برشی، S_f شیب خط انرژی، S شیب بستر کانال، R شعاع هیدرولیکی، R_b شعاع هیدرولیکی اصلاح شده که به روش ونونی و بروکس (۱۹۵۷) اصلاح گردید و D_s قطر متوسط ذرات رسوبی. مقاومت جریان (K_s) تابعی از متغیرهای زیر می باشد:

$$f(K_s, \tau, y, \Delta, \lambda, S, D_s, u, u_c, \rho, \rho_s, \mu, g) = 0 \quad [2]$$

با استفاده از روش پی باکینگهام می توان رابطه ۲ را به شکل رابطه ۳ نوشت.

$$f\left(\frac{\tau}{\rho u^2}, \frac{K_s}{y}, \frac{D_s}{y}, \frac{\lambda}{y}, \frac{\Delta}{y}, \frac{u_c}{u}, \frac{\rho_s}{\rho}, R_e, F_r, S\right) = 0 \quad [3]$$

$$\frac{K_s}{y} = f\left(\frac{\lambda}{y}, \frac{\Delta}{y}, \frac{u_c}{u}, F_r, S\right) \quad [4]$$

$$\frac{\tau}{\rho u^2} = f\left(\frac{\lambda}{y}, \frac{\Delta}{y}, \frac{\Delta}{\lambda}, \frac{u_c}{u}, F_r, S\right) \quad [5]$$

همچنین لازم به ذکر است که در آزمایش ها عدد رینولدز در محدوده 8×10^4 تا 8×10^5 قرار گرفته که محدوده متلاطم و زبر است در نتیجه زبری بستر مستقل از آن خواهد شد، بنابراین از مجموعه پارامترهای مورد مطالعه خارج شد. مشخصات رسوب از جمله قطر متوسط و چگالی ذرات رسوبی نیز ثابت بود. بر طبق نظر یانگ و همکاران (۲۰۰۵)، برای محاسبه تنش برشی کل رابطه $\tau = \tau' + \tau''$ که در آن τ' تنش برشی ناشی از ذرات و τ'' تنش برشی ناشی از فرم بستر، در مورد بسترهای فرم دار صحیح نیست و شکل صحیح این رابطه بایستی به صورت رابطه ۶ باشد.

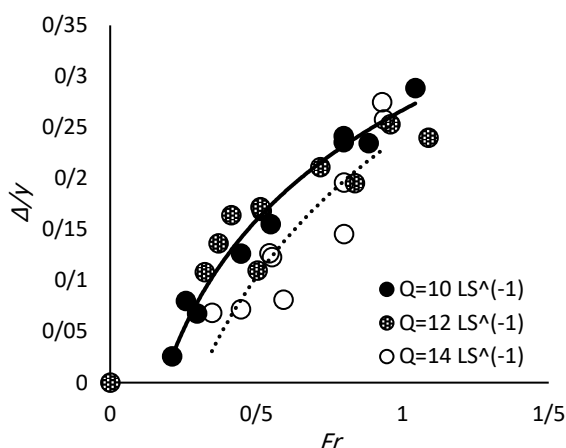
$$\tau = \tau' \frac{L'}{L} + \tau'' \frac{L''}{L} \quad [6]$$

که در آن L طول فرم بستر، L' طول مشخصه ای که جریان به صورت مستقیم با بستر در ارتباط بوده و بنابراین مقاومت ناشی از زبری ذرات را ایجاد می کند و L'' طول مشخصه منطقه جداسازی جریان است که در پشت فرم بستر قرار می گیرد. بنابراین می توان از رابطه ۷ τ' و τ'' را محاسبه کرد.

$$U_*' = \frac{U}{2.5 \ln\left(\frac{11R_b}{K_s'}\right)} = \sqrt{\frac{\tau'}{\rho}} \quad [7]$$

در این روابط U_*' سرعت برشی ذرات K_s'' زبری ناشی از فرم بستر و K_s' زبری ناشی از ذرات است. مطالعات پیشین در زمینه K_s' بسیار گسترده بوده است. ون راین (۱۹۸۴) مقدار $2D_{90}$ ، پارکر و پترسون (۱۹۸۰) مقدار $2D_{90}$ ، هی (۱۹۸۹) مقدار $3/5D_{84}$ ، وایتینگ و دتریچ (۱۹۹۰) مقدار $3/5D_{84}$ ، گریفیت (۱۹۸۹) و میلار (۱۹۹۹) مقدار D_{50} ، انگوند و هانسن (۱۹۶۷) مقدار $2/5D_{50}$ ، انیشتین و بارباروسا (۱۹۵۲) و وانگ و وایت (۱۹۳۳) مقدار D_{65} و یانگ و لیم (۲۰۰۳) مقدار $2D_{50}$ را ارائه نمودند. بر طبق نتایج یانگ و همکاران (۲۰۰۵)، بهترین تخمین مقدار $2D_{50}$ خواهد بود که در

افزایش یافته باشد تا عدد فرود ثابت بماند. در نتیجه پارامتر $\frac{\Delta}{y}$ کاهش می‌یابد که این امر از بررسی نمودارهای مربوط به افزایش دبی هم قابل استخراج است.

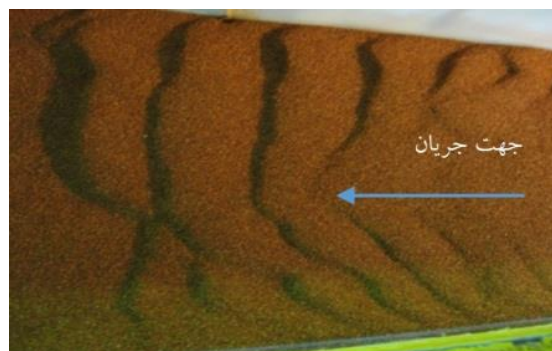


شکل ۶- تغییرات ارتفاع فرم بستر بی بعد برداشت شده برحسب عدد فرود.

توپوگرافی بستر رسوبی

به منظور مقایسه بهتر شرایط توپوگرافی منتج شده در هر آزمایش، توپوگرافی محور مرکزی بستر در آزمایش‌های مختلف برداشت می‌شد و در نزدیکی فرم‌های بستر با دقت بیشتری انجام می‌گرفت (شکل ۷). در دبی ثابت با افزایش شیب، به علت افزایش سرعت، توپوگرافی بستر رسوبی نسبت به شیب‌های کمتر، برخاسته‌تر و دارای تغییرات محسوس‌تری است. به بیان دیگر می‌توان گفت ارتفاع فرم بستر نیز افزایش می‌یافت. در سه دبی مورد آزمایش به صورت جداگانه توپوگرافی بستر در شیب‌های مختلف روی هم انداخته شد تا بتوان اثر شیب را بیشتر مشاهده کرد. دو نکته مهمی که از بررسی این نمودارها قابل برداشت است این است که با افزایش شیب در مقطع ابتدایی بستر رسوبی (طولی در حدود ۵۰ سانتی‌متر اولیه) شدت برخورد آب با بستر رسوبی بیشتر بوده و طبیعتاً از رسوبات این ناحیه بیشتر شسته شده‌است. به بیان دیگر آبشستگی این ناحیه با افزایش شیب شدت یافته است. نکته دوم اینکه در

تحقیق حاضر از این مقدار استفاده شد. همچنین براساس تحلیلی که ون راین (۱۹۸۴) انجام داد برای رژیم بالا و پایین جریان رابطه $K_s'' = 1.1\Delta(1 - e^{-25\frac{\Delta}{\lambda}})$ بهترین رابطه برای تعیین مقدار زبری ناشی از فرم بستر خواهد بود.



شکل ۵- نمایی از فرم بستر تشکیل شده.

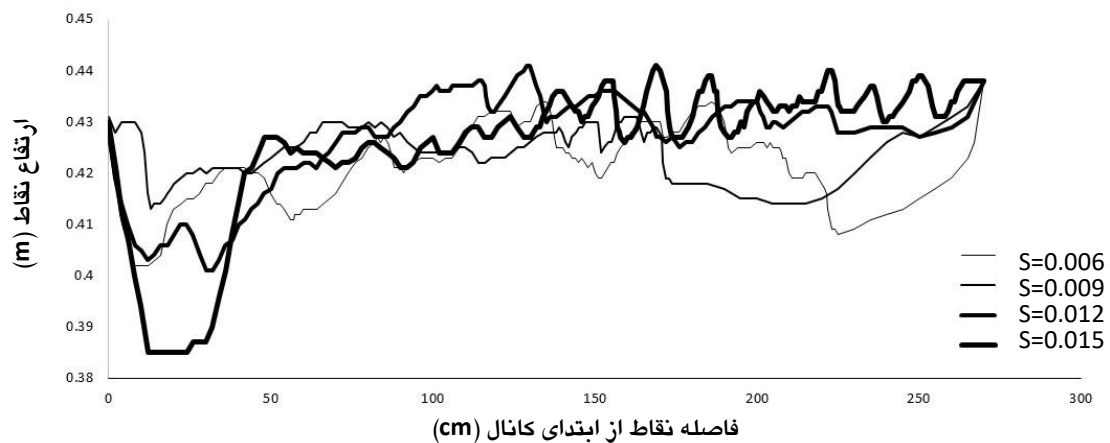
نتایج و بحث

ارتفاع فرم بستر

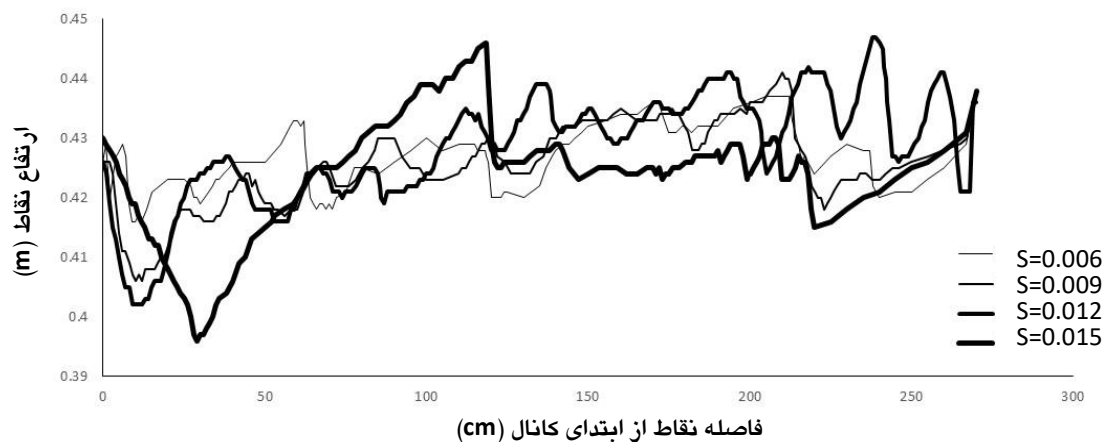
تغییرات ارتفاع ریپل‌ها نسبت به سرعت جریان در شکل ۶ نشان داده شده‌است. با توجه به شکل ۶ با افزایش عدد فرود جریان مشاهده می‌شود که ارتفاع ریپل‌های تشکیل شده بر روی بستر نیز افزایش یافته‌است. در هر حال با افزایش عدد فرود سیال مشاهده شد که ارتفاع ریپل‌ها زیاد می‌شود اما نکته قابل تأمل آن است که این افزایش تا حد خاصی اتفاق می‌افتد بدین معنا که با افزایش دبی بیشتر از ۱۴ لیتر بر ثانیه و یا افزایش شیب بستر بیش از ۰/۰۱۵ سرعت جریان به حدی می‌رسد که بستر را می‌شوید. به عنوان یک فرآیند طبیعی، فرم‌های بستری که در سرعت‌های کم تولید شده‌اند در سرعت‌های بالا شسته می‌شوند. مشخص نیست که ناپدید شدن این فرم‌های بستر به علت کاهش ارتفاع یا افزایش طول آنها بوده یا اینکه هر دو مورد با هم اتفاق می‌افتد. یعنی تحت این شرایط ریپل‌ها در بستر صاف می‌شوند. در یک عدد فرود ثابت، چنانچه بخواهیم تأثیر افزایش دبی را بررسی کنیم، با افزایش دبی بایستی سرعت و عمق آب، به صورت توأم

لازم به ذکر است که در رابطه با دبی ۱۲ لیتر بر ثانیه، در مورد شیب ۰/۰۱۵ بنظر می‌رسد جریان آب به خوبی بر روی بستر رسوبی کنترل نشده‌است و در بازه‌ای که انتظار می‌رود ریپل‌ها تشکیل شده باشند، بستر شسته شده‌است. با توجه به شرایط بستر رسوبی و جریان آب، کنترل و حفظ فرم بستر در شیب ۰/۰۱۵ با دشواری‌هایی مواجه بود و چنانچه به موقع اقدام به بالا آوردن سطح آب در کانال و یا بستن شیر فلکه نمی‌شد متأسفانه بستر شسته شده و توپوگرافی بستر به درستی برداشت نمی‌شد.

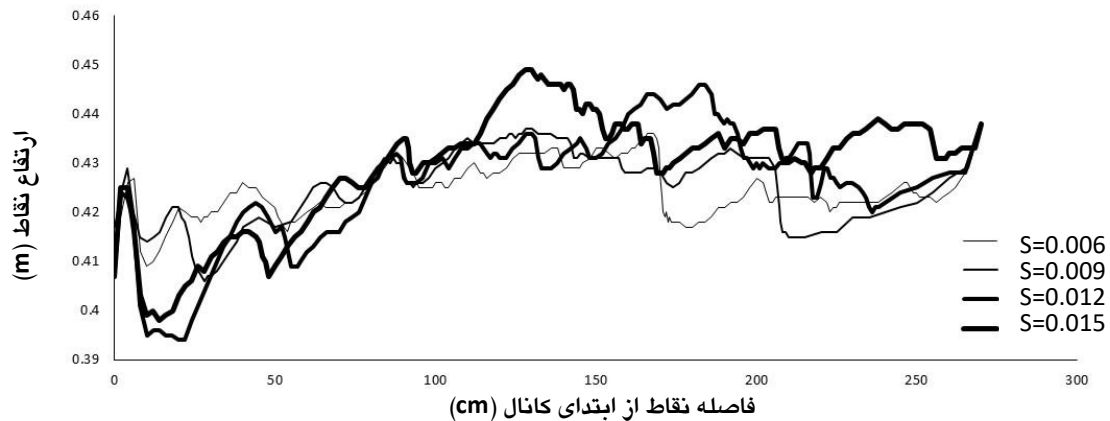
شیب‌های بالاتر، آبشستگی که در ابتدا رخ داده بود، اگرچه رسوبات از بالادست کانال به صورت یکسان تزریق می‌شد، اما باز هم مشاهده می‌شود که رسوبات شسته شده، در شیب‌های بالاتر توانسته است که در بخش‌های انتهایی کانال ریپل‌های بیشتری تولید بنماید. با دقت در این نمودارها می‌توان مشاهده کرد که در شیب‌های کمتر فراوانی تعداد ریپل‌ها در میانه کانال بیشتر است اما با افزایش شیب، بازه ۷۰ سانتی‌متری انتهایی کانال دارای ریپل‌های بیشتری است. به عبارت دیگر می‌توان گفت با افزایش شیب، جریان قادر بوده است که حرکت ریپل‌ها را به سمت پایین دست افزایش دهد.



شکل ۷-الف- توپوگرافی بستر رسوبی در دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه.



شکل ۷-ب- توپوگرافی بستر رسوبی در دبی ۱۲ لیتر بر ثانیه.

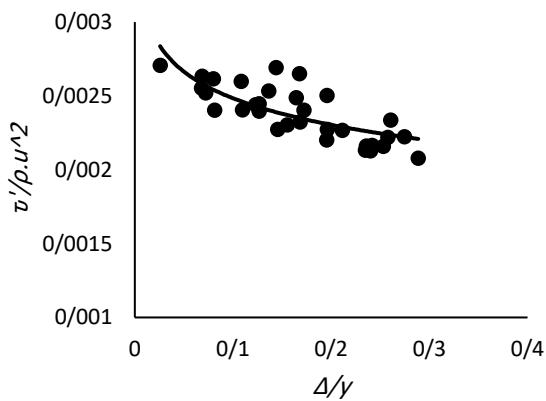


شکل ۷-ج- توپوگرافی بستر رسوبی در دبی ۱۴ لیتر بر ثانیه.

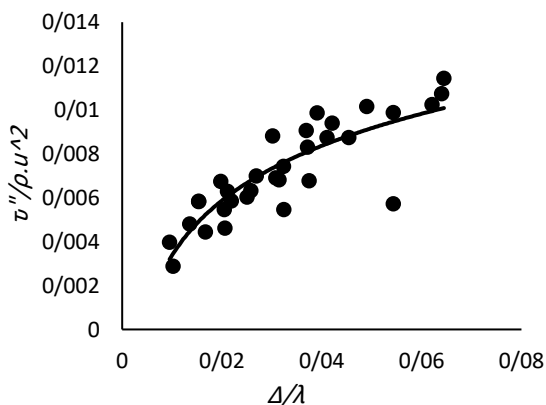
تنش برشی

مقادیر تنش برشی محاسبه شده با حضور ریپل‌ها در شکل ۸- الف و ۸- ب نشان داده شده‌است. نمودار ۸- الف مربوط به تنش برشی ناشی از زبری ذرات و ۸- ب تنش برشی ناشی از فرم بستر است. این نمودارها براساس روابط ۶ محاسبه و ترسیم شده‌اند. با توجه به اینکه از یک نوع رسوب در آزمایش‌ها استفاده شد، طبیعتاً نمودار مربوط به تنش برشی ناشی از زبری ذرات تقریباً ثابت بوده که در شکل ۸- الف دیده می‌شود. همچنین بر اساس رابطه ۶ با افزایش پارامتر $\frac{\Delta}{\lambda}$ ، مقدار پارامتر بی بعد $\frac{\tau''}{\rho u^2}$ افزایش پیدا کرد.

علت افزایش تنش ناشی از فرم بستر با افزایش شیب فرم بستر را می‌توان چنین قلمداد کرد که با افزایش ارتفاع فرم بستر تلاطم و گردابه‌های ناشی از جریان پس از تاج فرم بستر افزایش یافته و جریان با مقاومت بیشتری مواجه می‌شود. بنابراین تنش برشی نیز سیر صعودی دارد. برای بررسی بهتر ارتباط بین تنش برشی τ'' و ارتفاع فرم بستر Δ نموداری براساس این دو پارامتر در شکل ۹ رسم شد.

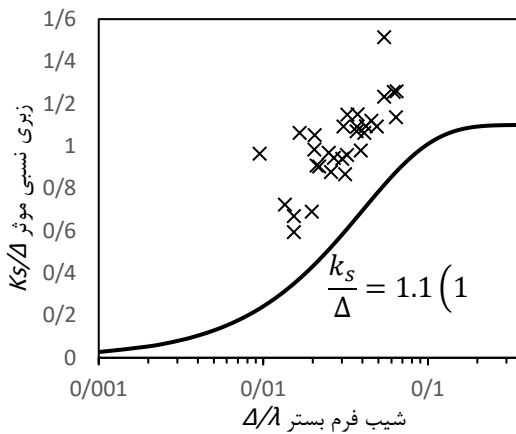


شکل ۸-الف- تغییرات تنش برشی بی بعد مربوط به زبری ذرات نسبت به ارتفاع فرم بستر بی بعد.



شکل ۸-ب- تغییرات تنش برشی بی بعد مربوط به ارتفاع فرم بستر نسبت به ارتفاع فرم بستر بی بعد.

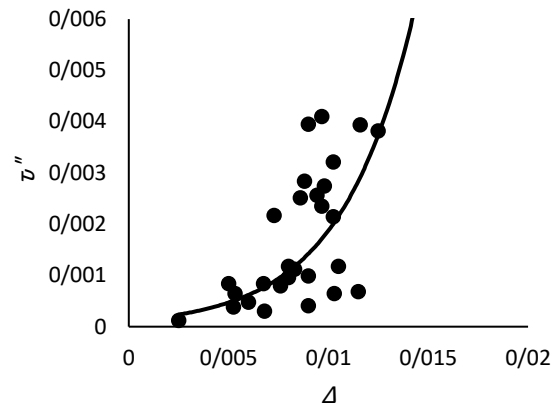
آزمایش از حجم رسوب ورودی به کانال کمتر بوده و دبی رسوبی طبیعتاً مقداری منفی به دست می‌آید. اما چنانچه حجم رسوبات خروجی (رسوباتی که در تله ماسه جمع شده‌اند) از حجم رسوب وارده به کانال بیشتر باشد مقادیر مثبتی برای دبی رسوبی حاصل شده‌است. در تفسیر نتایج این نمودار، نتیجه تمامی آزمایش‌ها با شیب ملایمی صعودی بوده و همواره میزان رسوبات ورودی به کانال از میزان رسوبات خروجی بیشتر است.



شکل ۱۱- زبری معادل فرم بستر.

زبری معادل فرم بستر

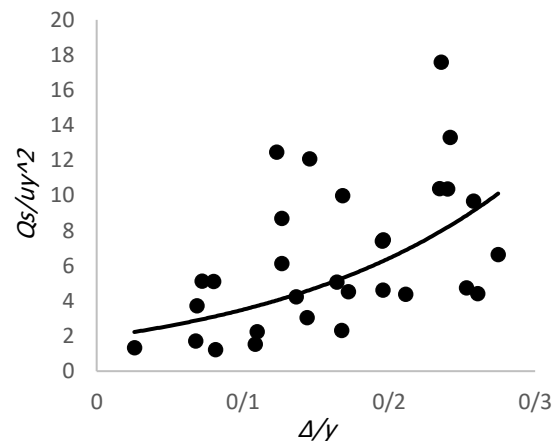
به منظور مقایسه نتایج حاضر با مطالعه ون راین (۱۹۸۴) نمودار مربوط به داده‌های زبری نسبی مؤثر بستر رسوبی بر حسب شیب فرم بستر رسم گردید که در شکل ۱۱ نمایش داده شده‌است. خط ممند مربوط به زبری ناشی از فرم بستر به تنهایی بوده که براساس نتایج مطالعات ون راین رابطه $\frac{K_s}{\Delta} = 1.1(1 - e^{-25\frac{\Delta}{\lambda}})$ را خواهد داشت. اما زبری مؤثر بایستی با احتساب زبری ذرات در نظر گرفته شود که در این حالت محور قائم زبری مؤثر را نشان داده که با تقسیم آن بر ارتفاع فرم بستر زبری نسبی مؤثر به دست می‌آید. در شکل مذکور، داده‌های مربوط به تحقیق حاضر نشان داده شده‌است. طبق این نمودار روند زبری نسبی مؤثر مطابق با نتایج ون راین دیده می‌شود یعنی با افزایش شیب فرم بستر زبری نسبی مؤثر نیز افزایش یافته‌است.



شکل ۹- تغییرات تنش برشی مربوط به ارتفاع فرم بستر نسبت به ارتفاع فرم بستر.

تغییرات دبی رسوبی

به منظور بررسی تأثیر ارتفاع فرم بستر بر روی دبی رسوبی بایستی روند تغییرات پارامتر بی بعد $\frac{Q_s}{uy^2}$ را نسبت به پارامتر $\frac{\Delta}{y}$ بدانیم. شکل ۱۰ با این هدف رسم شده‌است.



شکل ۱۰- تغییرات دبی رسوبی بی بعد نسبت به ارتفاع فرم بستر بی بعد.

همچنان که مشاهده می‌شود روند کلی این نمودار به صورت صعودی بوده بدین معنا که با افزایش ارتفاع فرم بستر $(\frac{\Delta}{y})$ پارامتر بی بعد $\frac{Q_s}{uy^2}$ نیز افزایش یافته‌است. در حقیقت می‌توان گفت هر چقدر که ارتفاع ریپل‌ها بیشتر شده‌است میزان دبی رسوبی نیز افزایش داشته‌است. مقادیر منفی پارامتر $\frac{Q_s}{uy^2}$ متعلق به زمانی است که حجم رسوب خروجی از مقطع

منابع مورد استفاده

- Bennett SJ and Bridge JS, 1995. The geometry and dynamics of low-relief bedforms in heterogeneous sediment in a laboratory channel, and their relationship to water flow and sediment transport. *J Sed Res A65*: 29–39.
- Biamonte G and Ferro V, 1997. The influence of roughness geometry and shields parameter on flow resistance in gravel-bed channels. *Ea. Surf. Proc. and land*. 22: 759-772.
- Coleman SE and Melville BW, 1994. Bed-form development. *J Hydraul Eng* 120: 544-560.
- Colosimo C, Copertino VA and Veltri M, 1988. Friction factor evaluation in gravel-bed rivers. *J Hydraul Eng ASCE* 114(8): 861-876.
- Einstein HA and Barbarossa NL, 1952. River channel roughness. *Trans Am Soc Civ Eng* 117: 1121–1146.
- Engelund F and Hansen E, 1967. A Monograph on Sediment Transport in Aalluvial Streams. Report. Tech Univ of Denmark Copenhagen.
- Graf WH and Suszka L, 1987. Sediment transport in steep channels. *J Hydrosoci Hydr Eng* 5(1): 11-26.
- Griffiths GA, 1989. Form resistance in gravel channels with mobile beds. *J Hydraul Eng* 115(3): 340– 355.
- Hey RD, 1989. Bar form resistance in gravel-bed rivers. *J Hydraul Eng* 114(12): 1498– 1508.
- Karim F, 1999. Bed-form geometry in sand-bed flows. *J Hydraul Eng ASCE* 125(12): 1253-1261.
- Lajeunesse E, Malverti L and Charu F, 2010. Bed load transport in turbulent flow at the grain scale Experiments and modeling. *Jou Geophys Res* 115: 139-153.
- Millar RG, 1999. Grain and form resistance in gravel-bed rivers. *J Hydraul Res* 37(3): 303– 312.
- Omid M, Karbasi M and Farhoudi J, 2010. Effect of bed-load movement on flow resistance over bedforms. *Ind Acad Sci* 35(6): 681-691.
- Parker G and Peterson AW, 1980. Bar resistance of gravel bed rivers. *J Hydraul Div ASCE* 106(10): 1559–1575.
- Recking A, Fry P, Paquier A, Belleudy P and Champagne JY, 2008. Bed-load transport flume experiments on steep slopes. *J Hydraul Eng ASCE* 134(9): 1302-1310.
- Simons DB and Richardson EV, 1965. Resistance to flow in alluvial channels. *Geo survey Prof paper* 422-J.
- Southardj B and Boxjchwall A, 1973. Flume experiments on the transition from ripples to lower flat bed with increasing sand size. *J sedim PetroL* 43.
- Vanoni VA and Brooks NH, 1957. Laboratory Studies of the Roughness and Suspended Load of Alluvial Streams. *Sed Lab Cali Ins of Tech*.
- VanRijn LC, 1984a. Sediment transport, Part1: Bed-load transport. *J Hydraul Eng ASCE* 110(10): 1431-1456.
- Van Rijn LC, 1984c. Sediment transport, Part 3: Bedforms and alluvial roughness. *J Hydraul Eng ASCE* 110(12): 1733-1754.
- Van Rijn LC, Nieuwjaar M, Van Der Kaaij T, Nap E and Van Kampen A, 1993. Transport of fine sands by currents and waves. *J of Waterway Port Coastal Ocean Eng* 119(2): 123-143.
- Van Rijn LC, 2007. Unified view of sediment transport by currents and waves: Initiation of motion, bed roughness and bed-load transport. *J Hydraul Eng ASCE* 133(6): 649-667.
- Venditti JG, Church MA and Bennett SJ, 2005. Bedform initiation from a flat sand bed. *J Geophys Res* 110: 215-232.
- Wang S and White WR, 1993. Alluvial resistance in transition regime. *J Hydraul Eng ASCE* 119(6): 725–741.
- Whiting PJ and Dietrich WE, 1990. Boundary shear stress and roughness over mobile alluvial beds. *J Hydraul Eng ASCE* 116(12): 1495–1511.
- Williams PG, 1970. Flume width and water depth effects in sediment-transport experiments. *USGS Profe paper* 562-H.
- Wu WM and Wang SSY, 1999. Movable bed roughness in alluvial rivers. *Jou Hydraul Eng ASCE* 125(12): 1309-1312.
- Yalin MS, 1972. *Mechanics of sediment transport*. Pergamon Press New York.
- Yang S, Tan S and Lim S, 2005. Flow resistance and bedform geometry in a wide alluvial channel. *J Water Res Resistance* 41: 87-101.
- Yang SQ and Lim SY, 2003. Total load transport formula for flow in alluvial channels. *J Hydraul Eng ASCE* 129(1): 68–72.