بررسی آزمایشگاهی اثر بستر زبر بر عمق مزدوج نسبی پرش هیدرولیکی بر روی شیب معکوس

پرستو پارسامهر[1*] و علی حسین‌زاده دلیر[2]

۱*- نویسنده مسئول: دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز
parastoo.parsamehr@gmail.com

۲- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۲/۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۳/۱۰

چکیده

پرش هیدرولیکی، یکی از مهم‌ترین پدیده‌ها در جریان متغیر سریع است. در این پدیده، ضمن ایجاد افت انرژی زیاد، سرعت جریان به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. در این تحقیق پرش هیدرولیکی بر روی شکل جدیدی از بستر زبر با زبری‌های به شکل نیم‌استوانه با سه ارتفاع (r) و چهار فاصله (s=1D, 2D, 3D, 4D) مورد بررسی قرار گرفت. در مجموع ۲۳۸ آزمایش در محدوده اعداد فرود ۴/۶ تا ۷/۴ بر روی شیب افقی و دو شیب معکوس ۱ و ۱/۵ درصد انجام گرفت. نتایج نشان داد با افزایش ارتفاع، فاصله بین زبری‌ها، شیب معکوس و عدد فرود، عمق ثانویه پرش کاهش و افت انرژی و تنش برشی افزایش می‌یابد. در پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر با زبری‌های نیم استوانه‌ای شکل بر روی شیب معکوس ۱/۵ درصد، عمق مزدوج پرش نسبت به پرش کلاسیک به طور متوسط ۳۶ درصد کاهش یافت و ضریب تنش برشی به طور متوسط ۱۶ برابر بستر صاف و افقی شد. در مجموع، نتایج نشان داد که بستر زبر بر روی شیب معکوس به منظور کارایی بهتر می‌تواند جایگزین مناسبی در حوضچه‌های آرامش باشد.

کلید واژه‌ها: *افت انرژی، بستر زبر، پرش هیدرولیکی، حوضچه آرامش، عدد فرود، عمق مزدوج نسبی.*

Experimental Study of Effect of Rough Bed on Sequent Depth Ratio of Hydraulic Jump on Adverse Slope

P.Parsamehr[1], A.Hosseinzadeh Dalir[2]

1- Former Msc Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran
2- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran

Received: 22.Feb.2012 Accepted: 30.May.2012

Abstract

Hydraulic jump is one of the important phenomena in rapidly varied flow. Due to this phenomenon the energy loss, the upstream flow velocity significantly decreases. In the present study, hydraulic jump on a new roughened bed -with half cylindrical shape bars with three heights (r) and four different longitudinal spacing (s=1D, 2D, 3D, 4D) were investigated. In total 238 experiments were performed for a range of Froude numbers from 4.6 to 7.4 on horizontal bed and two adverse slopes of 1 and 1.5 %. The results showed that the sequent depth decreases and energy loss and bed shear stress increases as the height, spacing of the rough bars, adverse slope and Froude number increased. In hydraulic jump on adverse slope of 1.5% and rough bed with half cylindrical roughness, sequent depth 36% decreases and the bed shear stress coefficient is 16 times of its corresponding values on smooth and horizontal bed. Some empirical relations for sequent depth ratio, relative energy loss and bed shear stress coefficient were introduced. Totally, the results obtained show that, rough bed with adverse slopes may be used to achieve better performance in stilling basins.

Key words: *Energy loss, Rough bed, Hydraulic jump, Stilling basin, Sequent depth ratio, Froude number.*

مقدمه

وجود انرژی جنبشی زیاد جریان در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی نظیر دریچه‌ها، تندآبها، آبشارها و سرریزها ضرورت کاربرد حوضچه‌های آرامش به عنوان مستهلک کننده انرژی جهت اطمینان از تشکیل پرش هیدرولیکی ایمن و کاهش خسارت ناشی از فرسایش پایین‌دست را بیان می‌کند. یکی از روش‌هایی که می‌تواند باعث افزایش افت انرژی در پرش هیدرولیکی شود، ایجاد زبری در کف حوضچه‌های آرامش می‌باشد.

مطالعات فراوانی در رابطه با پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای زبر توسط محققین انجام گرفته و اشکال مختلف زبری نظیر زبری طبیعی، ذوزنقه‌ای و مکعبی و سینوسی و ... بررسی شده است.

محمد علی[1] پرش هیدرولیکی را بر روی بستر زبر با زبری‌های مکعبی شکل با ابعاد ۱/۶ سانتی‌متر مطالعه و مشاهده کرد که طول پرش نسبت به پرش کلاسیک به‌طور متوسط ۴۷/۴٪ کاهش می‌یابد (۱۳).

اید و راجاراتنام[2] بسترهای موج‌دار را پیشنهاد کردند. آن‌ها پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج دار سینوسی شکل را در بازه عدد فرود ۴ تا ۱۰ بررسی کردند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که طول پرش تقریباً نصف طول آن روی بستر صاف بوده و عمق ثانویه ۲۵درصدکاهش یافت (۷).

توکیای[3] تأثیر بستر موج‌دار را بر روی پرش هیدرولیکی به صورت تجربی بررسی نمود. مطالعات در محدوده اعداد فرود ۵ تا ۱۲و شیب موج $\frac{t}{S}$ برابر ۰/۱، ۰/۲، ۰/۲۶ انجام گرفت (۱۵).

کارلو و همکاران[4] با مطالعه بر روی بسترهای با زبری طبیعی از جنس شن با پنج اندازه مختلف $۳/۲ < d_{50} < ۰/۴۶$ سانتی‌متر و در محدوده اعداد فرود ۱/۹ تا ۹/۹ و با زبری نسبی $۰ < \frac{k_s}{y_1} < ۲/۰۲۵$، نشان دادند که زبری‌ها باعث کاهش عمق مزدوج نسبی، طول غلتاب و طول پرش شده و رابطه‌ای را برای ضریب کاهشی در معادله عمومی پرش ارائه دادند که این ضریب به مشخصات زبری نسبی وابسته است (۶).

مشخصات پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای موج‌دار ذوزنقه‌ای شکل توسط ایزدجو و شفاعی بجستان، بر روی چهار بستر موج‌دار ذوزنقه ای شکل در بازه عدد فرود ۴ تا ۱۲ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که عمق پایاب مورد نیاز جهت ایجاد پرش هیدرولیکی روی بسترهای موج‌دار کوچک‌تر از عمق پایاب مربوط به پرش هیدرولیکی مشابه بر روی بسترهای صاف می‌باشد. تنش برشی تقریبا ۱۰ برابر تنش برشی بر روی بستر صاف به دست آمد (۱۰).

تأثیر بستر موج‌دار سینوسی بر خصوصیات پرش هیدرولیکی توسط عباسپور و همکاران در محدوده اعداد فرود ۳/۸ تا ۸/۶ مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که عمق ثانویه پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج‌دار نسبت به بستر صاف در شرایط هیدرولیکی یکسان کوچکتر بوده و عمق بدون بعد (D) ۰/۱۷ به دست آمده است. مقایسه نیروی برشی و ضریب تنش برشی نشان داد که تنش برشی در بستر موج‌دار حداقل ۱۰ برابر بستر صاف است (۳).

گوهری و فرهودی، آزمایش‌هایی را بر روی بستر زبر با زبری‌های نواری مستطیلی با دو ارتفاع (سانتی‌متر ۲/۵و۱/۵=t) و پنج فاصله زبری (سانتی‌متر ۷/۵ و ۶، ۴، ۳، ۱/۵=s) در محدوده اعداد فرود ۳ تا ۱۰ انجام دادند و مشاهده کردند عمق ثانویه پرش روی بستر زبر نسبت به بستر صاف کاهش یافته و مقدار کاهش با افزایش فاصله بین زبری‌ها افزایش می‌یابد، همچنین تغییر ارتفاع زبری‌ها و عمق اولیه پرش اثر ناچیزی بر مشخصات هیدرولیکی دارند. میزان حداقل و حداکثر افت انرژی نسبی (R_L) ۲۶/۷ و ۷۸/۳ درصد به دست آمد (۸).

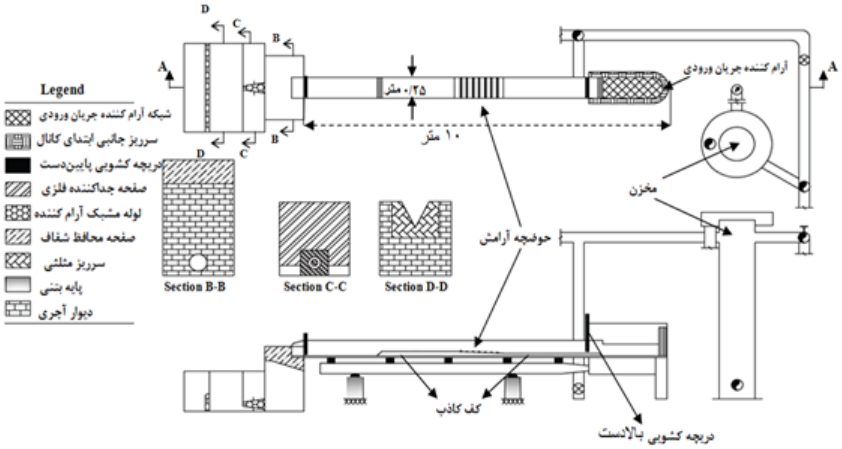
شفاعی بجستان و نیسی اثر اجزای زبر با شکل‌های مختلف بر تنش برشی بستر و عمق مزدوج پرش هیدرولیکی را در محدوده اعداد فرود ۴/۵ تا ۱۲ بررسی کردند. اجزای زبر منشوری شامل مقاطع مختلف مستطیلی، مثلثی، دایره‌ای، لوزی و شش‌ضلعی بود. نتایج این تحقیق نشان داد که عمق مزدوج به دلیل وجود اجزای زبر کاهش می‌یابد، میزان این کاهش بستگی به عدد فرود و شکل اجزای زبر دارد، کمترین و بیشترین میزان کاهش عمق مزدوج (D) به‌ترتیب مربوط به اجزای زبرمستطیلی (D=۰/۲۱) و مثلثی شکل (D=۰/۲۷) بود (۲).

ابراهیم و شزی[5] پرش هیدرولیکی را بر روی پنج نوع بستر زبر به شکل‌های سینوسی، مثلثی، ذوزنقه‌ای (با دو شیب کناره مختلف) و مستطیلی در محدوده اعداد فرود ۳ تا ۷/۵ بررسی کردند. در تمام آزمایش‌ها ارتفاع زبری و طول موج به‌ترتیب ۱/۸ و ۶/۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. بر اساس نتایج آنها زبری نسبی و شکل زبری‌ها اثر قابل توجهی بر عمق مزدوج نسبی نداشت و میزان کاهش عمق مزدوج نسبی (D) به‌طور متوسط برابر با ۰/۳۷ به دست آمد (۹).

نتایج تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که زبری بستر، نقش مهمی را در کاهش عمق ثانویه پرش هیدرولیکی و تثبیت آن ایفا می‌کند.

همچنین در زمینه پرش هیدرولیکی بر روی بستر با شیب معکوس مطالعاتی انجام گرفته است. رز (۱۹۳۸) اظهار داشت که پرش

1- Mohammad Ali
2- Eda and Rajaratnam
3- Tokyay
4- Carollo et al.
5- Ibrahim and Shazy



شکل ۱- پلان سیستم تأمین آب و اجزای تجهیزات فلوم در آزمایشگاه هیدرولیک

هیدرولیکی روی یک شیب معکوس پایدار نخواهد ماند مگر آن‌که شیب مزبور بسیار نزدیک به صفر باشد، اما استیونس (۱۹۴۲) در بحثی پیرامون کارهای کینسواتر پرش بر روی شیب مثبت و منفی را تحلیل کرده و به صورت تئوری تشکیل این نوع پرش را عملی می‌داند (۱).

خدر و راجاگوپال[1] برای بررسی تحلیل استیونس آزمایش‌هایی بر روی شیب منفی انجام دادند و بر اساس نتایج آن‌ها پرش هیدرولیکی روی شیب‌های تندتر از شیب معکوس ۰/۰۲۵ تثبیت نمی‌شود (۱۱).

مک کروکودال و محمد[2] آزمایش‌هایی را جهت استخراج پارامترهای طراحی پرش هیدرولیکی بر روی شیب معکوس در یک کانال مستطیلی منشوری در محدوده اعداد فرود ۲/۵ تا ۹ برای شیب های معکوس تا S =۰/۲ انجام دادند. بر اساس نتایج به دست آمده در اعداد فرود پایین‌تر از چهار ایجاد پرش پایدار بر روی شیب تقریباً ناممکن و در اعداد فرود بالاتر تاحدودی پایداری پرش بهبود می‌یابد، همچنین با افزایش شیب معکوس میزان نسبت عمق ثانویه پرش در مقایسه با پرش کلاسیک و شیب کمتر، کاهش می‌یابد (۱۲).

ابریشمی و صانعی پرش هیدرولیکی بر روی شیب معکوس را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها آزمایش‌هایی بر روی حوضچه‌هایی به طول‌های ۱ و ۲/۴ متر و برای شیب‌های معکوس تا ۲/۵درصد در محدوده اعداد فرود ۲ تا ۱۰ انجام دادند. نتایج تجربی و تحلیل‌های مربوطه نشان دادند که امکان ایجاد پرش پایدار بر روی شیب های منفی وجود دارد، این پایداری تابعی از عدد فرود اولیه، عمق پایاب و طول حوضچه است (۴).

بیرامی و چمنی پرش هیدرولیکی در کانال‌های شیب‌دار را بر روی پنج شیب کف معکوس تا شیب ۱۰درصد بررسی کردند. در این تحقیق بر اساس معادله مومنتم در شیب افقی، روشی برای پیش بینی نسبت اعماق ثانویه بر روی شیب معکوس ارائه شد. تحلیل نتایج آزمایش‌ها نشان داد که شیب منفی حوضچه نسبت عمق ثانویه را کاهش می‌دهد در صورتی که شیب های مثبت آن را افزایش می‌دهد (۵).

نیک مهر و تاب بردبار پرش هیدرولیکی را در دو حالت بستر صاف و زبر روی چهار شیب معکوس بررسی کردند. نتایج نشان دادند که عمق ثانویه و طول پرش بر روی بستر صاف بیشتر از بستر زبر، با شیب و عدد فرود یکسان، بوده و در مقایسه درصد اتلاف انرژی، اتلاف انرژی بیشتری در بستر زبر نسبت به بستر صاف ایجاد می‌شود (۱۴).

با توجه به تحقیقات انجام شده فوق، کاهش عمق ثانویه از نتایج پرش هیدرولیکی با شیب معکوس است که نشان می‌دهد این شیب‌ها در کنترل پرش و جلوگیری از تخریب و خسارات احتمالی از نظر اقتصادی مقرون به صرفه می‌باشد.

بنابراین هدف از تحقیق حاضر، بررسی پرش هیدرولیکی بر روی شکل جدیدی از بستر زبر با زبری‌های به شکل نیم استوانه به طول عرض کانال با ارتفاع و فواصل مختلف بر روی کف افقی و با شیب معکوس می‌باشد.

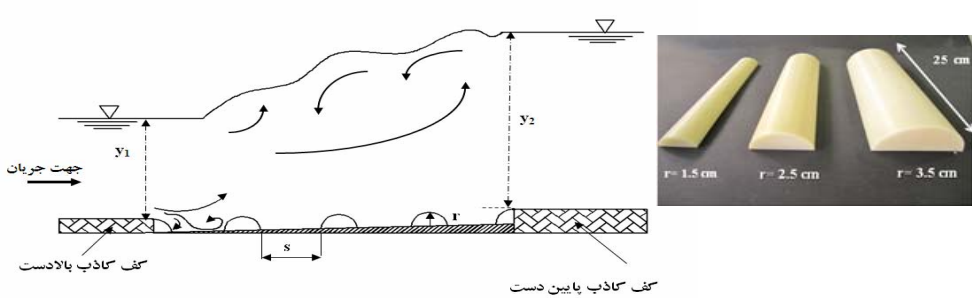
مواد و روش‌ها

مشخصات آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در فلوم آزمایشگاهی فلزی-شیشه‌ای به طول ۱۰ متر، عرض ۰/۲۵ متر و ارتفاع ۰/۵ متر با شیب کف ۰/۰۰۲۲ در آزمایشگاه هیدرولیک گروه آب دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز انجام شده است. سیستم تأمین آب در شکل (۱) مشاهده می‌شود. به منظور تأمین بار آبی لازم برای تشکیل پرش هیدرولیکی در

1- Khadar and Rajagopal
2- McCorquodal and Mohamed

اعداد فرود مختلف، مخزنی به ارتفاع یک متر در بالادست دریچه کشویی بالادست احداث گردید. در تمامی آزمایش‌ها بازشدگی دریچه بالادست ثابت و برابر سه سانتی‌متر بود و با افزایش دبی پرش هیدرولیکی در اعداد فرود مختلف ایجاد گردید. زبری‌های به کار رفته در این تحقیق، که در شکل (۲) نشان داده شده است، از جنس EPS با مقطع نیم‌دایره به طول ۲۵ سانتی‌متر و سه ارتفاع زبری (سانتی‌متر ۳/۵ و ۲/۵، r= ۱/۵) ساخته شده‌اند. برای ایجاد بسترهای زبر، زبری‌های نیم استوانه‌ای شکل ساخته شده با ارتفاع مشخص در فاصله یک تا چهار برابر قطر نیم استوانه‌ها (s=۱D, ۲D, ۳D, ۴D) قرار گرفتند. ابتدای حوضچه هم‌تراز با کف کاذب بالادست قرار داده شد و بر اساس طول حوضچه و زاویه شیب، که در این تحقیق شیب افقی، معکوس ۱ و ۱/۵درصد بود، ارتفاع پایین‌دست حوضچه محاسبه و کف کاذب پایین‌دست بر اساس آن ساخته شد (شکل ۲). بستر زبر روی حوضچه به گونه‌ای قرار می‌گرفت که تاج زبری اول هم‌تراز کف بالادست و تاج زبری آخر هم‌تراز کف پایین دست قرار گرفت. مشخصات فیزیکی بسترهای زبر در جدول (۱) مشاهده می‌شود.



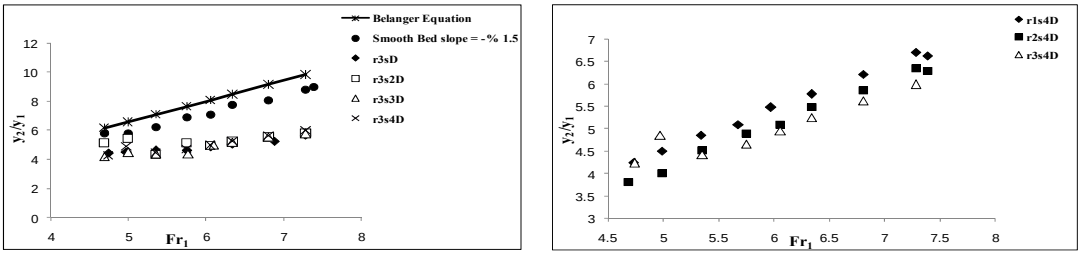
شکل۲- زبری‌های نیم استوانه‌ای شکل با ارتفاع ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ سانتی‌متر و نمای کلی فلوم

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی بسترهای زبر

نام بستر	r(cm)	D=2r (cm)	s(cm)	r/s	نام بستر	r(cm)	D=2r (cm)	s(cm)	r/s
r_1s_{1D}	۱/۵	۳	(S=D=2r)۳	۰/۵	r_2s_{3D}	۲/۵	۵	(S=۳D)۱۵	۰/۱۶۷
r_1s_{2D}	۱/۵	۳	(S=۲D)۶	۰/۲۵	r_2s_{4D}	۲/۵	۵	(S=۴D)۲۰	۰/۱۲۵
r_1s_{3D}	۱/۵	۳	(S=۳D)۹	۰/۱۶۷	r_3s_D	۳/۵	۷	(S=D)۷	۰/۵
r_1s_{4D}	۱/۵	۳	(S=۴D)۱۲	۰/۱۲۵	r_3s_{2D}	۳/۵	۷	(S=۲D)۱۴	۰/۲۵
$r_2\ s_{1D}$	۲/۵	۵	(S=۱D)۵	۰/۵	r_3s_{3D}	۳/۵	۷	(S=۳D)۲۱	۰/۱۶۷
r_2s_{2D}	۲/۵	۵	(S=۲D)۱۰	۰/۲۵	r_3s_{4D}	۳/۵	۷	(S=۴D)۲۸	۰/۱۲۵

جدول ۲- محدوده پارامترهای بی بعد

پارامترهای بی بعد	دامنه تغییرات
Fr_1	۴/۶-۷/۴
Re_1	۵۷۶۷۳-۷۴۹۸۳
r/s	۰/۱۲۵-۰/۵
y_2/y_1	۳/۷۹۷-۷/۱۳۶
θ	۰-۰/۸۵۹°



(الف) **(ب)**

شکل ۳- تاثیر ارتفاع و فاصله زبری‌ها بر تغییرات عمق مزدوج نسبی پرش در شیب معکوس ۱/۵درصد

اندازه گیری دبی جریان با استفاده از سرریز مثلثی لبه تیز واسنجی شده با زاویه رأس ۵۳ درجه تعبیه شده در انتهای فلوم، انجام گرفت. محدوده دبی جریان از۱۴/۶ تا ۱۸/۷ لیتر بر ثانیه بود و در مجموع ۲۳۸ آزمایش بر روی ۱۲ بستر زبر در محدوده عدد فرود اولیه ۴/۶ تا ۷/۴ انجام گرفت. عمق آب با استفاده از عمق سنج با دقت ۰/۱ میلی‌متر و عکس‌برداری دیجیتالی پی در پی (۱۰ عکس) از پرش هیدرولیکی و رقومی کردن آن توسط نرم‌افزار Grafer5 اندازه گیری و میانگین دو مقدار به دست آمده به عنوان عمق آب در محل مورد نظر ثبت گردید (قابل ذکر است که در تمامی آزمایش‌ها فاصله و زاویه دوربین نسبت به کانال ثابت می‌باشد).

طول پرش هیدرولیکی از طریق اشل نواری نصب شده بر روی بدنه فلوم و پروفیل سرعت با استفاده از سرعت سنج پره‌ای میکرو با دقت ۰/۱ سانتی‌متر بر ثانیه اندازه‌گیری گردید.

تحلیل ابعادی

پارامترهای مؤثر بر خصوصیات پرش هیدرولیکی بر روی بستر شیب‌دار و زبر را می‌توان بصورت تابع زیر بیان نمود :

$$f_1(\rho, \nu, y_1, y_2, V_1, L_j, g, s, r, \theta) = 0 \qquad (۱)$$

در این رابطه ρ : جرم مخصوص، ν : لزجت سینماتیکی آب،g: شتاب ثقل، r: ارتفاع زبری، s: فاصله بین زبری‌ها، L_j : طول پرش هیدرولیکی، θ: شیب بستر، V_1 : سرعت اولیه، y_1 : عمق اولیه و y_2 : عمق ثانویه پرش می‌باشند. رابطه (۱) را به صورت تابع بدون بعد زیر می‌توان ساده کرد:

$$f_2\left(\frac{y_2}{y_1}, \frac{L_j}{y_1}, Fr = \frac{V_1}{\sqrt{g y_1}}, Re = \frac{V_1 y_1}{\nu}, \frac{r}{y_1}, \frac{s}{y_1}, \theta\right) = 0 \qquad (۲)$$

از آنجایی که اعداد رینولدز در آزمایش‌ها در محدوده ۷۴۹۸۳< Re_1 <۵۷۶۷۳ قرار داشته و در این محدوده از اعداد رینولدز در جریان کاملاً متلاطم زبر قرار می‌گیرد، لذا می‌توان از اثر لزوجت صرف نظر کرد، همچنین با تقسیم دو پارامتر بی بعد r/y_1 و s/y_1 بر یکدیگر رابطه (۲) به صورت زیر ساده می‌شود:

$$f_3\left(\frac{y_2}{y_1}, \frac{L_j}{y_1}, Fr_1, \frac{r}{s}, \theta\right) = 0 \qquad (۳)$$

پارامتر $\frac{r}{s}$: نسبت ارتفاع زبری بر فاصله بین زبری‌ها است و تأثیر ابعاد زبری‌ها را بر خصوصیات پرش هیدرولیکی نشان می‌دهد. محدوده پارامترهای بی بعد برای تمام آزمایش‌ها در جدول (۲) مشاهده می‌شود.

با استفاده از رابطه (۳) می‌توان عمق مزدوج نسبی پرش هیدرولیکی را به صورت رابطه زیر بیان نمود:

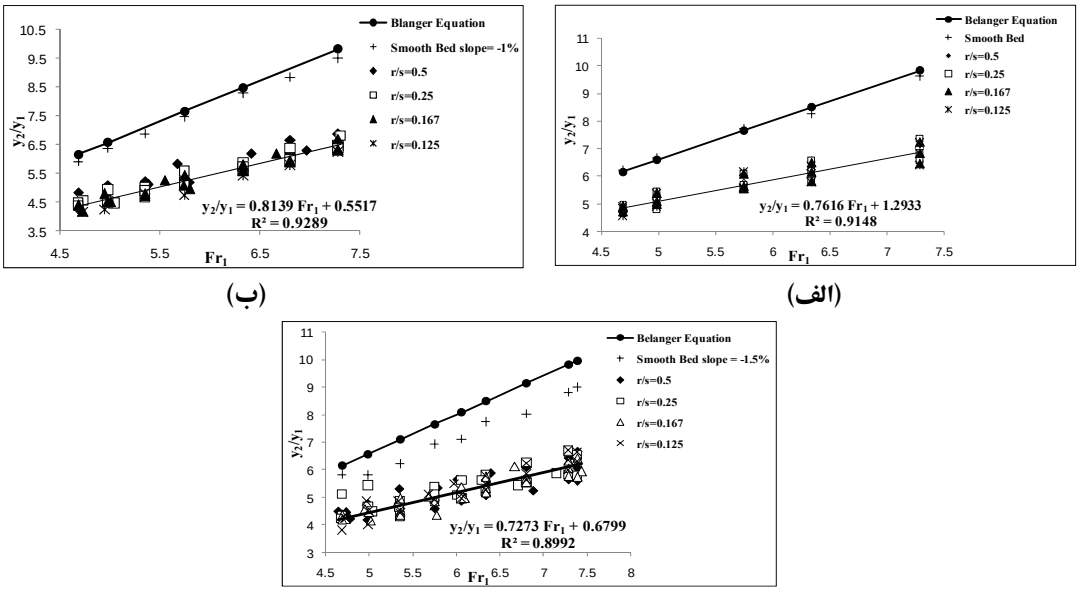
$$\frac{y_2}{y_1} = f_4\left(Fr_1, \frac{r}{s}, \theta\right) \qquad (۴)$$

نتایج و بحث

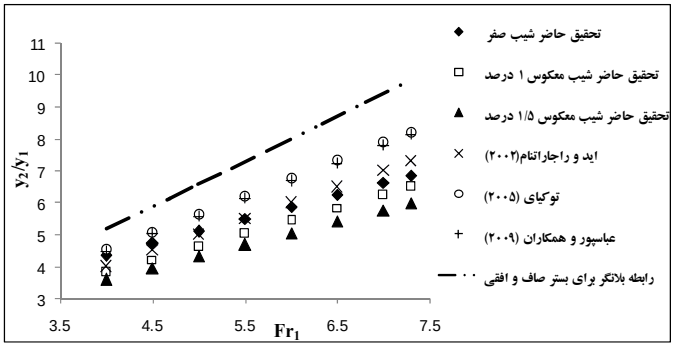
عمق مزدوج نسبی پرش هیدرولیکی

بر اساس تحلیل ابعادی، در پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر با شیب معکوس، عمق مزدوج نسبی ($\frac{y_2}{y_1}$) به شیب بستر (θ)، عدد فرود اولیه (Fr_1) و نسبت زبری نسبی $\frac{r}{s}$ بستگی دارد.

در شکل (۳-الف) تأثیر ارتفاع زبری‌ها بر تغییرات عمق مزدوج نسبی پرش به ازای اعداد فرود اولیه برای سه ارتفاع مختلف زبری با فاصله بین زبری ۴D (۸r) و در شکل (۳-ب) تأثیر فاصله زبری‌ها را برای فواصل مختلف زبری با ارتفاع ۳/۵ سانتی‌متر در شیب معکوس۱/۵درصد نشان داده شده است. با افزایش ارتفاع زبری و فاصله بین زبری‌ها، عمق مزدوج نسبی کاهش یافته، که این کاهش می‌تواند ناشی از افزایش عملکرد گرداب‌ها در فضای بین زبری‌ها باشد، این روند با افزایش عدد فرود و شیب معکوس بیشتر می‌گردد.



شکل ۴- مقایسه تغییرات عمق مزدوج نسبی پرش به ازای اعداد فرود اولیه برای مقادیر مختلف r/s



شکل ۵- مقایسه تغییرات عمق مزدوج نسبی به ازای اعداد فرود اولیه تحقیق حاضر و نتایج سایر محققین

در شکل‌های (۴-الف)، (۴-ب) و (۴-ج) مقادیر عمق مزدوج نسبی به ازای اعداد فرود اولیه در چهار نسبت $\frac{r}{s}$ به ترتیب در شیب صفر، ۱درصد — و ۱/۵درصد - نشان داده شده‌اند. به طور کلی با توجه به نتایج به دست آمده، زبری بستر باعث کاهش عمق ثانویه شده و افزایش عدد فرود و شیب معکوس این روند را افزایش می‌دهد. روابط بین عمق مزدوج نسبی و عدد فرود با استفاده از رگرسیون خطی تعیین شد و رابطه‌های (۵) تا (۷) به ترتیب برای شیب صفر، ۱درصد - و ۱/۵درصد - بدست آمد:

- در شیب صفر

$$\frac{y_2}{y_1} = 0.7616 Fr_1 + 1.2933 \qquad (۵)$$

$$R^2 = 0.9148$$

- در شیب ۱درصد-

$$\frac{y_2}{y_1} = 0.8139 Fr_1 + 0.5517 \qquad (۶)$$

$$R^2 = 0.9289$$

- در شیب ۱/۵درصد-

$$\frac{y_2}{y_1} = 0.7273 Fr_1 + 0.6799 \qquad (۷)$$

$$R^2 = 0.8992$$

در شکل (۵) نتایج به دست آمده عمق مزدوج نسبی این تحقیق با سایر محققین مقایسه شده است. با توجه به شکل، عمق مزدوج نسبی در بستر زبر با شیب معکوس ۱/۵ درصد در این تحقیق کمتر از نتایج به دست آمده از سایر محققین می‌باشد.

با افزایش ارتفاع و فاصله بین زبری‌ها عمق مزدوج نسبی کاهش می‌یابد، که این کاهش ناشی از افزایش عملکرد گرداب‌ها در فضای بین زبری‌ها بوده و این روند با افزایش عدد فرود و شیب معکوس بیشتر می‌گردد. از آنجایی‌که در شیب معکوس، مؤلفه نیروی وزن در امتداد بستر در جهت عکس با جهت جریان بوده و عاملی در کوتاه کردن طول پرش و به تبع آن کاهش نسبت y_2/y_1 می‌باشد و لذا پرش در فاصله کوتاه‌تر و با افت انرژی بیشتر شکل می‌گیرد. همچنین با با افزایش عدد فرود اولیه میزان ضریب نیروی برشی بستر های زبر نسبت به بستر صاف افزایش یافته که می‌توان دلیل آن را افزایش نیروی برشی بستر به دلیل افزایش تلاطم و جریان های گردابه‌ای در داخل زبری های بستر دانست.

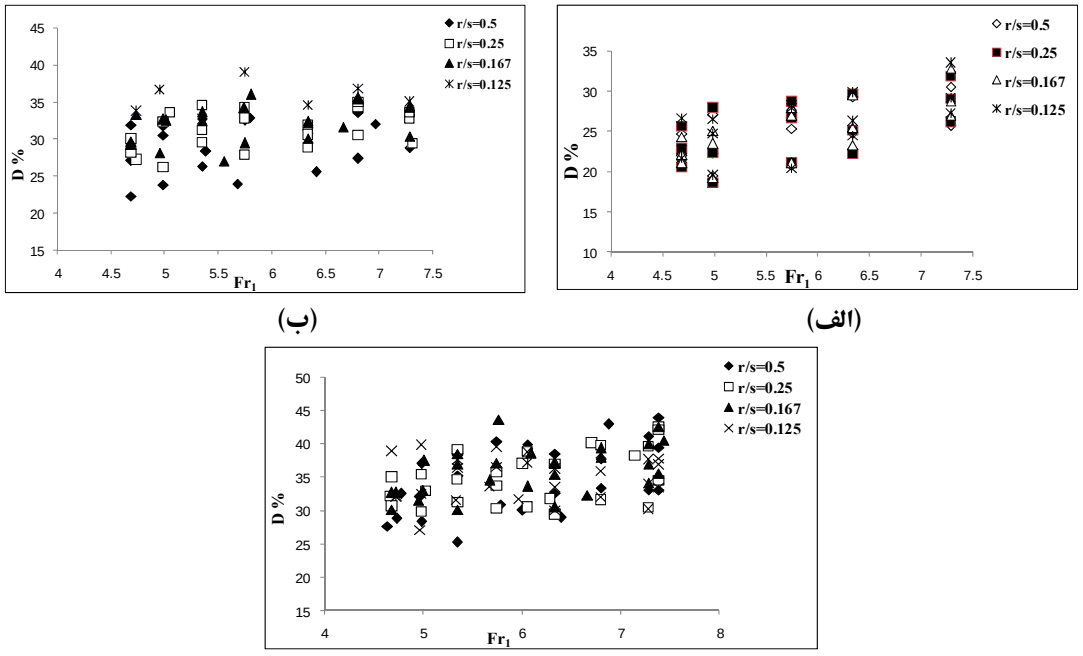
کاهش نسبی عمق ثانویه پرش هیدرولیکی(D%)

پارامتر کاهش نسبی عمق ثانویه پرش (D) با استفاده از رابطه (۸) ارائه شده توسط اید و راجاراتنام (۷) محاسبه گردید و در شکل (۶–الف)، (۶–ب) و (۶–ج) تغییرات مقادیر D در محدوده اعداد فرود ۴/۶ تا ۷/۴ برای محدوده ۰/۵ > $\frac{r}{s}$ > ۰/۱۲۵ به ترتیب برای شیب صفر، ۱درصد– و ۱/۵درصد– نشان داده شده است.

$$D = \frac{y_2^* - y_2}{y_2^*} \qquad (۸)$$

در این رابطه، y_2: عمق ثانویه پرش در بستر زبر و y_2^*: عمق ثانویه پرش در بستر صاف افقی به ازای عمق اولیه y_1 و عدد فرود یکسان با بستر زبر می‌باشد. متوسط کاهش نسبی عمق ثانویه در شیب صفر برابر ۲۵/۳۵ درصد، در شیب ۱درصد– برابر ۳۲/۱۲ درصد و در شیب معکوس ۱/۵درصد برابر ۳۶ درصد به دست آمد که مقادیر قابل ملاحظه‌ای بوده و از آنجایی که ارتفاع پرش معیار مهمی در طراحی حوضچه‌ها است، به نظر می‌رسد استفاده از بستر زبر و شیب معکوس در طراحی حوضچه آرامش در مقایسه با بستر صاف مقرون به صرفه باشد.

مقدار متوسط پارامتر کاهش عمق در تحقیق اید و راجاراتنام (۷) ۲۵ درصد، توکیای (۱۵) ۲۵ درصد، عباسپور و همکاران (۳) ۲۰ درصد و در تحقیق ابراهیم و شزی (۹) ۳۷ درصد به دست آمد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت مقدار متوسط D در این تحقیق نسبتاً قابل ملاحظه می‌باشند.



شکل ۶- تغییرات کاهش نسبی عمق ثانویه پرش به ازای اعداد فرود اولیه برای مقادیر مختلف r/s

افت نسبی انرژی پرش هیدرولیکی

افت نسبی انرژی پرش هیدرولیکی از اختلاف انرژی مخصوص ابتدا و انتهای پرش محاسبه شد. در شکل (۷–الف)، (۷–ب) و (۷–ج) مقادیر افت نسبی انرژی در برابر اعداد فرود اولیه به ترتیب برای شیب صفر، معکوس ۱درصد و معکوس ۱/۵درصد با مقادیر افت انرژی نسبی در بستر صاف افقی و بسترهای صاف با شیب معکوس مقایسه شده‌اند. مطابق نمودارهای‌های ترسیم شده به ازای اعداد فرود یکسان افت انرژی در بسترهای زبر بیشتر از بسترهای صاف است. با افزایش شیب معکوس این روند افزایش می‌یابد و تغییر در ارتفاع و فاصله تاثیر ناچیزی بر افت انرژی نسبی دارد. میزان

افت انرژی در شیب افقی ۱۸/۱ درصد و در شیب معکوس ۱/۵درصد، ۲۳ درصد نسبت به پرش کلاسیک افزایش می‌یابد. روابط (۹) تا (۱۱) روند تغییرات بین افت نسبی انرژی پرش با اعداد فرود اولیه با استفاده از رگرسیون غیر خطی و ضرایب تبیین با توجه به شکل های زیر به شرح زیر می‌باشند:

- در شیب صفر

$$\frac{E_L}{E_1} = 0.0088Fr_1^2 + 0.1723Fr_1 \quad 0.0553 \qquad (۹)$$

$$R^2 = 0.9756$$

- در شیب ۱درصد-

$$\frac{E_L}{E_1} = 0.0106Fr_1^2 + 0.1856Fr_1 \quad 0.0503 \qquad (۱۰)$$

$$R^2 = 0.9614$$

- در شیب ۱/۵درصد-

$$\frac{E_L}{E_1} = 0.012Fr_1^2 + 0.2053Fr_1 \quad 0.1068 \qquad (۱۱)$$

$$R^2 = 0.9419$$

درصد افزایش افت انرژی پرش هیدرولیکی (G%)

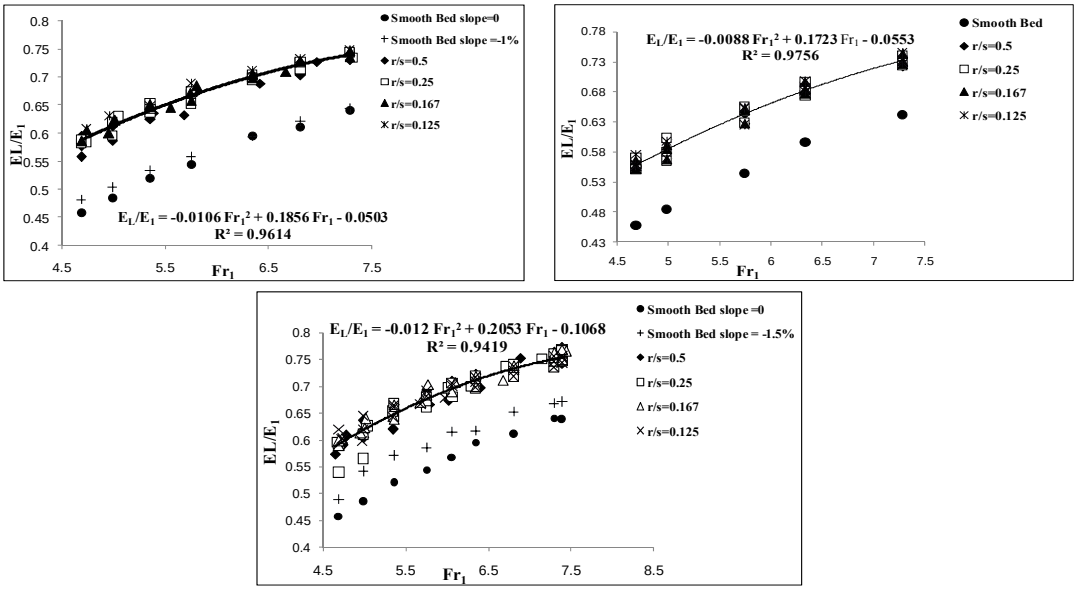
درصد افزایش افت انرژی پرش در بستر زبر نسبت به بستر صاف با استفاده از رابطه (۱۲) ارائه شده توسط توکیای (۱۵) محاسبه شد و نتایج به صورت شکل (۸-الف)، (۸-ب) و (۸-ج) به ترتیب برای شیب افقی، معکوس ۱درصد و معکوس ۱/۵درصد ارائه شده‌اند.

$$G = \frac{E_{L_2} - E_{L_2}^*}{E_{L_2}^*} \qquad (۱۲)$$

در این رابطه $E_{L_2}^*$ و E_{L_2} به ترتیب افت انرژی پرش در بستر صاف افقی و بستر زبر در عمق اولیه و عدد فرود یکسان می‌باشند. بررسی نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود درصد افزایش افت انرژی کاهش می‌یابد. این روند می‌تواند ناشی از افزایش سرعت و عبور جریان از روی تاج زبری‌ها امکان ایجاد گرداب‌های بزرگتر کم شده و لذا با افزایش عدد فرود تاثیر زبری کم می‌شود. بررسی نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود درصد افزایش افت انرژی کاهش می‌یابد. این روند می‌تواند ناشی از این باشد که با افزایش سرعت، جریان آب از روی تاج زبری‌ها سریع‌تر عبور کرده و امکان ایجاد گرداب‌های بزرگ کمتر شده و لذا با افزایش عدد فرود تاثیر زبری نیز کمتر می‌شود.

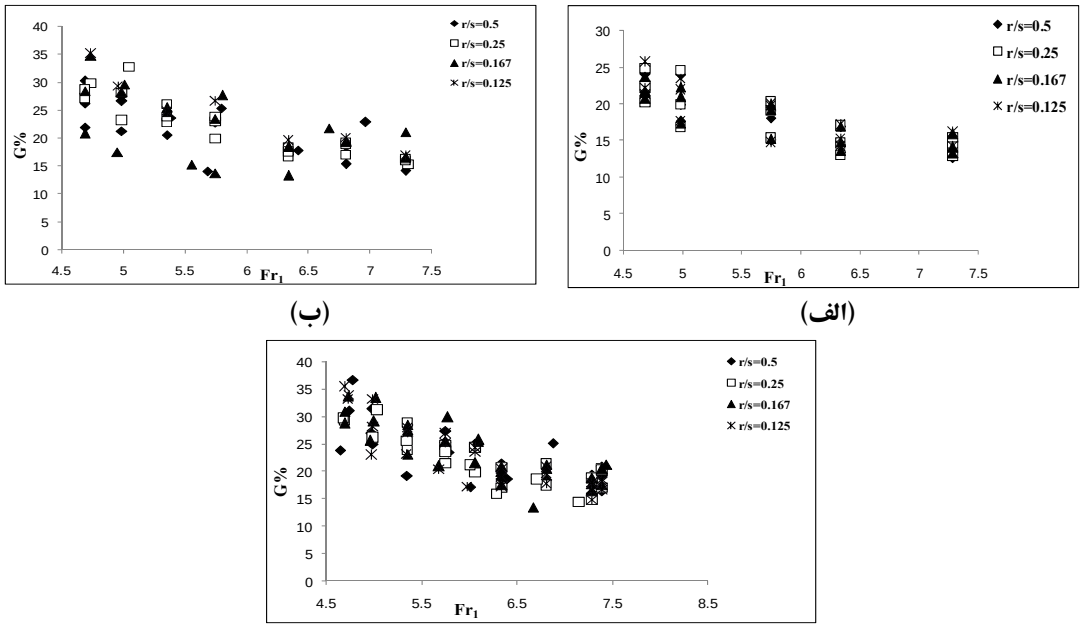
تنش برشی بستر

ضریب نیروی برشی ε در بستر صاف و زبر با استفاده از رابطه ارائه شده توسط راجاراتنام به صورت زیر قابل محاسبه است (۷):



(ج)

شکل ۷- تغییرات افت انرژی نسبی پرش به ازای اعداد فرود اولیه برای مقادیر مختلف r/s



شکل ۸- تغییرات درصد افزایش افت انرژی پرش به ازای اعداد فرود اولیه برای مقادیر مختلف r/s

$$\varepsilon = \frac{F_\tau}{\gamma y_1^2/2} \qquad (۱۳)$$

در این تحقیق تنش برشی بستر زبر افقی با استفاده از رابطه (۱۳) و برای بستر صاف افقی از رابطه (۱۴) با تجزیه تحلیل داده‌های آزمایشگاهی محاسبه شده است:

$$\varepsilon = 0.16\,Fr_1^2 \quad 0.8\,Fr_1 + 1 \qquad (۱۴)$$

برای محاسبه تنش برشی بستر زبر روی شیب معکوس نیز از رابطه (۱۳) استفاده شد. لازم به ذکر است که در معادله اندازه حرکت برای تعیین F_τ پارامتر وزن آب روی شیب به معادله اضافه گردید. جهت محاسبه وزن آب بر روی شیب معکوس از پروفیل سطح آب استفاده گردید که با محاسبه مساحت زیر سطح آب پرش هیدرولیکی با استفاده از نرم افزار اتوکد حجم آب محاسبه و با ضرب کردن این مقدار در وزن مخصوص آن وزن آب بر روی شیب معکوس به دست آمد. از آنجایی که محیط پرش هیدرولیکی به دلیل اختلاط آب و هوا محیط دو فازی می‌باشد به‌منظور سادگی محاسبات محیط تک فازی منظور گردید.

تغییرات ضریب تنش برشی بستر به ازای اعداد فرود اولیه برای همه آزمایش‌ها به همراه نتایج پرش روی بستر صاف افقی در شکل (۹-الف)، (۹-ب) و (۹-ج) به‌ترتیب در شیب افقی و معکوس ۱و ۱/۵ درصد نشان داده شده است. به‌طور کلی ضریب تنش برشی بستر با افزایش عدد فرود در هر دو بستر صاف و زبر افزایش می‌یابد. مقدار متوسط ضریب تنش برشی بستر در حالت بستر زبر افقی ۱۳ برابربستر صاف، در بستر زبر روی شیب معکوس ۱ درصد ۱۵ برابر بستر صاف افقی و در بستر زبر روی شیب معکوس ۱/۵ درصد ۱۶ برابر بستر صاف به دست آمد. با استفاده از رگرسیون غیرخطی روند تغییرات ضریب تنش برشی بستر با اعداد فرود اولیه به صورت روابط (۱۵) تا (۱۷) با توجه به شکل‌های (۹-الف) تا (۹-ج) به شرح زیر استخراج گردید:

- در شیب صفر

$$\varepsilon = 1.8761 Fr_1^2 \quad 9.9052 Fr_1 + 17.709 \qquad (۱۵)$$
$$R^2 = 0.9678$$

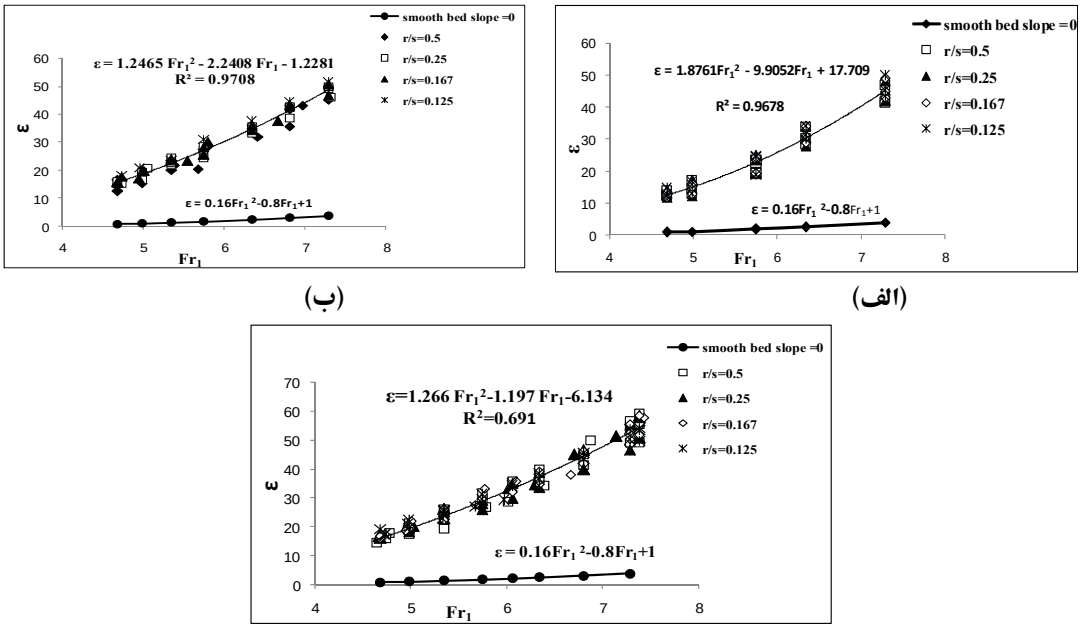
- در شیب ۱درصد-

$$\varepsilon = 1.2465 Fr_1^2 \quad 2.2408 Fr_1 \quad 1.2281 \qquad (۱۶)$$
$$R^2 = 0.9708$$

- در شیب ۱/۵درصد-

$$\varepsilon = 1.2668 Fr_1^2 \quad 1.1974 Fr_1 \quad 0.1344 \qquad (۱۷)$$
$$R^2 = 0.961$$

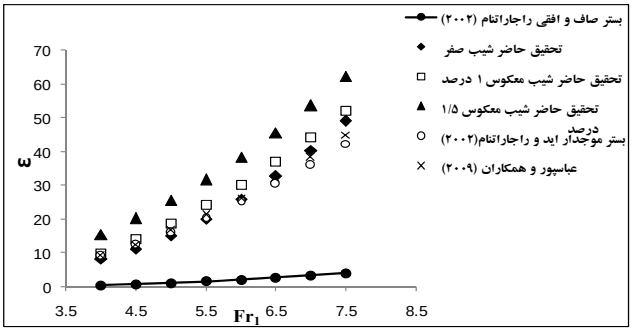
مقایسه بین نتایج به دست آمده ضریب تنش برشی بستر در این تحقیق با نتایج سایر محققین در شکل (۱۰) نشان داده شده است، به طوری‌که در شکل دیده می‌شود، ضریب تنش برشی بستر درحالت پرش بر روی بستر زبر با شیب معکوس ۱/۵ درصد در این تحقیق بیشتر از نتایج به دست آمده توسط سایر محققین می‌باشد.



(ب) (الف)

(ج)

شکل۹- مقایسه تغییرات ضریب تنش برشی بستر به ازای اعداد فرود اولیه برای مقادیر مختلف r/s



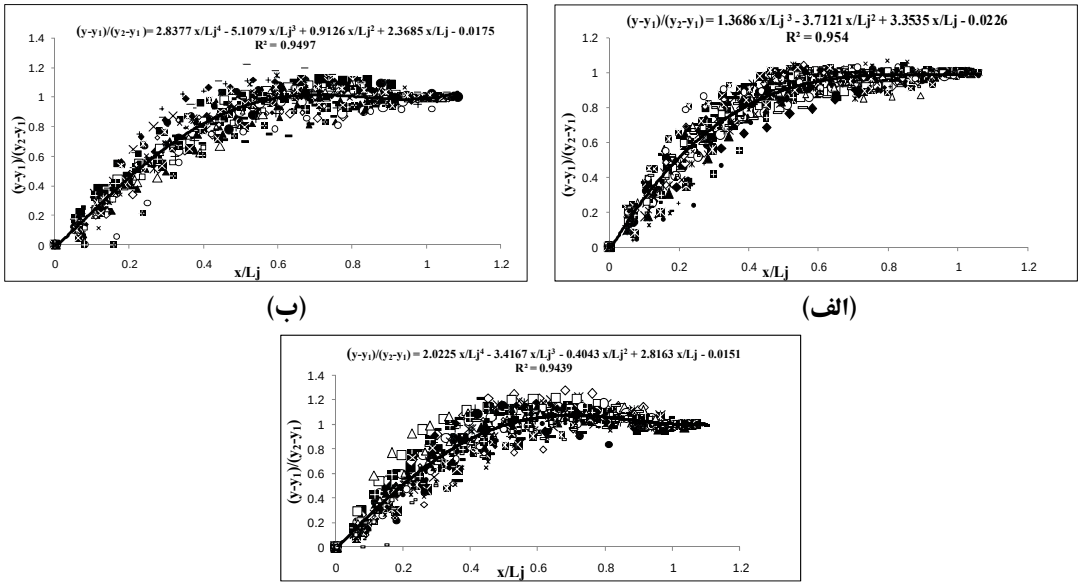
شکل۱۰- مقایسه تغییرات ضریب تنش برشی بستر به ازای اعداد فرود اولیه تحقیق حاضر با نتایج سایر محققین

پروفیل‌های سطح آب

پروفیل‌های سطح آب با استفاده از تصاویر ثبت شده از سطح جریان پرش هیدرولیکی، برای همه آزمایش‌ها به دست آمد. با رسم مقادیر بی بعد $\frac{x}{L_j}$ و $\frac{y \quad y_1}{y_2 \quad y_1}$ در مقابل یکدیگر، پروفیل بی بعد سطح پرش هیدرولیکی به دست آمد. پروفیل بی بعد سطح آب برای همه بسترهای زبر در شکل‌های (۱۱-الف)، (۱۱-ب) و (۱۱-ج) به ترتیب در شیب بستر افقی، معکوس یک و ۱/۵ درصد ترسیم و برای هریک، منحنی متوسطی برازش داده شد.

پروفیل‌های سرعت

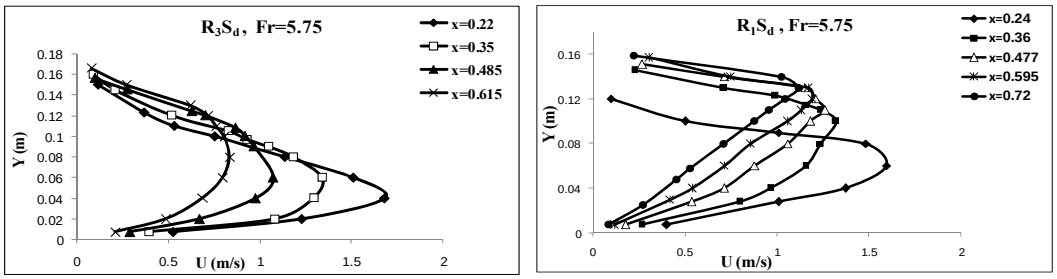
پروفیل سرعت برای هر بستر زبر در دو عدد فرود در شیب صفر و شیب معکوس ۱درصد در طول پرش هیدرولیکی، از محل اتصال زبری‌ها به بستر تا سطح آب، اندازه‌گیری گردید. در شکل (۱۲-الف) و (۱۲-ب) به ترتیب پروفیل‌های برداشت شده برای شیب افقی و معکوس یک درصد نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش فاصله از ابتدای پرش (x) سرعت حداکثر کاهش می‌یابد.



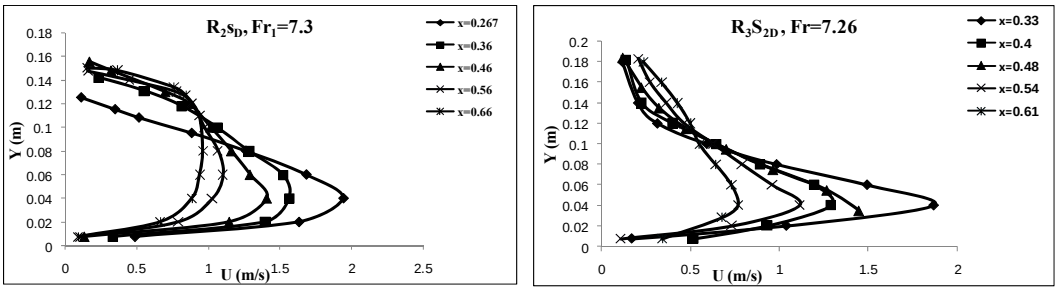
(الف) (ب)

(ج)

شکل۱۱- پروفیل‌های بی‌بعد سطح آب برای همه بسترهای زبر



(الف)



(ب)

شکل۱۲- پروفیل‌های سرعت پرش‌هیدرولیکی بر روی بستر زبر

نتیجه‌گیری

۱- عمق مزدوج نسبی برای محدوده اعداد فرود اولیه ۴/۶ تا ۷/۴ در بستر زبر بر روی شیب افقی حداکثر ۳۳/۵درصد و بر روی شیب معکوس ۱/۵ درصد حداکثر ۴۴درصد نسبت به پرش بر روی بستر صاف و افقی در شرایط عمق اولیه و عدد فرود معین کاهش می‌یابد. افزایش فاصله بین زبری‌ها نسبت به افزایش ارتفاع زبری‌ها تاثیرکاهشی کمتری داشته به طوریکه با افزایش

فاصله تنها به طور متوسط یک درصد و با افزایش ارتفاع هشت درصد تغییر می‌کند.

۲- افت انرژی پرش در بستر زبر بر روی شیب افقی و معکوس ۱/۵درصد حداکثر ۲۵درصد و ۳۷درصد نسبت به پرش بر روی بستر صاف و افقی در شرایط عمق اولیه و عدد فرود معین افزایش می‌یابد.

۳- ضریب تنش برشی بستر در بستر زبر با افزایش شیب معکوس افزایش می‌یابد. در شیب افقی به طور متوسط ۱۳ برابر و در شیب معکوس ۱/۵ درصد ۱۶/۴ برابر بستر صاف و افقی به دست آمد.

۴- ازجمله دلایل اصلی کاهش عمق ثانویه و افزایش افت انرژی در پرش‌های تشکیل شده روی بسترهای زبر با شیب معکوس، تأثیر جهت عکس مؤلفه نیروی وزن و افزایش نیروی برشی ناشی از زبری‌ها در بستر پرش می‌باشد.

۵- پروفیل سطح آب برای همه آزمایش‌های انجام شده در شیب های مختلف توسط منحنی متوسطی برازش داده شد.

۶- پروفیل‌های سرعت برای آزمایش‌های روی شیب صفر و معکوس یک درصد برای دو عدد فرود اندازه گیری گردید. تغییرات پروفیل‌های سرعت نشان داد که با افزایش فاصله از ابتدای پرش لایه مرزی رشد نموده و سرعت حداکثر کاهش می‌یابد.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از گزارش نهایی پایان نامه کارشناسی ارشد به شماره ۸-۱۳۹۰ مورخ ۱۳۹۰/۶/۱۶ می‌باشد که از محل اعتبارات پژوهشی دانشگاه تبریز اجرا شده است. از حمایت مالی دانشگاه تبریز تشکر می‌گردد.

منابع

۱- ابریشمی، ج. و س. م. حسینی. ۱۳۸۷. هیدرولیک کانال‌های روباز، انتشارات آستان قدس رضوی، چاپ نوزدهم، ۶۱۳ صفحه.

۲- شفاعی بجستان، م. و ک. نیسی. ۱۳۸۸. بررسی عمق مزدوج پرش هیدرولیکی تحت تاثیر اجزای زبر کف. مجله دانش آب و خاک، جلد نهم، شماره یک، صفحات: ۱۶۵-۱۷۶.

3- Abbaspour, A., Hosseinzadeh Dalir, A., Farsadizadeh, D., and A. A. Sadraddini. 2009. Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics. Journal of Hydro-environment Research, 3: 109-117.

4- Abrishami, J. and M. Saneie. 1994. Hydraulic jump in adverse basin slopes. International Journal of Water Research Engineering, 21: 51-63.

5- Beirami, M. K. and M. R. Chamani. 2006. Hydraulic jumps in sloping channels: Sequent depth ratio. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 132(10): 1051-1068.

6- Carollo, F. G., Ferro,V. and V. pampalone. 2007. Hydraulic jumps on rough beds. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 133: 989-999.

7- Ead, S. A. and N. Rajaratnam. 2002. Hydraulic jump on corrugated bed. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 128(7): 656-663.

8- Gohari, A. and J. Farhoudi. 2009. The characteristics of hydraulic jump on rough bed stilling basins. 33rd IAHR Congress, Water Engineering for a Sustainable Environment, Vancouver, British Columbia, August 9-14.

9- Ibrahim, H. E., and S. Shazy. 2010. Formation of hydraulic properties over a rough bed. Journal of Civil and Environmental Engineering, IJCEE-IJENS, 1(10): 40-50.

10- Izadjoo, F. and M. Shafai-Bejestan. 2007. Corrugated bed hydraulic jump stilling basin. Journal of Applied Science, 7: 1164-1169.

11- Khadar, M. H. A., and S. Rajagopal. 1972. Hydraulic jump in adverse channel slopes. Journal of Irrigation. Pwr. India, 29: 77- 82.

12- Mc Corquodale, J. A. and M. S. Mohamed. 1994. Hydraulic jump on adverse slopes. Journal of Hydraulic Research, 31(1): 119-130.

13- Mohammad Ali, H. S. 1991. Effect of roughened-bed stilling basin on lengh of rectangular hydraulic jumps. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 117(1): 83-93.

14- Nikmehr, S. and A. Tabebordbar. 2009. Hydraulic jumps on adverse slope in two cases of rough and smooth bed. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 2(1): 19-22.

15- Tokyay, N. D. 2005. Effect of channel bed corrugations on hydraulic jumps. Global Climate Change Conference, EWRI, May 15-19, Anchorage, Alaska, USA, Doi: 1.1061/40792(173)408, pp.408-416.