

ارزیابی ضریب زبری در تبدیل‌های تنگ‌شونده تحت شرایط هیدرولیکی مختلف

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

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۱/۱۹ تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۲/۰۲

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

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

چکیده

در آبراهه‌های آبرفتی، ضریب زبری یکی از پارامترهای مهم در مطالعه ویژگی‌های جریان‌های رسوبی در رودخانه‌ها می‌باشد. این ضریب بستگی مستقیم به ارتفاع فرم بستر ناشی از شرایط هیدرولیکی جریان دارد. در تحقیق حاضر به منظور بررسی اثر تبدیل‌های تنگ‌شونده بر روی زبری بستر، از سه نوع تبدیل با زاویه‌های جریان ورودی نسبت به دیواره کانال به اندازه ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه استفاده شد. در هر نوع تبدیل پس از انجام آزمایش و با پایین رفتن تدریجی سطح آب پروفیل بستر رسوبی برداشت شد و ارتفاع فرم بستر به دست آمد. نتایج به دست آمده نشان داد که کاهش عرض کانال به کمک تبدیل‌ها اثر قابل ملاحظه‌ای اولاً بر روی ارتفاع فرم بستر ریپل و ثانیاً بر روی ضریب زبری جریان داشت. همچنین عدد فرود در تمامی آزمایش‌ها در محدوده ۰/۲-۱/۰۵ قرار داشت. نتایج نشان داد با افزایش زاویه قسمت ورودی تبدیل از ۵ درجه تا ۱۵ درجه و اساساً با قرارگیری تبدیل در فلوم نسبت به حالت بدون تبدیل، در دبی 10 L s^{-1} ضریب زبری در حدود ۱۷/۵٪ کاهش و در دبی 14 L s^{-1} ضریب زبری در حدود ۱۱٪ افزایش نشان داد.

واژه‌های کلیدی: ارتفاع ریپل، بسترهای آبرفتی، کاهش عرض جریان، ضریب زبری، مقاومت

Evaluation of Roughness Coefficient in Convergence Transition under Various Hydraulic Conditions

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

Received: 7 April 2016

Accepted: 22 April 2017

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:

In alluvial streams, roughness coefficient (RC) is one of the essential parameters which should be considered in study of sediment flows in rivers. The height of bedforms directly affects RC based on flow hydraulic conditions. In this research some experiments were done to evaluate the effects of convergence transition on the roughness coefficient. Three kind of transitions with different angles of inflow direction to the flume wall were used (5, 10 and 15 degrees). In each transition after the completion of the test and slow draw down of the water level, the sediment profile of the bed was recorded and the bedform height was determined. The results showed that the channel width reduction in transitions had a significant effect firstly on the ripple bedform height and secondly on the RC of the flow. The Froud number in the all of experiments was in the range of 0.2-1.05. With increase of the transition angle from 5 to 15 degrees, at the discharge of 10 L S⁻¹, the RC was reduced about 17.5 percent and in the discharge of 14 L S⁻¹ it was increased about 11 percent.

Keywords: Alluvial beds, Flow width reduction, Resistance, Ripple height, Roughness coefficient.

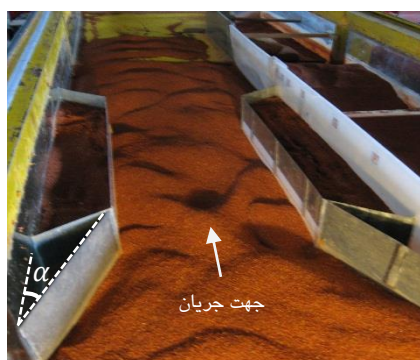
مقدمه

زبری ناشی از بارمعلق و (۴) زبری ناشی از بار بستر. در این تحقیق بار معلق وجود ندارد و هدف مطالعه زبری ناشی از ذرات به همراه فرم بستر تشکیل شده در حضور تبدیل‌های کاهش‌دهنده عرض کانال است. کاهش عرض کانال در مقطعی از آن باعث تغییر شرایط هیدرولیکی جریان شده و مستقیماً بر روی نحوه شکل‌گیری فرم بستر و خصوصیات هندسی آن اثر می‌گذارد. بنابراین بررسی اثر شرایط هیدرولیکی مختلف در تشکیل فرم بستر با وجود این تبدیل‌ها می‌تواند به نتایج مفیدی در این زمینه منجر شود. در زمینه انتقال رسوب گراف و سوزکا (۱۹۸۷)، یالین (۱۹۷۲) برای رژیم رودخانه، ون راین و همکاران (۱۹۹۳) و ون راین (a و b ۱۹۸۴ و ۲۰۰۷)

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)

برای رژیم ساحلی مطالعه نمودند. 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. کریم (۱۹۹۹) در مطالعه خود به بررسی و پیش بینی ارتفاع نسبی ($\frac{h}{d}$) (ارتفاع فرم بستر و d عمق جریان) فرم بسترهای مختلف پرداخت. وی براساس افت انرژی که بر اثر نیروی درگ ناشی از فرم بستر ایجاد می شود و با توجه به افت کلی بار آبی به پیش بینی ارتفاع نسبی فرم بستر پرداخت. امید و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی تأثیر حرکت بار بستر بر روی مقاومت جریان با داشتن دونه های مصنوعی پرداختند. آزمایش ها در دو حالت جریان آب زلال و همراه با رسوبات با اعماق و سرعت های مختلف جریان انجام شد. نتایج آنها نشان داد که انتقال ذرات رسوبی نرم در بستر صاف تا ۲۲ درصد و در بستر زبر تا ۲۴ درصد ضریب مقاومت جریان را کاهش می دهد. چگینی و پندر (۲۰۱۲) به بررسی آزمایشگاهی شرایط جریان یکنواخت بر روی حرکت رسوبات مختلف ریزدانه و فرم های تشکیل شده آن پرداختند. شیب جریان در سه حالت کم، متوسط و تند قرارداداشت و آشفتگی نزدیک بستر بر روی انتقال رسوبات و تشکیل فرم های بستر بررسی گردید. نتایج آنها حاکی از آن بود که بار بستر و فرم های تشکیل شده مرتبط با آن با افزایش مقدار شیب بستر جریان و نسبت عمق آب به اندازه ذرات تغییر می کنند. اسماعیلی و همکاران (۱۳۸۸) به بررسی تأثیر فرم بستر بر روی ضریب زبری به کمک تلفیق روش عددی و آزمایشگاهی در جریان های غیرماندگار پرداختند. آنها مجموعه ای از آزمایش ها برای بررسی اثر تغییر فرم بستر در آبراهه های آبرفتی بر میزان رسوب کف انتقالی در یک کانال آزمایشگاهی با قابلیت شیب پذیری و تحت شرایط جریان غیرماندگار انجام دادند. سیمونس و ریچاردسون (۱۹۶۵) به منظور محاسبه میزان رسوبات انتقالی در جریان همراه با فرم سرعت حرکت فرم بستر در جهت جریان و ارتفاع متوسط فرم بستر را به کمک پروب هایی

اندازه گیری و قرائت کردند. کولمن و ملویل (۱۹۹۴) در آزمایش های خود پروفیل بستر را در بازه های زمانی مشخص اندازه گیری کردند تا تغییرات بستر را بر اثر جریان آب تشخیص دهند. براساس نتایج آنها سرعت انتشار فرم بستر با افزایش ارتفاع فرم بستر کاهش می یابد. وو و وانگ (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 کردند. 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 مطالعه ای 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 به صورت پراکنده هستند اما دسته دوم که به حرکات های فوری موسومند شامل حرکت توده های رسوبات بوده که در سطوح بالاتر جریان اتفاق افتاده و حجم بیشتری از رسوبات را انتقال می دهند. لاجونس و همکاران (۲۰۱۰) به کمک سیستم تصویربرداری با سرعت بالا توانستند حرکت ذرات رسوبی را با دقت بالا دیده و دوره های حرکتی آنها را شامل پرواز ذرات، افزایش سرعت و در نهایت دوره استراحت آنها را تعیین و مشاهده نمودند. کشاورزی و همکاران (۲۰۱۲) به کمک تحلیل تصاویر به بررسی مکانیزم حرکت ذرات در رپیل پرداختند و زانگ (۱۹۹۹) به کمک همین تکنیک به بررسی ابعاد و ویژگی های تشکیل دهنده ها پرداخت. کانل و همکاران (۲۰۰۶) به بررسی ابعاد فرم بسترها در حالت ترکیب رسوبات شن و ماسه پرداختند. بر طبق تحقیقات ویلیامز (۱۹۷۰) که آزمایش هایی را برای بررسی تأثیر عرض 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. بر طبق نتایج وی تنها در عرض ۰/۲۵ فوت بود که بیشترین انحراف از دبی واحد به میزان ۸ تا ۱۲ درصد مشاهده شد و در سایر حالت ها این مقدار بین ۰ تا ۶ درصد گزارش شده بود. عرض



شکل ۱- نمایی از فلوم مورد استفاده به همراه تبدیل تنگ‌شونده.



شکل ۲- تله ماسه نصب‌شده در انتهای فلوم.

دبی رسوبی کانال بر اساس میزان رسوباتی که در تله ماسه جمع شده بود به دست آمد. به این صورت که در هر آزمایش تزریق رسوبات بر اساس مقدار ماسه‌ای که در تله ماسه جمع می‌شود انجام می‌شد. تزریق میزان رسوبات از نتایج آزمایش‌های پیشین منتج شد. از این رو می‌توان بیان کرد که دبی بار بستر تقریباً برابر با دبی تزریق شده خواهد بود. ضخامت بستر رسوبی ۱۵ سانتی‌متر بود. این ضخامت بر مبنای بیشینه میزان آبشستگی که در آزمایش‌های مقدماتی مشاهده شده بود تعیین گردید. به کمک روش ونونی و بروکس (۱۹۵۷) اثر دیواره‌ها بر روی شعاع هیدرولیکی کاهش یافت و از شعاع هیدرولیکی اصلاح شده استفاده شد. در ابتدای هر آزمایش بستر رسوبی با استفاده از ابزار صاف‌کننده تا حد امکان صاف می‌گردید. آزمایش‌ها 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 برشی $U_* D_{50}/\nu$ که U_* سرعت برشی بستر می‌باشد) در

انتخاب‌شده فلوم معادل با $1/69$ فوت است که در محدوده مطلوب از لحاظ تأثیر ناچیز عرض خواهند بود. همچنین این نکته در مورد عرض کاهش یافته که به مقدار 0.98 رسیده نیز صدق می‌کند.

هدف از انجام این تحقیق بررسی تأثیر ارتفاع فرم بستر ریپل و همچنین تبدیل‌های تنگ‌شونده بر روی ضریب زبری جریان بوده تا مشخص گردد که پارامترهای هیدرولیکی جریان چگونه در زوایای مختلف تبدیل‌ها و تحت شرایط هیدرولیکی مختلف می‌توانند زبری را تغییر دهند.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های تحقیق حاضر در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز انجام شد. فلوم مورد استفاده دارای طول $6m$ ، ارتفاع $50cm$ و عرض $80cm$ می‌باشد که به منظور تسهیل در انجام آزمایش عرض آن به $50cm$ کاهش یافت (شکل ۱). همچنین در شکل ۱ زاویه α (زاویه بخش ورودی تبدیل با دیواره کانال) قابل مشاهده است. تبدیل‌ها به کمک ورق‌های گالوانیزه ساخته شدند. ذرات رسوبی با مشخصات $D_{50} = 0.86 mm$ و $G_s = 2.3$ مورد استفاده قرار گرفت. جریان رسوب به صورت بستر زنده بوده و از بالادست جریان، همراه با جریان آب به صورت منظم رسوب نیز به داخل فلوم تزریق گردید. نرخ تزریق رسوبات به داخل کانال براساس آزمایش‌های متعددی که در مراحل اولیه انجام شده بود، مطابق با نرخ برداشت رسوبات از تله ماسه در نظر گرفته شد. سطح آب به کمک اشل‌هایی که در دیواره شیشه‌ای فلوم نصب شده بود قرائت گردید. به کمک یک تله ماسه که در انتهای فلوم نصب شده بود میزان رسوب منتقل‌شده پس از خشک کردن، توزین شد تا دبی رسوب مشخص گردد (شکل ۲).

با استفاده از روش پی باکینگهام می‌توان رابطه ۱ را به شکل رابطه ۲ ساده کرد.

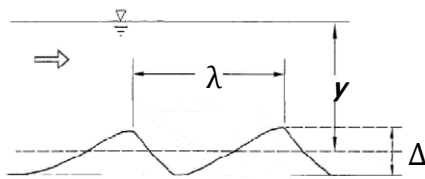
$$f\left(\frac{K_s}{y}, \frac{D_s}{y}, \frac{\lambda}{y}, \frac{\Delta}{y}, \frac{\rho_s}{\rho}, \alpha, R_e, F_r\right) = 0 \quad [2]$$

$$\frac{K_s}{y} = f\left(\frac{\Delta}{y}, F_r, \alpha\right) \quad [3]$$

جدول ۱- خلاصه مشخصات آزمایش‌ها.

دبی ($L s^{-1}$)	شیب	عمق (m)
۱۰ و ۱۲ و ۱۴	صفر،	$d_1 = 5 - 7$
	۰/۰۰۶	
	۰/۰۱۵	
	۰/۰۰۹	$d_3 = 6$ و $d_2 = 4.5$
	۰/۰۱۲	$d_5 = 8.5$ و $d_4 = 7$
زاویه تبدیل (degree)	T1	T2
	۵	۱۰
	T3	
	۱۵	

پارامترهای مورد استفاده به‌قرار شکل ۳ می‌باشند.



شکل ۳- نمایی از پارامترهای مورد استفاده.

همچنین لازم به ذکر است که در آزمایش‌ها عدد رینولدز در محدوده 10^4 تا 8×10^5 قرار گرفته که محدوده متلاطم و زبر است در نتیجه زبری نسبی مستقل از آن خواهد شد، بنابراین از مجموعه پارامترهای مورد مطالعه خارج شد. مشخصات رسوبات از جمله قطر متوسط و چگالی ذرات رسوبی نیز ثابت بود. در شکل ۴ نمایی از فرم بسترهای تشکیل‌شده با وجود تبدیل‌ها آورده شده است.

محدوده ۲۰ الی ۱۰۰ بود و بستر از نظر هیدرولیکی در حالت زبر قرار داشت. لازم به‌ذکر است که حرکت رسوبات فقط به‌صورت بار بستر بوده و هیچ‌گونه بار معلقی وجود نداشت.

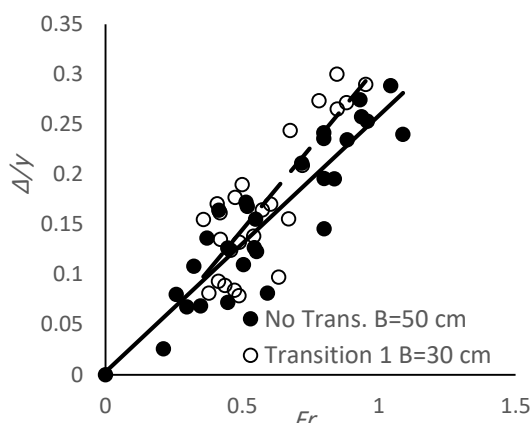
دبی در طول آزمایش ثابت بوده و آزمایش‌ها در شرایط ماندگار صورت گرفت. مدت زمان آزمایش‌ها یا حالت تعادل به‌گونه‌ای انتخاب گردید که هم تغییرات توپوگرافی در محدوده کانال به‌تعادل نسبی برسد و هم ارتفاع فرم بستر به بیشینه مقدار خود رسیده باشد. در حقیقت معیار تعادل به این صورت بود که تغییرات ارتفاع فرم بستر ناچیز بوده و فرم بستر دیگر تمایلی به افزایش ارتفاع نداشته و فقط حرکت‌های رو به جلو دیده می‌شد. در این مقطع زمانی، زمان آزمایش‌ها ثبت می‌شد.

پس از انجام هر آزمایش و با پایین رفتن سطح آب پروفیل بستر به‌کمک مترلیزری مدل Leica DISTO D2 اندازه‌گیری شد. این متر دارای دقت ± 0.25 میلی‌متر در هر متر بود. این دستگاه قابلیت اندازه‌گیری در دو جهت طولی و عرضی کانال را داشت. اندازه ذرات در حدود ۳۵ برابر دقت مترلیزری است. آزمایش‌ها در سه دبی ۱۰ و ۱۲ و $14 L s^{-1}$ تحت شیب‌های صفر، ۰/۰۰۶، ۰/۰۰۹، ۰/۰۱۲ و ۰/۰۱۵ انجام پذیرفت. در دو شیب ۰/۰۰۹ و ۰/۰۱۲ برای چهار عمق مختلف آب، آزمایش‌ها تکرار شد. در جدول ۱ خلاصه‌ای از آزمایش‌های انجام شده قابل مشاهده است.

تحلیل ابعادی

پارامترهای فوق عبارتند از: y متوسط عمق آب، Δ ارتفاع فرم بستر ریپل، λ طول فرم بستر ریپل و K_s ضریب زبری. سایر پارامترهای مورد استفاده نیز عبارتند از: α زاویه تنگ‌شدگی تبدیل، ρ چگالی آب، ρ_s چگالی ذرات رسوبی، μ ویسکوزیته دینامیک، g شتاب ثقل، U سرعت متوسط جریان و D_s قطر متوسط ذرات رسوبی. اگر زبری تابعی از متغیرهای زیر باشد:

$$f(K_s, y, \Delta, \lambda, D_s, \alpha, u, \rho, \rho_s, \mu, g) = 0 \quad [1]$$



شکل ۵- مقایسه ارتفاع بی بعد فرم بستر در دو حالت با تبدیل و بدون تبدیل.

مقایسه تبدیل‌ها

اصولاً تبدیل‌هایی که باعث کاهش عرض کانال می‌شوند، در دبی‌های کم دیواره‌های ابتدایی آنها برای حرکت رسوبات همانند یک مانع یا آبشکن عمل کرده و بخشی از شدت جریان آب را به خود جذب می‌کنند. این امر سبب می‌شود که در حالت بدون تبدیل جریان آزادی بیشتری برای ایجاد فرم بستر ریپل داشته و ارتفاع فرم بستر بالاتر برود. طبیعی است که اگر این کاهش عرض با شیب تندتری انجام شود اثر ممانعت آن بر روی جریان آب بیشتر خواهد بود. در دبی 10 L s^{-1} شدت جریان به اندازه‌ای نیست که بتواند بر روی اثر ممانعت تبدیل فائق آید و دیواره‌ها بخشی از قدرت جریان را گرفته و ارتفاع فرم بستر نسبت به حالت بدون تبدیل کاهش می‌یابد. دبی 12 L s^{-1} قدرت بیشتری داشته و ریپل‌هایی با ارتفاع بیشتری تولید کرده‌است. در نهایت در دبی 14 L s^{-1} شدت جریان بیشتر شده و جریان با وجود تبدیل‌های کاهش دهنده عرض ارتفاع فرم بستر بیشتری ایجاد کرده‌است. در این تحقیق، رابطه ارائه شده توسط ون راین مورد بررسی قرار گرفت و به کمک آن مقادیر ضریب زبری به دست آمد. ون راین (۱۹۸۴b) در مطالعات خود بیان کرد که زبری هیدرولیکی که ناشی از سطح بستر متحرک است به وسیله زبری ذرات $k_{s,grain}$ و زبری فرم بستر $k_{s,form}$ ایجاد می‌شود. ون راین در مطالعات خود نشان داد که زبری مؤثر معادل با ذرات



شکل ۴- نمایی از فرم بستر ریپل تشکیل شده با وجود تبدیل با زاویه ۵ درجه

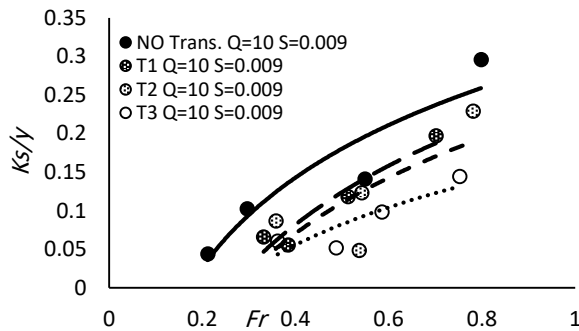
به منظور مقایسه اثر وجود تبدیل‌ها با حالتی که تبدیلی در کانال نیست، حالت بدون تبدیل نیز به عنوان حالت شاهد در آزمایش‌ها آورده شد و جمعاً ۱۳۶ آزمایش انجام شد.

نتایج و بحث

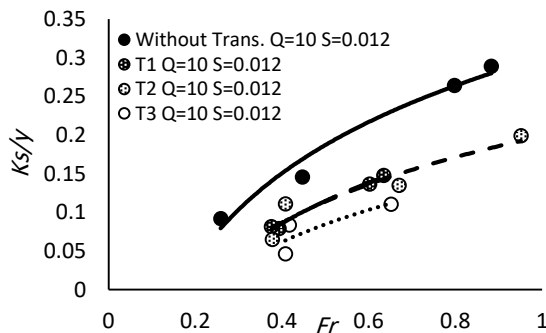
بررسی اثر کاهش عرض

در جریان رسوبات بدیهی است زمانی که مقطع کانال تنگ می‌شود دبی در واحد عرض افزایش یافته لذا الگوی فرم‌های بستر تغییر خواهند کرد. از این رو به منظور بررسی اثر کاهش عرض بر ارتفاع فرم بستر نمودارهایی برحسب ارتفاع فرم بستر در حالت با تبدیل و بدون تبدیل رسم شد تا مشاهده شود که وجود تبدیل‌های کاهش عرض چه تأثیری بر ارتفاع فرم بستر دارد. بررسی این موضوع در شکل ۵ دیده می‌شود که در آن ارتفاع فرم بستر در حالت بدون تبدیل با حالتی که تبدیل نوع ۱ در کانال قرار دارد مقایسه گردید. همان‌طور که به دست آمد با کاهش عرض کانال سرعت جریان در مقطع تنگ شده افزایش یافته و در کل کانال متوسط ارتفاع فرم بستر در این حالت نسبت به حالت بدون تبدیل افزایش یافت.

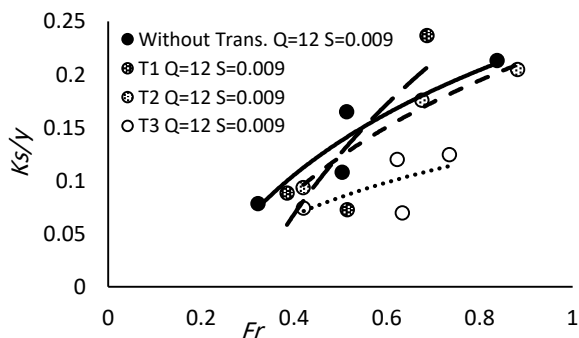
مختلف در شکل‌های ۶-الف تا ۶-ج آورده شده است تا بتوان نحوه تغییر این پارامتر را تحت شرایط هیدرولیکی مختلف بررسی کرد.



شکل ۶-الف- تغییرات زبری نسبی در $S = 0.009$ و $Q = 10 \text{ L s}^{-1}$



شکل ۶-ب- تغییرات زبری نسبی در $S = 0.012$ و $Q = 10 \text{ L s}^{-1}$



شکل ۶-پ- تغییرات زبری نسبی در $S = 0.009$ و $Q = 12 \text{ L s}^{-1}$

رسوبی برای بستر مسطح با پارامتر D_{90} مشخص می‌شود که از نتایج حدود ۱۰۰ فلوم و داده صحرایی به‌دست آمده است:

$$k_{s, \text{grain}} = 3D_{90} \quad [۴]$$

نتایج مشابهی توسط کامفیوس (۱۹۷۴)، $k_s = 2.5D_{90}$ گلاذکی (۱۹۷۵) $k_s = 2.3D_{90}$ هی (۱۹۸۹) $k_s = 3.5D_{84}$ و محمود (۱۹۷۱) $k_s = 5.1D_{84}$ به‌دست آمده است. با وجود فرم بستر رابطه تابعی که توسط یالین (۱۹۷۹) مطرح شد مطابق رابطه ۵ است که در آن Δ ارتفاع فرم بستر و λ طول فرم بستر است.

$$k_{s, \text{form}} = F\left(\Delta, \frac{\Delta}{\lambda}\right) \quad [۵]$$

رابطه منتج شده ون راین به‌صورت زیر است:

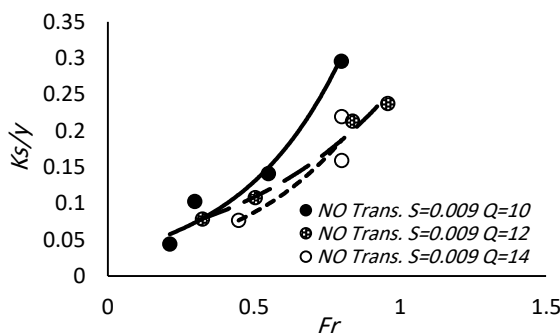
$$k_{s, \text{form}} = 1.1\Delta(1 - e^{-25\phi}) \quad [۶]$$

که در آن $\phi = \frac{\Delta}{\lambda}$ شیب فرم بستر است. با در نظر گرفتن ضریب زبری ذرات و زبری ناشی از فرم بستر، زبری مؤثر K_s بر روی یک بستر متحرک به‌وسیله رابطه ۷ به‌دست می‌آید.

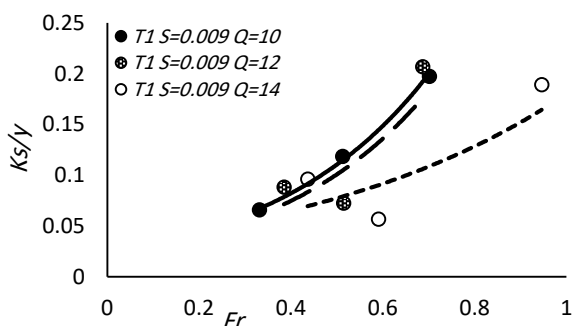
$$k_s = 3D_{90} + 1.1\Delta(1 - e^{-25\phi}) \quad [۷]$$

با توجه به رابطه ۷ که توسط ون راین ارائه شده است، زبری K_s ارتباط مستقیم با ارتفاع فرم بستر دارد. بنابراین در مورد تبدیل‌ها با زاویه‌های مختلف، چنانچه روند مربوط به ارتفاع فرم بستر را مد نظر داشته باشیم، نمودارهای زبری نسبی نیز همان روند را طی می‌کنند. یعنی اگر ارتفاع فرم بستر نسبت به حالت بدون تبدیل بیشتر یا کمتر شده باشد در مورد زبری نسبی نیز همان روند تکرار می‌شود. این موضوع در مورد دبی‌های ۱۰ و ۱۲ L s^{-1} کاملاً صادق بود یعنی روند افزایش یا کاهش زبری نسبی نسبت به حالت بدون تبدیل کاملاً با روند تغییرات ارتفاع فرم بستر یکسان بود که البته در مورد شیب‌های مختلف نیز صدق می‌کرد. در دبی L s^{-1} ۱۰ زبری حدود ۱۵ الی ۲۰٪ نسبت به حالت بدون تبدیل کاهش داشت. در دبی L s^{-1} ۱۴ زبری ۱۰ الی ۱۲٪ افزایش داشت و دبی L s^{-1} ۱۲ نیز حالتی بینابین داشت. در مورد تبدیل با زاویه ۱۵ درجه نمودارهای ارتفاع - فرود و زبری نسبی - فرود مطابق هم بودند. روند رفتاری زبری نسبی برای تبدیل‌های مختلف در دبی‌ها و شیب‌های

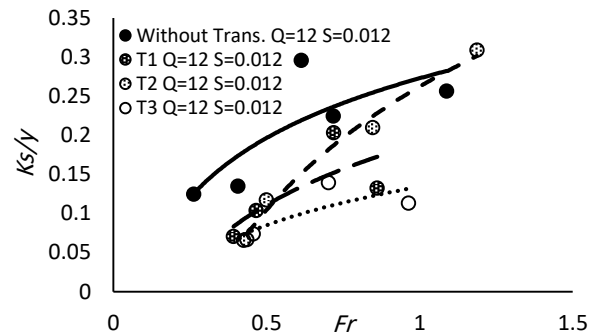
نسبی نیز با افزایش دبی به علت افزایش یا کاهش ارتفاع فرم بستر، مطابق با روند افزایش یا کاهش ارتفاع فرم بستر تغییر می‌کردند. در حقیقت در مورد افزایش دبی نیز همان روند اتفاق افتاد و بیش از پیش ارتباط مستقیم زبری نسبی با ارتفاع فرم بستر به اثبات رسید. قابل ذکر است که در خصوص محاسبه زبری نسبی هم زبری ذرات و هم زبری ناشی از فرم بستر دخیل بودند اما چنانچه می‌دانیم ذرات رسوبی با مشخصات ثابتی در داخل فلوم قرار داشتند بنابراین تغییرات ناشی از زبری نسبی مرتبط با ارتفاع فرم بستر خواهد بود.



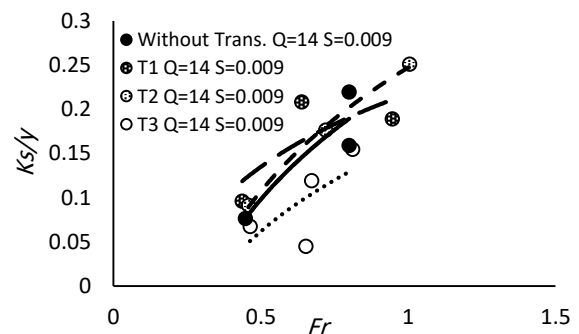
شکل ۷-الف- تغییرات زبری نسبی با افزایش دبی در حالت بدون تبدیل و $S = 0.009$



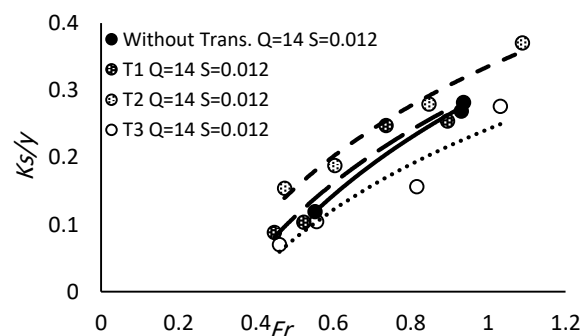
شکل ۷-ب- تغییرات زبری نسبی با افزایش دبی در حالت تبدیل T1 و $S = 0.009$



شکل ۶-ت- تغییرات زبری نسبی در $S = 0.012$ و $Q = 12 \text{ L s}^{-1}$



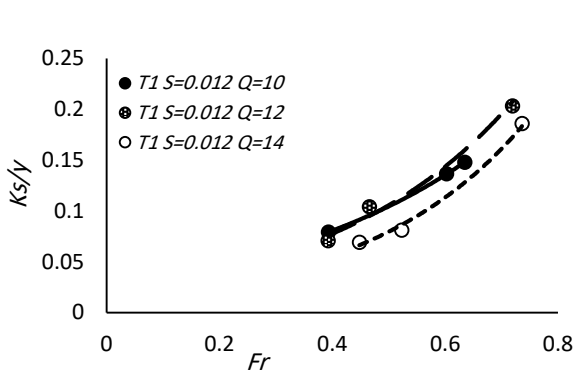
شکل ۶-ث- تغییرات زبری نسبی در $S = 0.009$ و $Q = 14 \text{ L s}^{-1}$



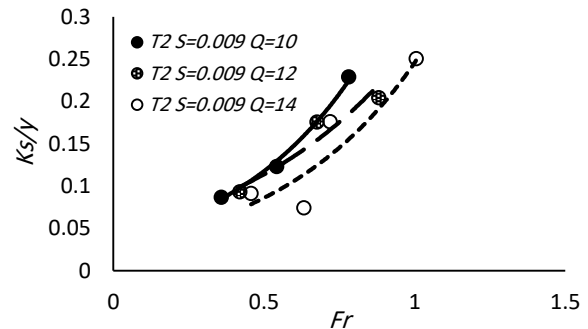
شکل ۶-ج- تغییرات زبری نسبی در $S = 0.012$ و $Q = 14 \text{ L s}^{-1}$

بررسی اثر افزایش دبی

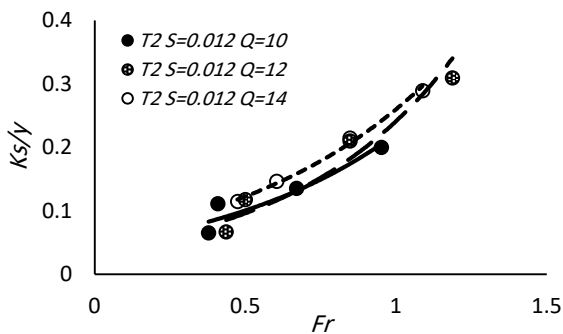
با توجه به شکل‌های ۷-الف تا ۷-ح در دو شیب ثابت ۰/۰۰۹ و ۰/۰۱۲ برای هر یک از تبدیل‌ها اثر افزایش دبی بر روی زبری نسبی بررسی شد. نمودارهای زبری



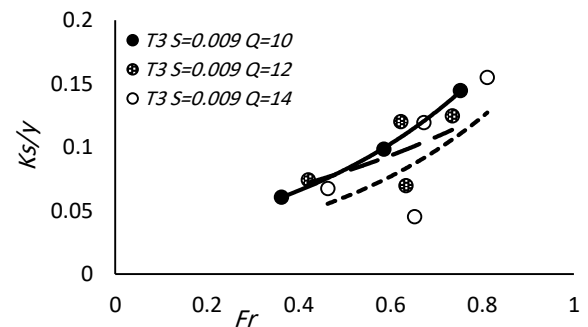
شکل ۷-ج- تغییرات زبری نسبی با افزایش دبی در حالت تبدیل T1 و $S = 0.012$.



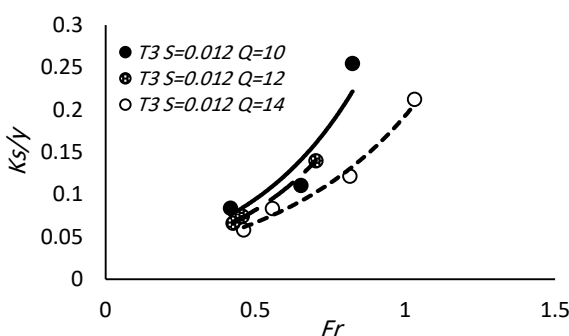
شکل ۷-پ- تغییرات زبری نسبی با افزایش دبی در حالت تبدیل T2 و $S = 0.009$.



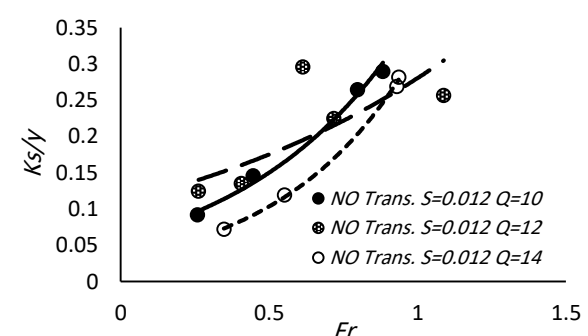
شکل ۷-چ- تغییرات زبری نسبی با افزایش دبی در حالت تبدیل T2 و $S = 0.012$.



شکل ۷-ت- تغییرات زبری نسبی با افزایش دبی در حالت تبدیل T3 و $S = 0.009$.



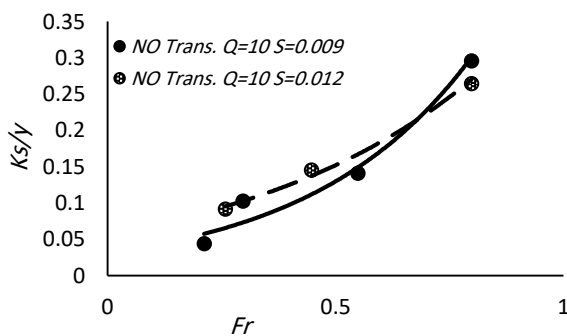
شکل ۷-ح- تغییرات زبری نسبی با افزایش دبی در حالت تبدیل T3 و $S = 0.012$.



شکل ۷-ث- تغییرات زبری نسبی با افزایش دبی در حالت بدون تبدیل و $S = 0.012$.

در مجموعه شکل‌های ۷-الف تا ۷-ت که مربوط به حالت‌های چهارگانه بدون تبدیل و با وجود سه تبدیل است، با افزایش دبی در یک عدد فرود ثابت ($Fr = \frac{Q}{b_y \sqrt{gy}} = \text{Cons.}$) بایستی عمق جریان افزایش یابد. بنابراین پارامتر $\frac{K_s}{y}$ کاهش می‌یابد که این امر در نمودارها

مورد تبدیل‌ها به علت افزایش سرعت در مقطع تنگ شده از ارتفاع فرم بستر کم شده است. میزان کاهش زبری نسبی در مورد تبدیل‌های مختلف با دبی‌های مختلف با افزایش شیب متفاوت بوده است. به ازای افزایش شیب از مقدار $0/009$ به مقدار $0/012$ ، کاهش زبری نسبی از محدوده 8% مربوط به دبی 10 L s^{-1} (سرعت $0/15 \text{ m s}^{-1}$) و تبدیل نوع ۱ شروع شده و تا مقدار 25% در حالت تبدیل نوع ۳ و دبی 14 L s^{-1} (سرعت $0/56 \text{ m s}^{-1}$) ادامه داشته است. لازم به ذکر است که در هر یک از شیب‌های $0/009$ و $0/012$ چهار عمق مورد آزمایش و مطالعه قرارگرفت و تغییر در عمق جریان موجب تغییر عدد فرود شد. بنابراین براساس اینکه ضریب زبری نسبی ارتباط مستقیم با ارتفاع فرم بستر دارد روند تغییرات زبری نیز مطابق با تغییرات ارتفاع فرم بستر بود. بدین معنا که در حالت بدون تبدیل با افزایش شیب، زبری نسبی افزایش یافت و در قرارگیری تبدیل‌ها با زاویه‌های مختلف، با افزایش شیب، زبری نسبی کاهش پیدا کرد. شکل‌های ۸-الف تا ۸-ر تغییرات زبری نسبی را با تغییر شیب در حالت‌های مختلف نشان می‌دهد.



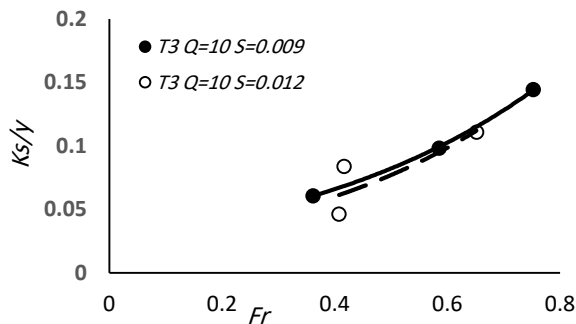
شکل ۸-الف- تغییرات زبری نسبی با افزایش شیب در حالت بدون تبدیل و $Q = 10 \text{ L s}^{-1}$

نیز مشاهده می‌شود. البته بایستی دقت نمود که در حالت کلی با افزایش دبی، افزایش سرعت ایجاد شده و انتظار می‌رود که ارتفاع ریل‌ها زیاد شده و در نتیجه زبری K_s هم افزایش یابد، اما بررسی نمودارها نشان می‌دهد که این روند تأثیر اندکی داشته و اثر افزایش عمق آب بر روی پارامتر $\frac{K_s}{y}$ بیشتر است و در نهایت موجب کاهش این پارامتر شده است.

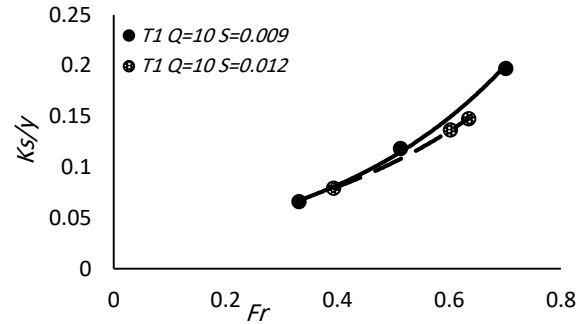
در حالت شیب $S = 0.012$ شرایط در برخی از حالت‌ها تغییر کرده است. در حالت بدون تبدیل در برخی از آزمایش‌ها در یک عدد فرود ثابت مشاهده می‌شود که با افزایش دبی پارامتر $\frac{K_s}{y}$ زیاد شده است. احتمال می‌رود که در چنین حالت‌هایی اثر افزایش سرعت بر ارتفاع فرم بستر بیشتر شده و در نتیجه زبری K_s زیاد شده است. در حالت تبدیل با زاویه 10° درجه (تبدیل نوع دوم) می‌توان بیشتر این موضوع را مشاهده کرد. البته لازم به ذکر است که در این حالت نیز در یک عدد فرود ثابت اثر افزایش عمق آب جریان و افزایش زبری K_s بر اثر افزایش ارتفاع ریل‌ها، یکسان بوده و در نهایت با اختلاف کمی میزان افزایش K_s بر روی پارامتر $\frac{K_s}{y}$ بیشتر مشاهده می‌شود.

بررسی روند شیب

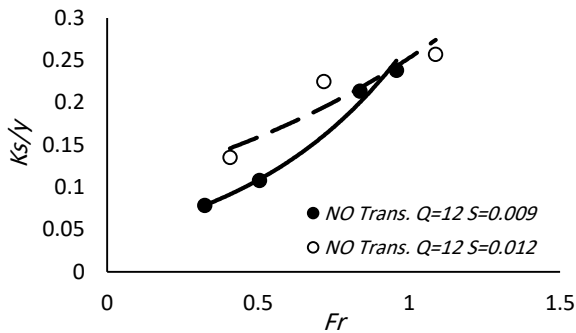
در تمامی دبی‌ها با افزایش شیب از $0/009$ به $0/012$ در حالت بدون تبدیل ارتفاع فرم بستر افزایش یافته است. برازش خطوط توپر مربوط به شیب $0/009$ و خطوط خط‌چین مربوط به شیب $0/012$ می‌باشد. زمانی که تبدیل‌ها با زاویه‌های مختلفی در فلوام قرار داده شدند. در مقطع تنگ‌شدگی تغییراتی در خصوص جریان ایجاد نمودند به این نحو که براساس نتایج به دست آمده در مقطع تنگ شده با افزایش شیب، سرعت افزایش یافته و این امر موجب شستن بخشی از تاج فرم بستر شده و در نهایت با افزایش شیب در مورد تبدیل‌ها در تمامی دبی‌ها، متوسط ارتفاع فرم بستر کم شده است. یعنی با ثابت بودن تمامی پارامترها، مانند زاویه تبدیل، دبی و خصوصیات ذرات رسوبی، تنها با افزایش شیب دو نتیجه کلی به دست آمد: اول اینکه در حالت بدون تبدیل با افزایش شیب، ارتفاع فرم بستر زیاد شد و دوم اینکه در



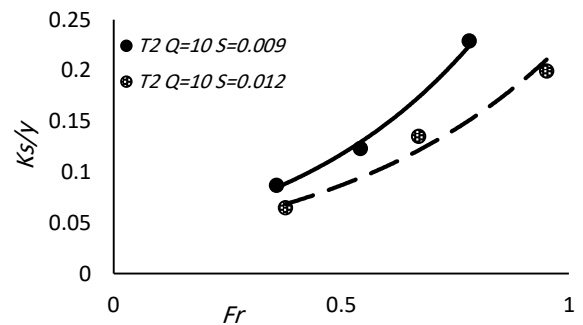
شکل ۸-ت- تغییرات زبری نسبی با افزایش شیب در حالت تبدیل T3 و $Q = 10 \text{ L s}^{-1}$



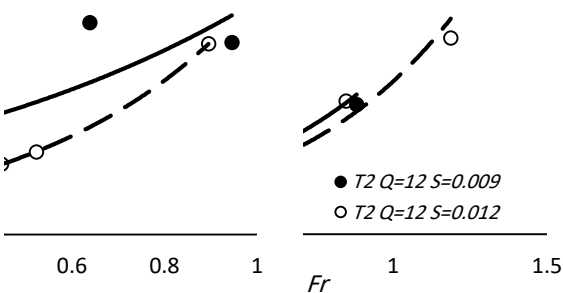
شکل ۸-ب- تغییرات زبری نسبی با افزایش شیب در حالت تبدیل T1 و $Q = 10 \text{ L s}^{-1}$



شکل ۸-ث- تغییرات زبری نسبی با افزایش شیب در حالت بدون تبدیل و $Q = 12 \text{ L s}^{-1}$

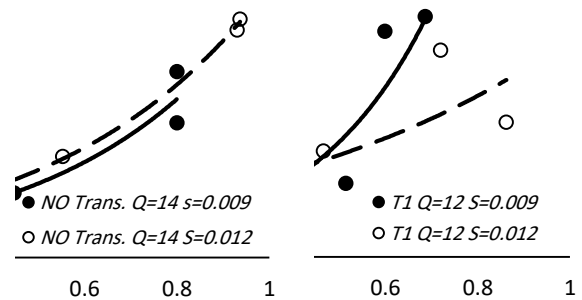


شکل ۸-پ- تغییرات زبری نسبی با افزایش شیب در حالت تبدیل T2 و $Q = 10 \text{ L s}^{-1}$

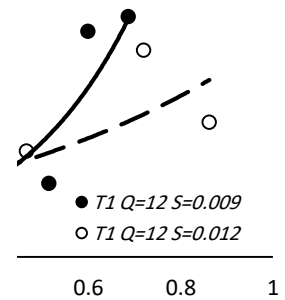


شکل ۸-د- تغییرات زبری نسبی با افزایش شیب در حالت تبدیل T1 و $Q = 14$

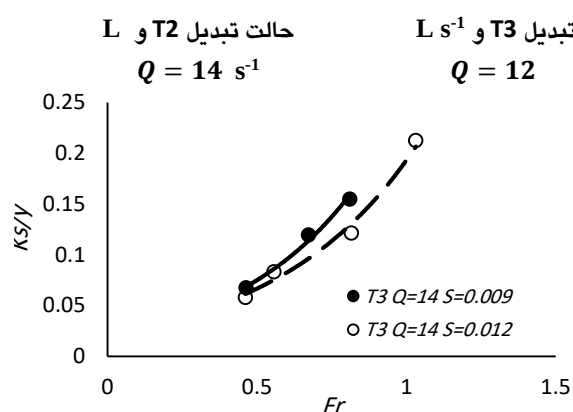
شکل ۸-چ- تغییرات زبری نسبی با افزایش شیب در حالت تبدیل T2 و $Q = 12$



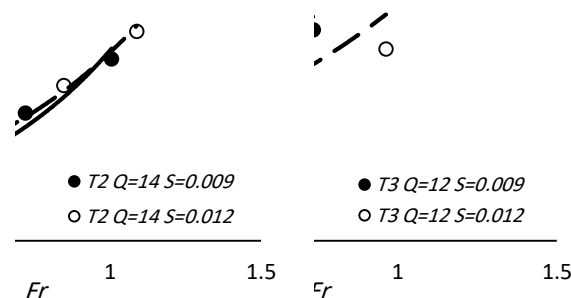
شکل ۸-خ- تغییرات زبری نسبی با افزایش شیب در حالت بدون تبدیل و $Q = 14$



شکل ۸-ج- تغییرات زبری نسبی با افزایش شیب در حالت تبدیل T1 و $Q = 12$

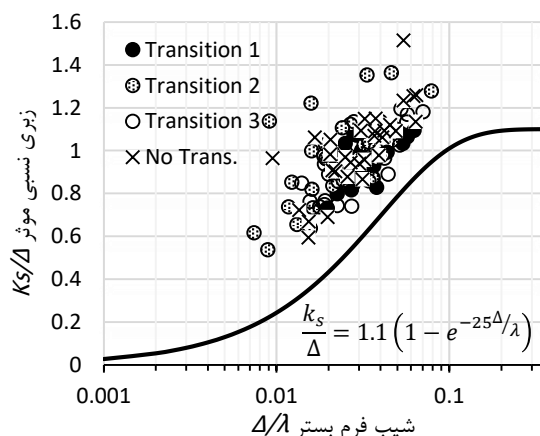


شکل ۸-ر- تغییرات زبری نسبی با افزایش شیب در حالت تبدیل T3 و $Q = 14 \text{ L s}^{-1}$



شکل ۸-ذ- تغییرات زبری نسبی با افزایش شیب در

شکل ۸-ح- تغییرات زبری نسبی با افزایش شیب در حالت



شکل ۹- مقایسه زبری معادل فرم بستر.

نتیجه‌گیری کلی

با بررسی تغییرات پارامترهای مختلف مشاهده شد که زاویه تبدیل تنگ‌شونده، دبی و شیب هر یک به‌نحوی بر روی افزایش یا کاهش ارتفاع فرم بستر نقش داشته و مستقیماً زبری نسبی کانال را تغییر می‌دهند. از این مطالعه نتایج زیر بدست آمد:

- می‌توان گفت که با افزایش زاویه تبدیل و اساساً با قرارگیری تبدیل در فلولم نسبت به حالت بدون تبدیل، در دبی 10 L s^{-1} زبری در حدود ۱۷/۵٪ کاهش و در دبی 14 L s^{-1} زبری در حدود ۱۱٪ افزایش نشان داد.

زبری معادل فرم بستر

به‌منظور مقایسه نتایج حاضر با مطالعه ون راین (۱۹۸۴ b) نمودار مربوط به داده‌های زبری نسبی مؤثر بستر رسوبی بر حسب شیب فرم بستر رسم گردید که در شکل ۹ نمایش داده شده‌است. خط مماس مربوط به زبری ناشی از فرم بستر به‌تنهایی 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 گرفته‌شود که در این حالت محور قائم زبری مؤثر را نشان داده که با تقسیم آن بر ارتفاع فرم بستر زبری نسبی مؤثر به‌دست 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.

مقدار ۰/۰۵ تا ۰/۳) شده است. تحت شرایط آزمایشگاهی این مطالعه، این افزایش تا زمانی بود که عدد فرود به ۱/۰۵ رسیده و $\frac{\Delta}{y} = 0.3$ و $S = 0.015$

- از مقایسه نتایج با مطالعه ون راین (b ۱۹۸۴) مشاهده شد که روند زبری نسبی مؤثر مطابق با نتایج ون راین بوده به این معنا که با افزایش شیب فرم بستر در حالت کلی، زبری نسبی مؤثر نیز افزایش یافته است

- با افزایش دبی از ۱۰ به ۱۴ لیتر بر ثانیه نیز روند تغییرات زبری کاملاً مطابق با تغییرات ارتفاع فرم بستر بوده و این موضوع در خصوص افزایش شیب از ۰/۰۰۶ تا ۰/۰۱۵ نیز صادق بود. بنابراین با بررسی پارامترهای مهم و تأثیرگذار بر روی زبری مشاهده شد که ارتفاع فرم بستر مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار بر روی زبری نسبی بوده است.
- افزایش عدد فرود به میزان ۸۰ درصد (یا افزایش سرعت از مقدار ۰/۱۵ تا ۰/۵۶) منجر به افزایش ارتفاع رپل به مقدار ۷۳ درصد (افزایش پارامتر $\frac{\Delta}{y}$ از

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.
- Cheginini AHN and Pender G, 2012. Determination of smile size bedload transport and its related bedform under different uniform flow conditions. *WSEAS Trans on Envir and Dev* 4(8):158-167.
- Coleman SE and Melville BW, 1994. Bed-form development. *J Hydraul Eng ASCE* 120: 544-560.
- Esmaili K, Kashefipoor M and Shafaei Bajestan M, 2009. Evaluating the effect of bed form on roughness coefficient by integration of numerical and experimental methods in unsteady flows. *J of Water & Soil*. 23(3): 136-144.
- Gladki H, 1975. Discussion of determination of sand roughness for fixed beds. *J Hydraul Res* 13(2):93-115.
- Graf WH and Suszka L, 1987. Sediment transport in steep channels. *J Hydrosoci Hydr Eng* 5(1): 11-26.
- Hey RD, 1989. Bar form resistance in gravel-bed rivers. *J Hydraul Eng* 114(12): 1498– 1508.
- Kamphuis JW, 1974. Determination of sand roughness for fixed beds. *J Hydraul Res* 12(2): 87-95.
- Karim F, 1999. Bed-form geometry in sand-bed flows. *J Hydraul Eng ASCE* 125(12): 1253-1261.
- Keshavarzi A, Ball J and Nabavi H. 2012. Frequency pattern of turbulent flow and sediment entrainment over ripples using image processing. *Hydrol Earth Syst Sci* 16: 147-156.
- Kuhnle RA, Horton JK, Bennett SJ and Best JL, 2006. Bed forms in bimodal sand-gravel sediments: laboratory and field analysis. *J Sediment* 53:631-654.
- Lajeunesse E, Malverti L and Charu F, 2010. Bed load transport in turbulent flow at the grain scale experiments and modeling. *J. Geophys Res* 115: 139-153.
- Mahmood K, 1971. Flow in Sand Bed Channels. *Wat Manag Tec Rep* 11, Fort Collins, Colo.
- 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.
- 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*, 27: 89-145.
- Southard B and Boxjchwall A, 1973. Flume experiments on the transition from ripples to lower flat bed with increasing sand size. *J Sedim PetroL* 43: 112-125.
- Vanoni VA and Brooks NH, 1957. Laboratory Studies of the Roughness and Suspended Load of Alluvial Streams. *Sed Lab Cali ins of Tech California USA*.
- VanRijn LC, 1984a. Sediment transport, Part1: Bed-load transport. *J Hydraul Eng ASCE* 110(10): 1431-1456.
- Van Rijn LC, 1984b. 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.
- Williams PG, 1970. Flume width and water depth effects in sediment-transport experiments. *USGS Proof paper* 562-H.
- Wu WM and Wang SSY, 1999. Movable bed roughness in alluvial rivers. *J Hydraul Eng ASCE* 125(12): 1309-1312.

Yalin MS, 1979. Mechanics of Sediment Transport, Pergamon Press, Braunschwei, Germany.

Yalin MS, 1972. Mechanics of Sediment Transport. Pergamon Press New York.

Zhang Y, 1999. Bed form geometry and friction factor of flow over a bed covered by dunes. Master of Applied Science Degree Uni of Windsor, Canada.