

بررسی پروفیل سطح آب و سرعت در پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر با شیب معکوس

ناهید پورعبداللہ*^۱، تورج هنر^۲ و روح الله فتاحی^۳

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۸/۲۸ تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۴/۱۷

^۱ دانشجوی سابق کارشناس ارشد آبیاری و زهکشی بخش آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

^۲ دانشیار بخش آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

^۳ استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Nahid7760@yahoo.com

چکیده

مطالعه بر روی کاهش انرژی جریان به منظور کاهش خسارت بر ابنیه پایین‌دست همواره از موضوعات مورد توجه محققین بوده است. یکی از عمده‌ترین مباحث در این زمینه بررسی پرش هیدرولیکی و نحوه کنترل آن می‌باشد. همانند هر سازه دیگر در ساخت سازه‌های کاهنده انرژی جریان نیز، منظور نمودن عوامل اقتصادی و سهولت اجرا، موضوعی اساسی است. لذا در این تحقیق اثر زبری و شیب منفی بستر بر پروفیل سرعت و سطح آب پرش هیدرولیکی در اعداد فرود اولیه ۴/۹ تا ۷/۸، در سه زبری متفاوت بستر و شیب‌های صفر، ۰/۶٪، ۱/۳٪ و ۲٪ بررسی شد. نتایج حاکی از تشابه پروفیل‌های سرعت اندازه‌گیری شده و تفاوت آن‌ها با پروفیل جت آب بر روی بستر صاف بود. همچنین ضخامت لایه مرزی بی‌بعد برابر ۰/۶۶ محاسبه شد که در مقایسه با بستر صاف (۰/۱۶) قابل ملاحظه بود. ضمن آن که تنش برشی در بستر زبر همراه با شیب منفی کف حداقل ۱۰ برابر تنش برشی بر روی بستر صاف بدست آمده و نیز ضرایب تصحیح انرژی و ممنتوم نسبت به حالت کلاسیک بیشتر بودند.

واژه‌های کلیدی: پرش هیدرولیکی، پروفیل سرعت، پروفیل سطح آب، زبری، شیب معکوس

Investigation of Water Velocity and Surface Profile in Hydraulic Jump over Rough Bed with Adverse Slope

N Pourabdollah^{1*}, T Honar² and R Fatahi³

Received: 19 November 2013

Accepted: 8 July 2014

¹- M.Sc. Student, Water Engin. Depart, College of Agriculture, Shiraz University, Iran

²- Assoc. Prof., Water Engin. Depart, College of Agriculture, Shiraz University, Iran

³- Assist. Prof., Water Engin. Depart, College of Agriculture, Shahrekord University, Iran

* Corresponding Author, Email: nahid7760@yahoo.com

Abstract

Study on the reduction of flow energy intensity in order to reduce damage of the downstream hydraulic structures, always has been one of the potential interesting issues. One of the most important topics in this field is the study on hydraulic jump and its control method. Like other structures, in energy dissipaters considering economic and ease of construction is an essential issue. Therefore, in this study, the effects of the roughness and negative bed slope on water level and velocity profiles of hydraulic jumps for upstream flow in Froude numbers ranges of 4.9-7.8, with three different bed roughnesses and slopes of 0%, 3.1%, 60%, and % 2 were studied. The results indicated some similarities between the measured velocity profiles and some differences between the profiles of water jets as compared with those on smooth beds. Also, the thickness of the dimensionless boundary layer was calculated to be 0.66, which was significantly different in comparison with its value for the flat bed (0.16). Moreover, the bed shear stress on the rough negative sloping bed was at least 10 times greater than the shear stress on the smooth flat bed. Also, the energy and momentum correction coefficients were higher relative to the classic mode.

Keywords: Adverse slope, Hydraulic jump, Roughness, Velocity profile, Water surface profile

سرعت در جداره‌ها صفر بوده و با فاصله گرفتن از آن ها افزایش می‌یابد. ب) گرادیان سرعت در مجاورت مرزها شدیدتر است. ج) سرعت حداکثر در هر مقطع قائم، در نزدیکی سطح آب و در فاصله ۰/۰۵ تا ۰/۲۵ عمق جریان از سطح آزاد آن اتفاق می‌افتد. دلیل اصلی این عدم یکنواختی سرعت، نیروی برشی ناشی از مقاومت هوا و بیش از آن جریان‌های ثانویه ضعیف می‌باشد. راجاراتنام (۱۹۶۷) مطالعات گسترده‌ای بر روی توزیع سرعت متوسط در پرش ایجاد شده در

مقدمه

با توجه به تاثیر عواملی چون لزجت آب، وجود دیواره‌ها، شیب و زبری بستر و همچنین اثر سطح آزاد آب، فرض ثابت بودن سرعت در هر مقطع جریان درست نمی‌باشد. لذا توزیع سرعت در کانال‌ها پیچیده بوده و بدست آوردن یک رابطه کلی به سادگی امکان‌پذیر نیست. براساس مطالعات تجربی در مورد توزیع سرعت در مقاطع روباز می‌توان قضاوت‌های کلی را بیان نمود (ابریشمی و حسینی ۱۳۸۵): الف) مقدار

بستر صاف ۰/۱۶ است. همچنین افت انرژی در پرش بر روی بستر موجدار را حدود ۱۱/۳ درصد بیشتر از بستر صاف عنوان کردند. صمدی بروجنی و همکاران (۲۰۱۳) مطالعات پرش را بر روی شش نوع بستر موجدار مثلثی انجام دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که نیروی برشی بر روی بستر موجدار مثلثی حدود ۸/۵ برابر بستر صاف می‌باشد. همچنین عنوان کردند نتایج تطابق خوبی با نتایج آید و راجاراتنام (۲۰۰۲)، عباسپور و همکاران (۲۰۰۹) و البسیه و شبایک (۲۰۱۰) دارد.

اصولاً هنگامی که انرژی آب بسیار زیاد است برای مستهلک نمودن آن در کوتاه‌ترین طول ممکن، اقدام به احداث حوضچه‌های آرامش می‌گردد که اغلب دارای طول زیادی می‌باشند و باعث افزایش هزینه‌ها می‌گردند. چنانچه هنگام عبور جریان از روی یک سرریز یا زیر دریچه‌ای شرایط انسداد ایجاد شود، انرژی بالادست هماهنگ با شرایط موجود به گونه‌ای تغییر می‌یابد که این تغییر باعث افزایش انرژی از مقدار اولیه به میزان حداقل انرژی لازم جهت عبور جریان از شرایط انسداد ($E_{upstream} = \Delta z + E_{min}$) می‌گردد. پس از رهایی از این وضعیت، جریان برای برگشت به شرایط نرمال نیازمند از دست دادن مقادیر زیادی از این انرژی طی یک پرش هیدرولیکی خواهد بود که در صورت عدم کنترل می‌تواند موجب تخریب پایین دست گردد. استهلاک انرژی در طی پرش مذکور باید در کوتاه‌ترین طول ممکن تحقق یابد. اینکه تا چه طولی این کاهش انرژی رخ خواهد داد قابل محاسبه است ($E_2 = E_{ups} - S_e L$) که در آن E_2 را می‌توان معادل انرژی جریان با عمق نرمال منظور نمود، لیکن به دلیل اغتشاش ناشی از تبدیل جریان فوق بحرانی به زیر بحرانی مشکل این معادله تعیین شیب انرژی است (و به همین دلیل نمی‌توان از معادله انرژی در این شرایط استفاده نمود) ولی می‌توان تصور نمود که در طی یک جریان متغیر تدریجی (تا عمق بحرانی و سپس به عمق زیر بحرانی) این جریان مهار خواهد شد. از طرفی می‌توان در راستای مهار پرش بستر حوضچه را با اندکی شیب منفی حوضچه‌های آرامش را می‌توان تقریباً معادل ارتفاع آستانه انتهائی تقسیم بر طول حوضچه منظور

پایین‌دست یک دریچه و بر روی یک کانال صاف و در محدوده اعداد فرود ۲/۶۸ تا ۹/۷۸ انجام داد. او نشان داد که پروفیل سرعت در پرش شبیه پروفیل سرعت در جت دیواری کلاسیک است. مطالعات آید و همکاران (۲۰۰۰) در کالورت با بستر موجدار نشان می‌دهد که تنش‌های برشی بر روی بسترهای موجدار به وجود آمده و این مسئله کاهش قابل توجهی در میدان‌های سرعت در مقایسه با بستر صاف را موجب می‌گردد. عباسپور و همکاران (۲۰۰۹) پروفیل‌های سرعت را در ۲۰ آزمایش پرش هیدرولیکی بر روی بستر موجدار اندازه‌گیری نمودند که در این پروفیل‌ها تغییرات سرعت به صورت جت دیواره بوده، به طوری که با افزایش فاصله از ابتدای پرش لایه مرزی رشد نموده و سرعت حداکثر کاهش می‌یابد. نتایج پژوهش ایشان نشان داد که ضریب نیروی برشی در بستر موجدار در حدود ۱۰ برابر بستر صاف بوده و رابطه رگرسیونی حاکم در بستر موجدار به صورت رابطه ۱ می‌باشد:

$$\varepsilon = 1.1Fr_1^2 - 2.4Fr_1 + 1 \quad R^2 = 0.93 \quad [1]$$

ایزدجو و شفافی بجزستان (۲۰۰۷) نیز پروفیل‌های توزیع قائم سرعت را در ۱۰ آزمایش برداشت نمودند در تحقیق نامبردگان سرعت جریان فوق بحرانی قبل از پرش بین ۱/۵۳ تا ۴/۹ متر بر ثانیه و در دورترین پروفیل برداشت شده، سرعت حداکثر بین ۰/۵ تا ۱ متر بر ثانیه متغیر بوده است. آنها برای محدوده فوق معادله ضریب تنش برشی در پرش بر روی بستر زبر را به صورت رابطه ۲ ارائه نمودند:

$$\varepsilon = 1.59Fr_1^2 - 11.857Fr_1 + 31.933 \quad R^2 = 0.97 \quad [2]$$

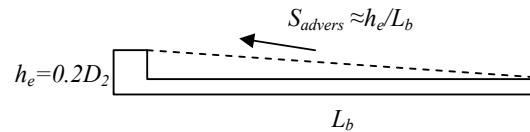
البسیه و شبایک (۲۰۱۰) نیز رابطه ۳ را برای محاسبه ضریب نیروی برشی بر روی بستر زبر ارائه نمودند:

$$\varepsilon = 1.23Fr_1^2 - 2.27Fr_1 + 1 \quad [3]$$

غزالی و همکاران (۱۳۹۱) مطالعاتی را بر روی پنج نوع بستر موجدار مثلثی انجام دادند. ایشان مقدار ضخامت لایه مرزی بی‌بعد بر روی بستر موجدار را برابر ۰/۳۹ بدست آوردند در حالی که این مقدار در منفی احداث نمود. یکی از اجزاء حوضچه‌های آرامش افقی آستانه انتهائی یا End sill است، شیب

حوضچه آرامش در زیر آن تسمه‌های فلزی متناسب با شیب مورد نظر جوش داده شد. در این تحقیق آزمایشات بر روی بسترهایی با سه زبری به قطر ۱، ۴ و ۱۰ میلی‌متر (شکل ۳) و در شیب‌های معکوس ۰/۶٪، ۱/۳٪ و ۲٪ انجام گردید. در هر مرحله دانه‌بندی زبری‌ها در کل حوضچه یکسان بوده و زبری‌های ذکر شده توسط چسب بر روی صفحه فلزی تثبیت و پس از خشک شدن درون کانال قرار گرفت. برای انجام این مطالعه ۱۴۴ آزمایش در محدوده عدد فرود ۴/۹ تا ۷/۸ انجام گردید که در آن‌ها اندازه‌گیری سرعت با سرعت سنج دو بعدی الکترومگنتیت با دقت ± 0.1 متر بر ثانیه و اندازه‌گیری عمق جریان با عمق سنج نقطه‌ای با دقت ۰/۱ میلی‌متر انجام گردید. برای ترسیم پروفیل سطح آب نیز از دوربین دیجیتالی استفاده شد، بدین ترتیب که از هر پرش چندین عکس گرفته شده و سپس در نرم افزار *Grapher7* عکس‌ها رقومی گردید. سپس پروفیل‌های سطح آب و توزیع سرعت ترسیم شدند. در نهایت با استفاده از نرم افزار *Curve Expert* معادله‌ای برای پروفیل سطح آب استخراج شد. دامنه متغیرهای این تحقیق در جدول ۱ نشان داده شده است.

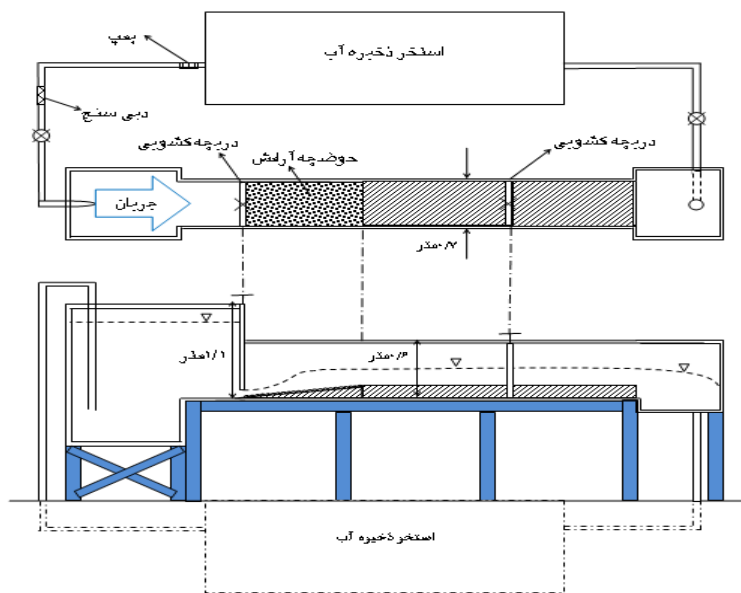
نمود (شکل ۱). در این طرح با توجه به کمبودهای مطالعات قبلی و با هدف کاهش هزینه و عملی بودن طرح، اقدام به بررسی و آزمایش بر روی حوضچه آرامش با شیب منفی کف همراه با زبری‌های (سنگریزه-ادی) با قطرهای متفاوت گردید.



شکل ۱- شیب کف منفی برای حوضچه آرامش

مواد و روش‌ها

این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شیراز در فلومی به طول ۱۵، عرض ۰/۷ و ارتفاع ۰/۶ متر با دیوارهای شفاف صورت گرفت (شکل ۲). به منظور افزایش عدد فرود اولیه، ۲ متر ابتدای کانال (قبل از دریاچه) با ارتفاع ۰/۶ متر به ۱/۱ متر افزایش یافت. همچنین به منظور ایجاد پرش از یک دریاچه کشویی در فاصله ۲ متری از منبع ورودی و در ادامه از دریاچه کشویی دیگری به منظور تثبیت پرش استفاده گردید. پرش هیدرولیکی پس از باز نمودن دریاچه اول، با تغییر میزان بازشدگی دریاچه ایجاد و با استفاده از دریاچه دوم تثبیت گردید. برای تغییر شیب



شکل ۲- پلان و پروفیل طولی فلوم مورد استفاده.



شکل ۳- زبری‌های مورد استفاده در آزمایشات

جدول ۱- دامنه متغیرها در آزمایشات تحقیق حاضر.

متغیرها	عدد فرود اولیه	دبی (LPS)	زبری (mm)	شیب کف حوضچه (%)
دامنه تغییرات	۴/۹-۷/۸	۴۰-۵۰	۱، ۴، ۱۰	-۲، -۱/۳، -۰/۶، ۰

نتایج و بحث

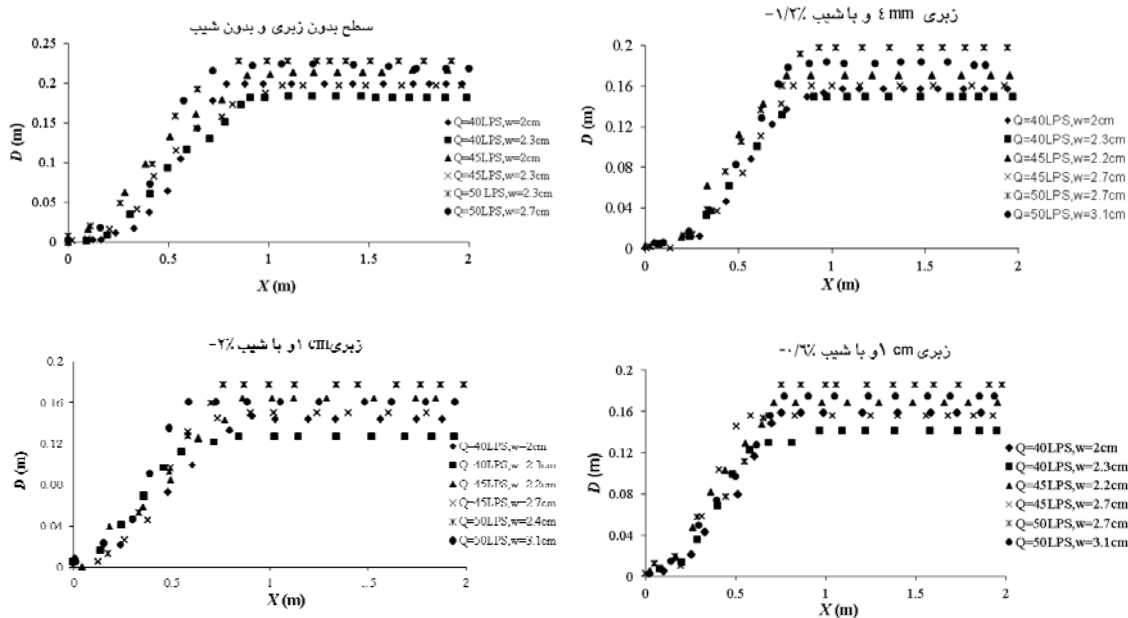
پروفیل سطح آب

فاصله از دریچه بالادست (متر) و w عمق بازشدگی دریچه می‌باشد. با استفاده از شکل ۴ می‌توان اعماق اولیه و ثانویه پرش را بدست آورد و با عمق‌هایی اندازه گیری شده توسط دستگاه عمق سنج الکتریکی مقایسه کرد. همچنین می‌توان طول پرش هیدرولیکی را تعیین نمود. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود پروفیل‌های سطح آب در ابتدای پرش با یکدیگر تفاوت چندانی ندارند اما زمانی که جریان زیر بحرانی گردیده، به دلیل افت انرژی اعماق تغییر کرده و پروفیل‌های سطح آب از یکدیگر فاصله گرفته‌اند.

پروفیل سطح آب در پرش هیدرولیکی را می‌توان تقریباً یک منحنی در نظر گرفت که از مقطع اولیه تا ثانویه امتداد دارد (چاو، ۱۹۵۹). لذا می‌توان استدلال نمود هر عاملی که باعث تغییر در افت انرژی، عمق ثانویه و طول پرش می‌شود بر معادله پروفیل سطح آب پرش نیز موثر است. با توجه به حجم بالای پروفیل‌های اندازه‌گیری شده خلاصه‌ای از موارد برداشت شده در جدول شماره ۲ آورده شده است. در شکل ۴ نیز پروفیل‌های سطح آزاد آب در ۴ آزمون نمایش داده شده که در آن D عمق آب در مقاطع مختلف (متر)، X

جدول ۲- بخشی از داده‌های اندازه‌گیری شده پروفیل‌های سطح آب در چند مقطع (اعداد بر حسب متر).

زبری ۱ سانتی‌متر و شیب منفی ۲٪						بدون زبری و بدون شیب					
۴۰-LPS		۴۵LPS		۵۰-LPS		۴۰-LPS		۴۵LPS		۵۰-LPS	
X	D	X	D	X	D	X	D	X	D	X	D
۰/۰۰۷۵	۰/۰۰۸۰	۰/۰۴۲۵	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۱۹	۰/۱۲۱۵	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۸۱
۰/۲۴۱۰	۰/۰۲۲۰	۰/۱۸۳۴	۰/۰۲۸۸	۰/۱۷۷۳	۰/۰۱۳۱	۰/۱۶۳۶	۰/۰۰۲۸	۰/۱۰۱۹	۰/۰۱۷۲	۰/۱۱۱۱	۰/۰۲۰۴
۰/۴۷۸۲	۰/۰۷۳۰	۰/۳۵۳۳	۰/۰۵۸۱	۰/۳۳۳۵	۰/۰۵۲۸	۰/۲۳۹۶	۰/۰۱۱۸	۰/۲۸۴۲	۰/۰۶۳۰	۰/۲۶۱۷	۰/۰۴۸۹
۰/۶۰۴۲	۰/۰۹۹۰	۰/۴۹۷۵	۰/۰۸۴۶	۰/۴۸۶۴	۰/۰۹۲۳	۰/۳۳۰۲	۰/۰۱۷۵	۰/۳۸۶۱	۰/۰۹۷۹	۰/۴۲۱۵	۰/۰۹۷۹
۰/۷۹۵۵	۰/۱۳۳۰	۰/۶۳۸۱	۰/۱۲۵۵	۰/۵۸۲۷	۰/۱۲۷۹	۰/۴۰۶۲	۰/۰۲۸۳	۰/۵۰۹۱	۰/۱۳۲۷	۰/۵۳۶۸	۰/۱۵۸۸
۰/۹۱۰۰	۰/۱۴۷۰	۰/۷۷۲۵	۰/۱۴۲۳	۰/۶۹۹۶	۰/۱۵۹۹	۰/۴۹۶۸	۰/۰۶۴۳	۰/۶۳۸۷	۰/۱۶۰۹	۰/۶۴۷۵	۰/۱۹۲۰
۱/۰۲۸۹	۰/۱۴۴۰	۰/۸۶۴۰	۰/۱۶۴۰	۰/۷۶۵۶	۰/۱۷۷۰	۰/۵۳۳۵	۰/۱۰۵۴	۰/۷۶۸۴	۰/۱۷۸۵	۰/۸۵۱۳	۰/۲۲۸۱
۱/۱۹۶۹	۰/۱۴۴۰	۱/۰۱۱۴	۰/۱۶۴۰	۰/۸۷۰۹	۰/۱۷۷۰	۰/۶۴۵۳	۰/۱۴۳۲	۰/۸۹۴۷	۰/۲۱۰۰	۰/۹۹۳۵	۰/۲۲۸۱
۱/۳۳۴۸	۰/۱۴۴۰	۱/۱۲۲۵	۰/۱۶۴۰	۰/۹۹۶۸	۰/۱۷۷۰	۰/۷۲۴۲	۰/۱۷۸۰	۱/۰۱۱۰	۰/۲۱۱۰	۱/۰۹۵۴	۰/۲۲۸۱
۱/۵۶۴۳	۰/۱۴۴۰	۱/۲۹۲۹	۰/۱۶۴۰	۱/۱۲۶۱	۰/۱۷۷۰	۰/۷۹۰۸	۰/۱۹۹۰	۱/۱۲۲۹	۰/۲۱۳۴	۱/۲۴۱۸	۰/۲۲۸۱
۱/۷۴۷۶	۰/۱۴۴۰	۱/۵۳۱۹	۰/۱۶۴۰	۱/۳۳۹۳	۰/۱۷۷۰	۰/۸۸۴۹	۰/۱۹۹۰	۱/۲۲۴۸	۰/۲۱۳۴	۱/۳۰۸۴	۰/۲۲۸۱
۱/۸۷۷۸	۰/۱۴۴۰	۱/۷۴۴۷	۰/۱۶۴۰	۱/۴۵۰۳	۰/۱۷۷۰	۱/۱۸۰۰	۰/۱۹۹۰	۱/۲۸۰۰	۰/۲۱۳۴	۱/۴۸۸۱	۰/۲۲۸۱



شکل ۴- پروفیل‌های سطح آب در پرش هیدرولیکی.

نزدیک بستر سرعت از کف افزایش پیدا کرده به نقطه حداکثر خود خواهد رسید و بعد از آن دوباره روند کاهشی را به علت جریان‌های ثانویه سطحی طی می‌کند. این شرایط برای تمامی پروفیل‌های سرعت برداشت شده، مشاهده می‌شود. در تاج پرش به خاطر جریان‌های غلتابی جهت سرعت جریان تغییر کرده و مقدار منفی به خود گرفته است. شایان ذکر است در پروفیل‌های ترسیم شده X فاصله از دریچه بالادست می‌باشد. به‌طور کلی در این پروفیل‌ها با افزایش فاصله از ابتدای پرش لایه مرزی رشد نموده و سرعت حداکثر کاهش می‌یابد. جهت بررسی تشابه پروفیل‌های سرعت مقیاس طولی b برابر مقادیر D در شرایط $U=0.5U_m$ و $\partial u/\partial D < 0$ تعیین گردید. به عبارت دیگر b عمقی است که در آن سرعت جریان برابر نصف سرعت ماکزیمم باشد. در شکل ۶ پروفیل‌های بی‌بعد سرعت برای انواع زبری و شیب نشان داده شده، مطابق این شکل پروفیل‌های سرعت در امتداد پرش هیدرولیکی مشابه می‌باشند ولی با پروفیل سرعت پرش هیدرولیکی در بستر صاف متفاوت هستند و ملاحظه می‌گردد که سرعت ماکزیمم بر روی بستر زبر همراه با شیب معکوس نسبت به نازل دیواری کلاسیک در نقطه بالاتری اتفاق می‌افتد.

در این تحقیق شیب و زبری بستر، عدد فرود اولیه و اعماق اولیه (D_1) و ثانویه (D_2) پرش، جهت استخراج معادله پروفیل سطح آب در نظر گرفته شدند. با نظر به اینکه پروفیل‌های بدون بعد سطح آب از ترسیم نسبت $(D - D_1)/(D_2 - D_1)$ در مقابل x/L_j بدست می‌آیند. (اید و راجاراتنام، ۲۰۰۲) به کمک نرم افزار *Curve Expert* بهترین معادله جهت ترسیم پروفیل سطح آب به صورت معادله ۴ استخراج شده است.

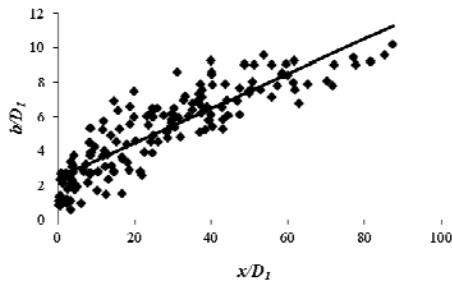
[۴]

$$\frac{(D - D_1)}{(D_2 - D_1)} = 0.329 + 0.672 \tanh(231.51 \frac{x}{L_j} - 0.76)$$

$$R^2 = 0.84$$

پروفیل‌های سرعت

در شکل ۵ پروفیل‌های سرعت اندازه‌گیری شده در مقاطع مختلف پرش نمایش داده شده است. در این پروفیل‌ها تغییرات سرعت به صورت جت دیواره است به طوری که با افزایش فاصله از ابتدای پرش لایه مرزی رشد نموده و سرعت حداکثر کاهش می‌یابد. همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین سرعت‌ها در ابتدای پرش اتفاق افتاده است و هر چه به مقطع ثانویه نزدیک شویم جریان آرام‌تر شده و سرعت‌ها از یکناختی بیشتری برخوردار هستند که نشان دهنده افت انرژی در طول پرش بوده است. همچنین در لایه کوچک



شکل ۷- تغییرات مقیاس طولی b/D_1 به ازای x/D_1 برای انواع شیب و زبری.

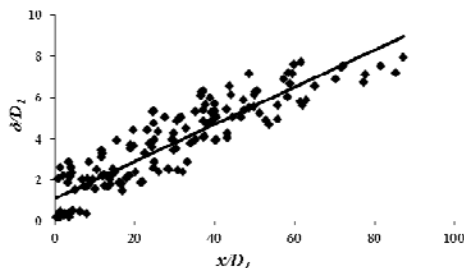
ضخامت لایه مرزی (δ) در هر مقطع از پرش هیدرولیکی برابر عمقی است که در آن سرعت حداکثر است. شکل‌های ۸ و ۹ تغییرات لایه مرزی بی‌بعد δ/D_1 و δ/b به ازای x/D_1 را نشان می‌دهد. روابط زیر برای ضخامت لایه مرزی بی‌بعد در امتداد طولی پرش هیدرولیکی برای زبری‌ها و شیب‌های منفی مختلف مورد استفاده در این تحقیق تعیین شده است. همچنین معادلات ۸ و ۹ به ترتیب معادلات مربوط به نتایج عباسپور و همکاران (۲۰۰۹) و اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) می‌باشد.

$$\frac{\delta}{D_1} = 0.0901 \left(\frac{x}{D_1} \right) + 1.1121 \quad R^2 = 0.81 \quad [6]$$

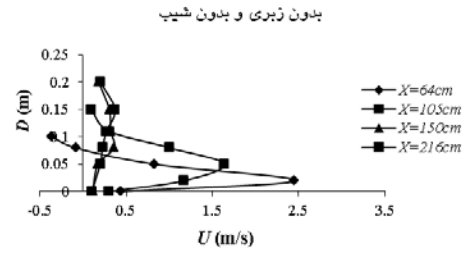
$$\delta/b = 0.66 \quad [7]$$

$$\frac{\delta}{D_1} = 0.078 \left(\frac{x}{D_1} \right) + 0.73 \quad R^2 = 0.7 \quad [8]$$

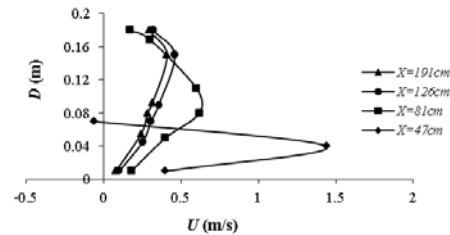
$$\frac{\delta}{D_1} = 0.06 \left(\frac{x}{D_1} \right) + 0.42 \quad R^2 = 0.78 \quad [9]$$



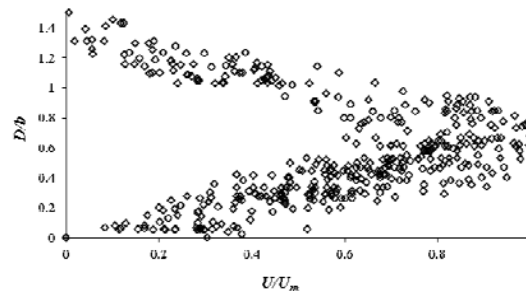
شکل ۸- تغییرات δ/D_1 به ازای x/D_1 برای انواع شیب و زبری.



زبری ۴ میلی‌متر و شیب ۲٪



شکل ۵- پروفیل‌های سرعت در پرش هیدرولیکی.



شکل ۶- پروفیل بی‌بعد سرعت در پرش.

شکل ۷ تغییرات طولی بی‌بعد b/D_1 به ازای فواصل مختلف x را نشان می‌دهد. شیب معکوس و زبری سبب افزایش افت انرژی گردیده که به دنبال آن مقدار b نیز افزایش می‌یابد. رابطه رگرسیون خطی b/D_1 و x/D_1 در بسترهای زبر با شیب‌های مختلف مورد استفاده در این تحقیق به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{b}{D_1} = 0.1015 \left(\frac{x}{D_1} \right) + 2.4085 \quad R^2 = 0.79 \quad [5]$$

است. ضخامت لایه مرزی بی‌بعد در تحقیق آید و راجاراتنام (۲۰۰۲) و عباسپور و همکاران (۲۰۰۹) به ترتیب برابر ۰/۴۵ و ۰/۵۷ بیان شد. این در حالی است که این مقدار در شرایط این آزمایش برابر ۰/۶۶ تعیین گردید.

تنش برشی بستر

آید و راجاراتنام (۲۰۰۲) بیان داشتند که ضریب نیروی برشی در بستر موج‌دار به صورت زیر، قابل ارزیابی است:

$$\varepsilon = \frac{F_\tau}{\gamma \cdot \frac{D_1^2}{2}} \quad [10]$$

که در آن F_τ مجموع نیروهای برشی بستر، γ وزن مخصوص آب و D_1 و D_2 عمق اولیه و ثانویه پرش تعریف شده و با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$F_\tau = \int_{x_1}^{x_2} \tau_b dx = (P_1 - P_2) + (M_1 - M_2) \quad [11]$$

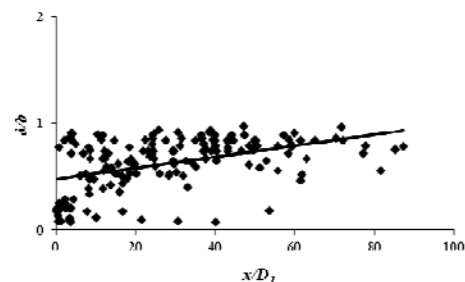
$$M_1 = \rho U_1^2 \cdot D_1, P_2 = 0.5\gamma \cdot D_2^2, P_1 = 0.5\gamma \cdot D_1^2$$

که $M_2 = \rho U_2^2 D_2$ بوده و به ازای مقادیر عمق و سرعت متوسط در مقاطع قبل و بعد از پرش هیدرولیکی به دست می‌آیند. نمودار ضریب نیروی برشی مطالعات فعلی به ازای اعداد فرود اولیه در شکل ۱۱ ترسیم شده است، همچنین معادله ۱۲ ضریب تنش برشی برای پرش بر روی بستر زبر با شیب‌های منفی در تحقیق حاضر و معادله ۱۳ برای بستر صاف که توسط راجاراتنام (۱۹۶۸) ارائه شده است، به صورت زیر می‌باشد:

$$\varepsilon = 0.0194 F_{r1}^{3.9096} \quad R^2 = 0.94 \quad [12]$$

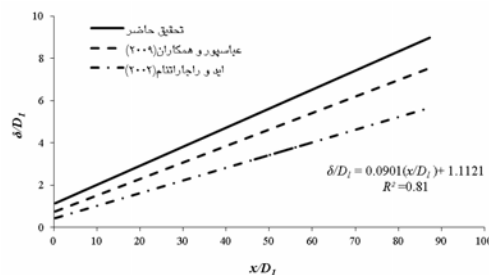
$$\varepsilon = 0.16 F_{r1}^2 - 0.8 F_{r1} + 1 \quad R^2 = 1 \quad [13]$$

نتایج حاصل از آزمایشات نشان می‌دهد که مقدار ε در پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر با شیب‌های منفی مختلف به طور میانگین ۱۱/۵ برابر ضریب نیروی برشی در بسترهای صاف است. با توجه به شکل ۹ می‌توان دریافت که همیشه ضریب نیروی برشی در تمام زبری‌های استفاده شده بالای منحنی پرش کلاسیک قرار می‌گیرد. مقایسه‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که روند تغییرات ضریب نیروی برشی در بسترهای زبر در هر ابعاد مشابه می‌باشد، یعنی با افزایش عدد



شکل ۹- تغییرات δ/D_1 به ازای x/D_1 برای انواع شیب و زبری.

شکل ۱۰ مقایسه بین تغییرات δ/D_1 را به ازای x/D_1 برای نتایج این تحقیق و سایر محققین نشان می‌دهد. بر این اساس به دلیل کاربرد زبری و شیب معکوس ضخامت لایه مرزی بدون بعد در شرایط این مطالعه نسبت به پژوهش‌های قبلی بیشتر بوده است. به دلیل زبری و شیب منفی نیروی اصطکاک (مقاومت بستر) و همچنین مولفه نیروی وزن در خلاف جهت جریان اعمال می‌شود و ترکیب این دو نیرو باعث می‌شود فاصله رخ دادن سرعت حداکثر از کف نسبت به حالت کلاسیک افزایش پیدا کند و لذا ضخامت لایه مرزی افزایش یافته و با توجه به اینکه تمام اثر گرانی سیال در این لایه متمرکز می‌باشد، افزایش تنش برشی سبب افزایش افت انرژی می‌شود.



شکل ۱۰- مقایسه تغییرات δ/D_1 به ازای x/D_1 در این پژوهش با مطالعات قبلی.

راجاراتنام (۱۹۶۸) ضخامت لایه مرزی بی‌بعد δ/b در بستر صاف را ۰/۱۶ گزارش نمود. همانطور که در معادله (۷) مشاهده می‌شود ضخامت لایه مرزی بی‌بعد در بستر زبر با شیب‌های منفی مختلف نسبت به حالت کلاسیک بیشتر بوده است. این تفاوت حاکی از یکنواختی بیشتر سرعت در طول پرش بر روی بستر زبر همراه با شیب منفی در مقایسه با حالت کلاسیک

انتظار می‌رفت مقدار ضریب α از مقدار ضریب β بزرگتر بوده است.

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n V_i^2 \Delta A_i}{V^2 A} \quad [15]$$

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n V_i^3 \Delta A_i}{V^3 A} \quad [16]$$

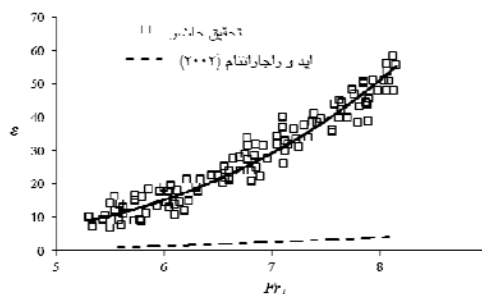
همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود با افزایش فاصله از پنجه پرش مقادیر ضرایب β و α به صورت غیر خطی کاهش می‌یابد. این مسئله به دلیل کاهش انحنای پروفیل‌های سرعت، اغتشاش بیشتر جریان و در نتیجه تمایل بیشتر به یکنواختی سرعت در اعماق مختلف در یک مقطع می‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود با افزایش مقدار زبری و شیب معکوس (افزایش مقاومت بستر) جریان آرام تر می‌شود و میزان ضرایب β و α افزایش پیدا می‌کند.

نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق تاثیر بستر زبر همراه با شیب کف منفی بر روی پرش هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفت. لذا نتایج تحقیق به صورت خلاصه در زیر ارائه می‌گردد:

- پروفیل‌های سرعت در مقاطع مختلف پرش هیدرولیکی روی بستر زبر همراه با شیب منفی مشابه بوده ولی این پروفیل‌ها با پرش هیدرولیکی روی بستر صاف مقداری متفاوت می‌باشند. براساس روابط بدست آمده، مقیاس طولی بی‌بعد b/D_1 در بستر زبر همراه با شیب منفی در مقایسه با بستر صاف نرخ افزایش بیشتری را نشان می‌دهد.
- ضخامت لایه مرزی بی‌بعد δ/b در بستر زبر با شیب کف منفی برابر با $0/66$ به دست آمد که این مقدار در پرش بر روی بستر صاف $0/16$ می‌باشد.

فرود اولیه ضریب نیروی برشی به طور غیر خطی افزایش می‌یابد که این وضعیت در پرش هیدرولیکی کلاسیک نیز مشاهده می‌گردد ولی این افزایش در حالت پرش بر روی بستر زبر و شیب‌های منفی بسیار بیشتر از پرش کلاسیک می‌باشد. همچنین این نتایج مطابقت خوبی با نتایج تحقیق عباسپور و همکاران (۲۰۰۹) و السبایه و شبایک (۲۰۱۰) دارد.



شکل ۱۱- مقایسه تغییرات k_s برای انواع شیب و بستر صاف و زبر.

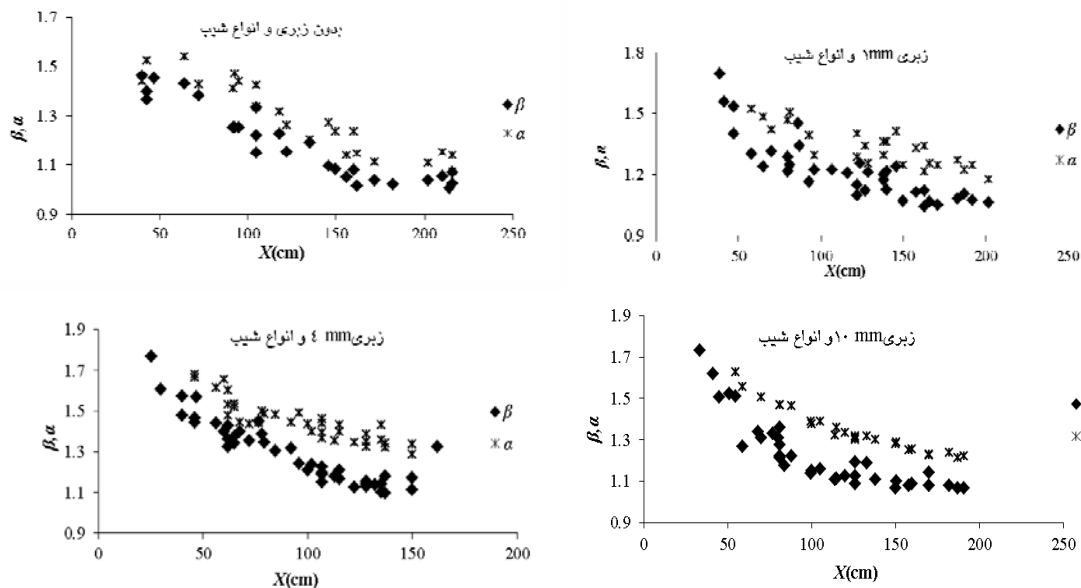
ضریب کاهش نسبت اعماق مزدوج

مقدار ضریب کاهش اعماق مزدوج (λ) را می‌توان از معادله ۱۴ که توسط کارولو و همکاران (۲۰۰۷) ارائه گردیده، محاسبه نمود. مقدار ضریب λ با توجه به نتایج حاصل از آزمایشات بر روی شیب‌های منفی مختلف و زبری متفاوت از حدود $0/18$ تا $0/57$ می‌باشد که بطور میانگین در محدوده عدد فرود $4/95$ تا $7/5$ بطور متوسط $0/37$ می‌باشد که در مقایسه با حالت کلاسیک ($\lambda = 0$) قابل ملاحظه است. k_s در این رابطه ارتفاع متوسط زبری‌ها و D_1 عمق قبل از پرش است.

$$\lambda = \frac{2}{\pi} \arctg \left(0.8 \left(\frac{k_s}{D_1} \right)^{0.75} \right) \quad R^2 = 0.71 \quad [14]$$

ضریب تصحیح اندازه حرکت β و انرژی جنبشی α

ضرایب تصحیح اندازه حرکت و انرژی جنبشی از معادلات ۱۵ و ۱۶ محاسبه گردید. این مقادیر برای تمامی حالت‌ها بزرگتر از عدد ۱ شد، و همان‌طور که



شکل ۱۲- مقادیر β و α به ازای فاصله از پنجه پرش برای انواع زبری و شیب.

۴) مقادیر ضرایب تصحیح انرژی در مقطع اولیه و ثانویه پرش در کلیه حالتها بیشتر از ضرایب تصحیح مومنتم می باشد. این در حالی است که کلیه ضرایب تصحیح انرژی و مومنتم بیشتر از ۱ می باشد. ضمن آنکه این ضرایب از حالت پرش کلاسیک نیز بیشتر بوده اند.

۳) مقادیر ضریب نیروی برشی ϵ در بستر زیر با شیب کف منفی به ازای عدد فرود ۵ در حدود ۱۰ برابر بستر صاف است. با افزایش عدد فرود ضریب نیروی برشی در مقایسه با بستر صاف افزایش بیشتری را نشان می دهد. به طور متوسط ضریب نیروی برشی در این تحقیق حدود ۱۱/۵ برابر حالت کلاسیک بدست آمده است.

منابع مورد استفاده

- ابریشمی ج و حسینی م، ۱۳۸۵. هیدرولیک کانالهای روباز. چاپ چهاردهم. انتشارات دانشگاه امام رضا (ع).
- غزالی م و صمدی ح، ۱۳۹۱. مطالعات آزمایشگاهی پروفیل سرعت در طول پرش هیدرولیکی بر روی بستر زیر با زبری های مثلثی. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، سال دوم، شماره هشتم، صفحه های ۱۱۷ تا ۱۲۸.
- Abbaspour A, Hosseinzadeh Dalir A, Farsadzadeh D and Sadraddini AA, 2009. Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics. Journal of Hydro-environmental Research 3: 109-117.
- Carollo FG, Ferro V and Pampaloni V, 2007. Hydraulic jumps on rough beds. Journal of Hydraulic Engineering (ASCE) 133(9): 989-999.
- Chow VT, 1959. Open Channel Hydraulic. Mc-Graw Hill, New York.
- Ead SA, Rajaratnam N, Katopodis C and Ade F, 2000. Turbulent open channel flow in circular corrugated culverts. Journal of Hydraulic Engineering (ASCE) 126(10): 750-757.
- Ead SA and Rajaratnam N, 2002. Hydraulic jumps on corrugated bed. Journal of Hydraulic Engineering (ASCE) 128(2): 656-663.
- Elsebaie IH and Shabayek Sh, 2010. Formation of hydraulic jumps on corrugated beds. Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS 10(1): 40-50.
- Izadjoo F and Shafai Bejestan M, 2007. Corrugated bed hydraulic jump stilling basin. Journal of Applied Sciences 7(8): 1164-1169.
- Rajaratnam N, 1967. Hydraulic jump adverse slope. Hydrosoci 4: 197-280.
- Rajaratnam N, 1968. Hydraulic jump on rough bed. Transactions of the Engineering Institute of Canada 11:18.
- Samadi- Boroujeni H, Ghazali M, Ghorbani B and Fatahi R, 2013. Effect of triangular corrugated beds on the hydraulic jump characteristics. Canadian Journal of Civil Engineering 40: 841-847.