

مطالعه آزمایشگاهی پروفیل سرعت در طول پرش هیدرولیکی بر روی بستر با زبری‌های مثلثی

محبوبه غزالی^۱، حسین صمدی بروجنی^۲، بهزاد قربانی^۳، ابوزر رحمتی^۴

تاریخ دریافت: ۹۰/۰۶/۰۵

تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۸/۲۳

چکیده

در این تحقیق مشخصات پرش هیدرولیکی بر روی پنج نوع بستر موج‌دار مثلثی در فلومی با مقطع مستطیلی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد مورد بررسی قرار گرفت. فلوم دارای عرض و ارتفاع ۰/۴ متر و طول ۱۲ متر بود. در مجموع ۱۵ آزمایش در محدوده اعداد فرود اولیه ۶/۱ تا ۱۳/۶ انجام شد. در همه آزمایشات، تاثیر زبری‌های بستر بر پرش هیدرولیکی در اعداد فرود مختلف با تحلیل پروفیل سرعت و استهلاك انرژی بررسی شد. پارامترهای بی‌بعد هیدرولیکی به صورت تابعی از عدد فرود تعیین گردید. بررسی پروفیل‌های سرعت اندازه‌گیری شده در مقاطع مختلف پرش هیدرولیکی نشان داد که این پروفیل‌ها مشابه بوده و با پروفیل جت آب بر روی بستر صاف متفاوت می‌باشند. مقدار ضخامت لایه مرزی بی‌بعد بر روی بستر موج‌دار برابر ۰/۳۹ به دست آمد در حالی که این مقدار در بستر صاف معادل ۰/۱۶ است. همچنین افت انرژی در پرش بر روی بستر موج‌دار بیشتر از بستر صاف است (متوسط ۱۱/۳٪).

واژه‌های کلیدی: استهلاك انرژی، بسترهای موج‌دار مثلثی، پرش هیدرولیکی، پروفیل سرعت.

Ghazali_V_1365@yahoo.com

^۱ دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آب دانشگاه شیراز. تلفن: ۰۳۸۲۳۸۴۲۴۴۲ و ۰۹۱۳۲۸۱۹۳۵۵
آدرس: استان اصفهان، خمینی شهر، منظره، بلوار فیض الاسلام، کوچه صفا، پلاک ۴.

^۲ استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

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

Rahmati.abouzar@yahoo.com

^۴ دانشجوی سابق کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب دانشگاه شهرکرد

مقدمه

توزیع سرعت متوسط در پرش ایجاد شده در پایین دست یک دریچه و بر روی یک کانال صاف و در محدوده اعداد فرود $2/68$ تا $9/78$ انجام داد. راجاراتنام (۱۹۶۷) نشان داد که پروفیل توزیع سرعت در پرش با کمی اصلاح شبیه به پروفیل سرعت در جت دیواری (Wall jet) کلاسیک است (ایزدجو، ۱۳۸۳).

تاکنون تحقیقات گسترده‌ای بر روی انواع حوضچه‌های آرامش انجام شده است و چند نوع از این حوضچه‌ها استاندارد گردیده‌اند، که مشهورترین آن‌ها، حوضچه‌های آرامش USBR حوضچه‌ی SAF می‌باشند. از آنجا که بلوک‌ها مستقیماً در معرض جریان با انرژی بالا هستند نیاز به استحکام زیاد جهت مقابله در برابر نیروهای وارده و پایداری زیادی دارند که این امر منجر می‌شود تا ابعاد آن‌ها بزرگ گردد و در مواقعی در معرض کاویتاسیون نیز قرار گیرند. یکی از روش‌هایی که می‌تواند جایگزین بلوک‌ها گردد، ایجاد زبری مصنوعی در بستر جریان می‌باشد. زبر نمودن کف باعث می‌شود که در یک حجم کنترل مقدار مومنتم ورودی و خروجی برابر نبوده و مومنتم خروجی به اندازه نیروی مقاومتی زبری‌ها، کمتر از مومنتم ورودی شود. تفاوت زبری با بلوک این است که سطح فوقانی آن‌ها کاملاً در زیر عمق اولیه پرش قرار گرفته و هم تراز با کف کانال بالادست است.

اولین اندازه‌گیری سرعت بر روی بسترهای زیر توسط راجاراتنام (۱۹۶۸) انجام شده است. در این مطالعات پروفیل سرعت در ناحیه جریان جلو رونده برای عدد فرود $7/04$ برای مقاطع مختلف در طول پرش اندازه‌گیری گردید. در این مطالعه پروفیل سرعت در دو محدوده لایه مرزی و ناحیه اختلاط آزاد به صورت مجزا مورد بررسی قرار گرفته است.

نتایج به دست آمده از آزمایشات مربوط به بستر زبر همخوانی خوبی را با جت دیواری کلاسیک نشان می‌دهد و این بدان معنی است که زبری‌ها بر روی پروفیل سرعت در ناحیه اختلاط آزاد تاثیر محسوسی نمی‌گذارند.

ویو و راجاراتنام (۱۹۹۵) با بررسی نتایج حاصل از آزمایشات هاگر (۱۹۹۲) برای عدد فرود $4/95$ ، دریافتند که عدم یکسان بودن توزیع سرعت در جریان فوق بحرانی پیش از پرش، تاثیر بسیار نامحسوسی بر روند کاهش اندازه سرعت داشته است.

یکی از پارامترهای مهم در طراحی سیستم‌های هیدرولیکی، کنترل سرعت جریان می‌باشد. سرعت جریان برای شرایط مختلف طراحی باید در محدوده قابل قبولی قرار گیرد تا از تخریب و خسارات جلوگیری شود. سرعت زیاد آب در یک کانال و یا رودخانه طبیعی، فرسایش بستر و جدارهای کانال را به همراه دارد. پرش یا جهش هیدرولیکی، از نوع جریان‌های متغیر سریع است که در بسیاری از کارهای عملی با آن روبرو بوده و آن عبارت است از تغییر حالت جریان از فوق بحرانی به زیربحرانی. چنانچه آب در قسمتی از مسیر دارای حالت فوق بحرانی بوده و بنا به مشخصات و موقعیت خاص کانال بخواهد تغییر حالت دهد، عمق جریان در مسیر نسبتاً کوتاهی به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته و در نتیجه ضمن ایجاد افت انرژی محسوس، از میزان سرعت به اندازه‌ی قابل توجهی کاسته می‌گردد. این پدیده که یکی از پدیده‌های مهم جریان آب در کانال‌های باز بوده و از ابتدا تا انتهای آن یک تلاطم و پیچش سطحی آب وجود دارد، به پرش هیدرولیکی یا پرش آبی موسوم است (پترکا، ۱۹۸۳).

موقعی که جریان فوق بحرانی در پاشنه پرش وارد پرش آبی می‌شود، جریان در قسمت فوقانی و در جداره صلب دستخوش عمل لغزشی می‌گردد. سطح فوقانی جریان با سرعت زیاد، از سرعت‌های نسبی زیادی نسبت به جرم مایع فوقانی خود، برخوردار خواهد بود. لغزش شدید در سطح آب، باعث به وجود آمدن لایه لغزشی آزادی می‌گردد که از بخش مایع فوقانی وارد می‌شود. لایه لغزشی کف بستر باعث کند شدن سرعت در لایه جداری می‌شود. پروفیل سرعت در پرش دو بخش متمایز دارد: جریانی به طرف جلو در جسم اصلی تحتانی و منطقه‌ای با سرعت منفی در بخش فوقانی. پروفیل سرعت به طرف جلو، دارای سرعت صفر در بستر و سرعت ماکزیمم در فاصله δ بوده و سپس به تدریج کاهش یافته و در فاصله y_f از بستر به صفر می‌رسد. می‌توان ناحیه $y > 0$ را بخش لایه جداری (مرزی) و ناحیه $y > \delta$ را منطقه اختلاط آزاد نامید.

راجاراتنام آزمایشات خود را بر روی محدوده جریان رو به جلو محدود کرده و مطالعات گسترده‌ای بر روی

سرعت را ۱۰ آزمایش برداشت نمودند. نتایج نشان داد که سرعت جریان فوق بحرانی قبل از پرش (U_1) بین ۱/۵۳ تا ۴/۹ متر بر ثانیه متغیر است و در آخرین قسمت پروفیل، سرعت ماکزیمم اندازه‌گیری شده بین ۰/۵ تا ۱ متر بر ثانیه متغیر است.

نتایج مطالعات عباسپور و همکاران (۲۰۰۹)، بر روی زبری‌های سینوسی شکل، نشان داد که برای یک عمق فوق بحرانی y_1 ، عمق پایاب مورد نیاز برای تشکیل پرش هیدرولیکی در محدوده اعداد فرود ۳/۶ تا ۸/۶ و برای شش شیب موج مختلف در محدوده $0.286 \leq t/s \leq 0.625$ که s : طول موج زبری می‌باشد، حدود ۲۶-۵ درصد کوچکتر از بسترهای صاف است. همچنین مقدار طول نسبی پرش ($L/z/y_1^*$) که $2^* y_1$ عمق مزدوج پرش در در بستر صاف می‌باشد، به‌ازای اعداد فرود کمتر از شش در حدود سه و برای اعداد فرود بالاتر از شش در حدود ۳/۵ می‌باشد. عباسپور و همکاران (۲۰۰۹) پروفیل‌های سرعت را در بیست آزمون پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج‌دار اندازه‌گیری نمودند که در این پروفیل‌ها تغییرات سرعت به صورت جت دیواره است به‌طوری‌که با افزایش فاصله از ابتدای پرش لایه مرزی رشد نموده و سرعت حداکثر کاهش می‌یابد.

آن‌ها همچنین جهت بررسی تشابه پروفیل‌های سرعت، مقیاس طولی b برابر مقادیر y در شرایط $u_m = 0.5u_1$ و $(\partial u / \partial y) < 0$ را تعیین نمودند. مطابق نتایج حاصل شده، پروفیل‌های سرعت در امتداد پرش هیدرولیکی مشابه می‌باشند ولی با پروفیل‌های سرعت پرش هیدرولیکی در بستر صاف متفاوت هستند و سرعت ماکزیمم بر روی بستر زبر نسبت به نازل دیواری کلاسیک در نقطه بالاتری اتفاق می‌افتد و ضخامت δ/b (ضخامت لایه مرزی) در پرش بر روی بستر زبر ($\delta/b = 0.57$) بیشتر از بستر صاف ($\delta/b = 0.16$) خواهد بود.

در مطالعه حاضر اثر زبری‌های مثلثی شکل بر پروفیل‌های سرعت در مقاطع مختلف پرش هیدرولیکی در آزمایشگاه بر روی مدل فیزیکی مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی در این تحقیق بررسی تاثیر زبری‌های ممتد مثلثی بر پروفیل سرعت در طول پرش هیدرولیکی و استهلاک انرژی و مقایسه نتایج با تحقیقات قبلی انجام شده در خصوص پروفیل سرعت در طول پرش

اید و همکاران (۲۰۰۰) تحقیقات آزمایشگاهی خود را در خصوص تعیین میدان سرعت در جریان‌های توربولنت در یک لوله موج‌دار دایروی به قطر ۰/۶۲۲ متر، با شیب‌ها و دبی‌های مختلف انجام دادند. در این مطالعات، سرعت به وسیله یک لوله پرنتل با قطر خارجی سه میلی‌متر اندازه‌گیری شد. در ناحیه کاملاً توسعه یافته جریان، سرعت جریان u با معادله پرنتل برای جریان توربولنت بر روی بستر زبر و با یک فرورفتگی در پروفیل سرعت در نزدیکی سطح آب توصیف می‌شود. نتایج نشان دادند که تنش‌های برشی رینولدز بر روی بسترهای موج‌دار به وجود آمده و این امر میدان‌های سرعت روی بستر را کاهش می‌دهند و از آنجا که تاج سطح موج‌دار هم تراز با کف کانال است کاویتاسیون را نیز مقداری کم می‌کند. مقادیر سرعت در نواحی مرزی لوله‌ها نسبتاً کم بودند که برای عبور ماهی‌ها به بالادست در کالورت‌ها، می‌تواند مورد توجه قرار گیرد.

اید و راجاراتنام (۲۰۰۲)، تعداد ۱۱ آزمایش را در خصوص پرش هیدرولیکی بر روی دو نوع بستر موج‌دار و برای اعداد فرود ۴ تا ۱۰ انجام دادند و پروفیل‌های سرعت را در تعدادی از آزمایشات با استفاده از لوله پیتوت اندازه‌گیری نمودند. روابط زیر، چگونگی تغییرات L (مقدار L عبارت است از فاصله‌ای که در آن سرعت ماکزیمم به نصف سرعت اولیه جت رسیده است) در مقابل Fr_1 را بیان می‌کنند:

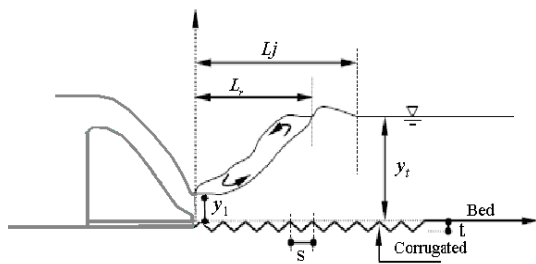
$$\frac{L_R}{y_1} = 1.74Fr_1 + 3.62, (R^2 = 0.84) \quad (1)$$

$$\frac{L_s}{y_1} = 2.91Fr_1 + 5.06, (R^2 = 0.88) \quad (2)$$

که در آن L_R : مقیاس L بر روی بستر زبر و L_s : مقیاس L بر روی بستر صاف است. آن‌ها از این روابط نتیجه گرفتند که $L_R = 2/3L_s$ می‌باشد.

ایزدجو و شفافی بجستان (۱۳۸۳)، با انجام ۴۲ آزمایش بر روی شش نوع بستر با زبری‌های دوزنقه‌ای شکل در محدوده عدد فرود چهار تا دوازده نشان دادند که تحت تاثیر زبری‌های موجی شکل با مقطع دوزنقه‌ای، طول پرش، پنجاه درصد و عمق مزدوج پرش، بیست درصد کاهش می‌یابد. همچنین آن‌ها پروفیل‌های عمقی

جداشدگی خطوط جریان و پدیده کاویتاسیون، سطح بالایی زبری‌ها با سطح بستر بالادست که در آن جریان فوق بحرانی ایجاد می‌گردد، در یک تراز قرار داده شدند. شکل (۱) چگونگی تشکیل پرش هیدرولیکی بر روی بستر با زبری‌های مثلثی و جدول (۱) مشخصات زبری‌های ایجاد شده در کف را ارائه می‌نماید.



شکل (۱): چگونگی تشکیل پرش هیدرولیکی بر روی بستر با زبری‌های مثلثی

جدول (۱): مشخصات زبری‌های ایجاد شده در کف

شماره زبری	نام زبری	شیب وجه بالادست	شیب وجه پایین‌دست
۱	A	۱:۰/۹۸	۱:۰/۹۸
۲	B	۱:۰/۶۶	۱:۰/۶۶
۳	C	۱:۰/۶۶	۱:۰/۶۶
۴	D	۱:۰/۹۸	۱:۰/۹۸
۵	E	۱:۰/۹۸	۱:۰/۹۸

به‌طور کلی در انجام این تحقیق تعداد ۱۵ آزمایش بر روی بستر زبر در محدوده اعداد فرود $6/1 - 13/1$ انجام گرفت. جدول (۲) برنامه کلی آزمایش‌ها و محدوده متغیرهای وابسته را ارائه می‌نماید (S: طول و t: ارتفاع موج).

جدول (۲): برنامه کلی آزمایش‌ها و محدوده متغیرهای وابسته

تعداد آزمایش	مشخصات کلی فلوم		متغیرهای محدود		Fr1	دبی s/lit	عمق (cm)	عرض (cm)
	مشخصات بستر	تعداد	مشخصات بستر	تعداد				
۱۵	t (cm)	۲/۵	s (cm)	۸/۶	۶/۱	۵ تا ۳۵	۴۰	۴۰
	جنس بستر		تعداد					
			گالوانیزه	۱۱/۳	۱۳/۱			

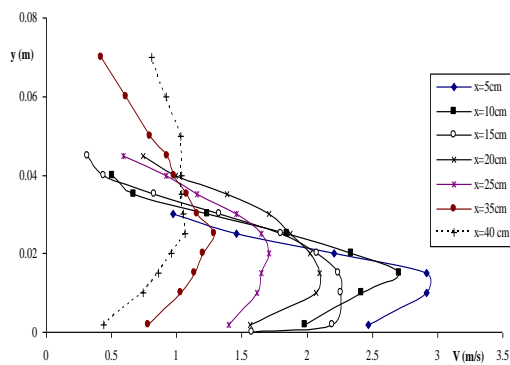
هیدرولیکی بر روی سایر بسترهای زبر و نیز پرش بر روی بستر صاف می‌باشد.

مواد و روش‌ها

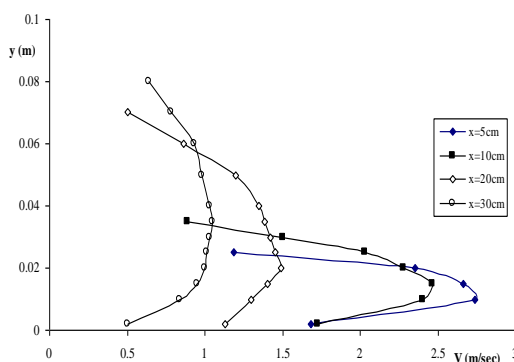
آزمایشات در یک کانال (Flume) آزمایشگاهی با طول ۱۲ متر و عرض و ارتفاع ۰/۴ متر، واقع در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد، انجام گرفت. فلوم دارای کف فلزی و دیواره‌های شیشه‌ای از جنس فایبرگلاس می‌باشد که شیب‌پذیر بوده و امکان تغییر شیب کف به کمک جک هیدرولیکی فراهم می‌باشد. در این کانال، آب از مخزن واقع در بیرون آزمایشگاه به کمک یک پمپ سانتریفوژ و از طریق لوله ورودی کانال به مخزن ابتدایی وارد می‌شود. در انتهای مخزن یک سرریز مثلثی قرار دارد که امکان اندازه‌گیری دبی را فراهم می‌نماید و آب پس از عبور از آن وارد حوضچه آرامش ابتدای فلوم شده که جهت آرام نمودن جریان ورودی از شبکه‌های توری فلزی و لاستیکی استفاده می‌شود و پس از طی طول دوازده متری کانال و عبور از روی دریچه متحرک انتهایی کانال و ریزش به حوضچه رسوبگیر، به صورت ثقلی وارد مخزن اصلی می‌شود.

در این تحقیق به منظور ایجاد جریان فوق بحرانی و عمق اولیه پرش هیدرولیکی از یک سرریز WES که به سرریز استاندارد نیز معروف است، استفاده شده است. این سرریز نسبت به سرریزهای مشابه دارای افت کمتر و در نتیجه ضریب دبی بیشتری می‌باشد. سرریز مورد نظر مطابق با استاندارد USBR با ارتفاع و عرض چهار سانتیمتر و برای حداکثر دبی عبوری چهار لیتر بر ثانیه، با شعاع انحنای بیست سانتیمتر طراحی شده و مدل اولیه آن تهیه و با انتقال مدل به کارگاه، سرریز مورد نظر از جنس گالوانیزه ساخته شد.

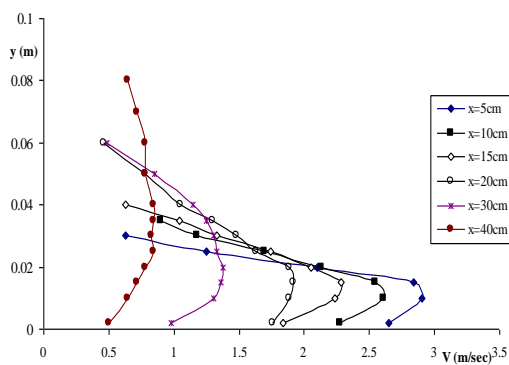
جهت مشخص نمودن طولی از حوضچه که زبری‌ها باید در آن نصب شوند، طول پرش هیدرولیکی کلاسیک و اعماق اولیه و ثانویه با توجه به اعداد فرود و شرایط حاکم بر جریان و روابط تئوری محققین پیشین بدون حضور زبری‌ها، به دست آمد و طول مورد نیاز کف‌بندها در جهت اطمینان ۱/۵ متر منظور گردید. برای ایجاد زبری، از ۵ کف بند گالوانیزه با موج‌های مثلثی با ارتفاع ۲/۵ سانتیمتر استفاده گردید و به منظور جلوگیری از



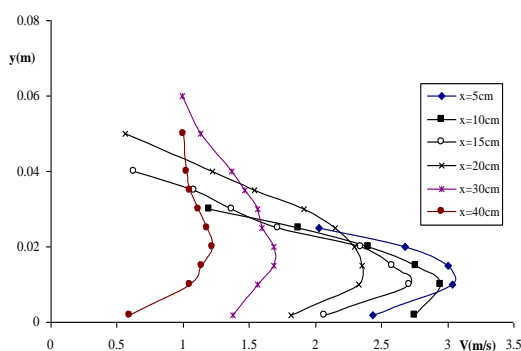
(ب) آزمایش ۵-B (Q=20 lit/s, Fr1=7.97)



(ج) آزمایش ۸-C (Q=15 lit/s, Fr1=9.28)



(د) آزمایش ۱۱-D (Q=20 lit/s, Fr1=8.03)

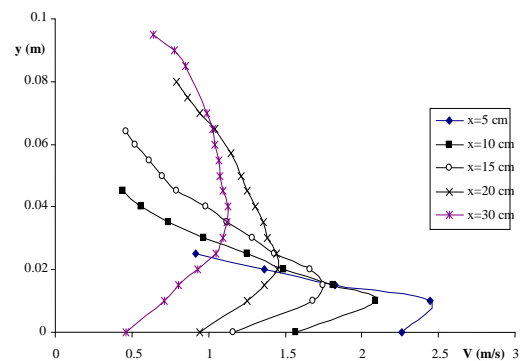


(و) آزمایش ۱۴-E (Q=30 lit/s, Fr1=6.85)

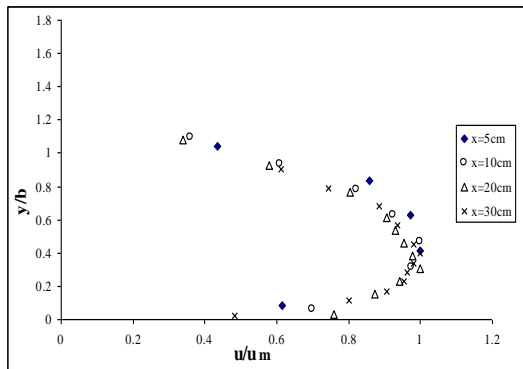
عمق آب پایاب با استفاده از دریچه مستطیلی در انتهای فلوم به نحوی تنظیم گردید که پرش هیدرولیکی دقیقاً در ابتدای زبری‌ها تشکیل شود. جهت اندازه‌گیری عمق جریان از عمق‌سنج استفاده شد و پروفیل سطح آب برای تمامی اعداد فرود و با فواصل طولی ۵-۲/۵ سانتیمتر، از پنجه تا انتها برداشت و ثبت گردید. محدوده دبی جریان ۵-۳۵ لیتر بر ثانیه با فواصل ۵ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شده و به وسیله سرریز مثلی ابتدای فلوم اندازه‌گیری گردید.

جهت اندازه‌گیری سرعت در این تحقیق از لوله پیتوت (Pittot tube) استفاده شده است. در این ابزار اندازه‌گیری ارتفاع نظیر انرژی جنبشی سیال بر اساس میزان صعود آب در لوله انجام می‌گیرد و سرعت با استفاده از رابطه $V = \sqrt{2gh}$ محاسبه می‌گردد. سرعت در مقطع اولیه پرش هیدرولیکی با استفاده از لوله پیتوت اندازه‌گیری و سپس با استفاده از رابطه پیوستگی عمق اولیه پرش محاسبه گردید (ایزدجو، ۱۳۸۳).

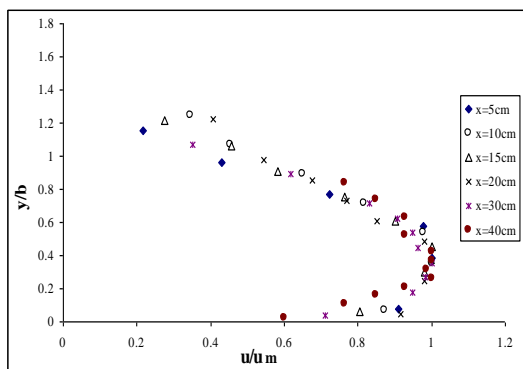
پروفیل عمقی سرعت در طول پرش در ۱۵ آزمایش اندازه‌گیری شد. شکل (۲) (الف تا و) نمونه‌ای از پروفیل‌های مورد نظر را نشان می‌دهند.



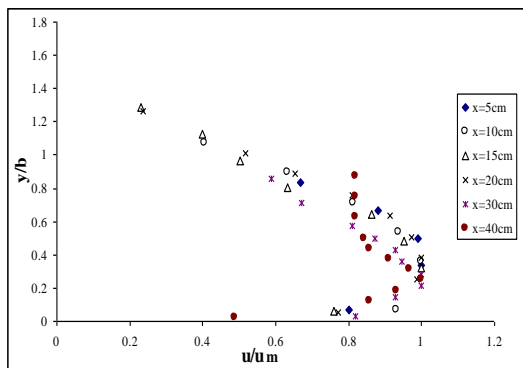
(الف) آزمایش ۲-A (Q=10 lit/s, Fr1=10.5)



شکل (۵): پروفیل‌های بی‌بعد سرعت آزمایش C-۸



شکل (۶): پروفیل‌های بی‌بعد سرعت آزمایش D-۱۱



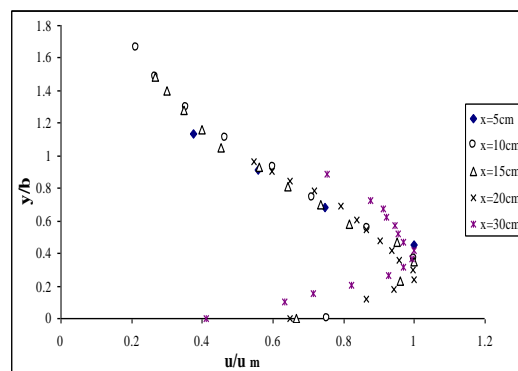
شکل (۷): پروفیل‌های بی‌بعد سرعت آزمایش E-۱۴

برای مقایسه بهتر می‌توان کلیه اطلاعات مربوط به پروفیل‌های بی‌بعد شده سرعت را در یک شکل ترسیم نمود. شکل (۸) منحنی تراکمی داده‌های ۱۵ آزمایش را به صورت یکجا نشان می‌دهد. مقدار پارامتر δ/b در تحقیق حاضر در محدوده ۰/۲۵ تا ۰/۶۱ و به طور متوسط ۰/۳۹ به دست آمد در حالی که ضخامت لایه مرزی بی‌بعد در بستر صاف، ۰/۱۶ است. با مقایسه نتایج این تحقیق با حالت کلاسیک (شکل ۹) ملاحظه می‌گردد که سرعت ماکزیمم بر روی بستر زیر نسبت به نازل دیواری

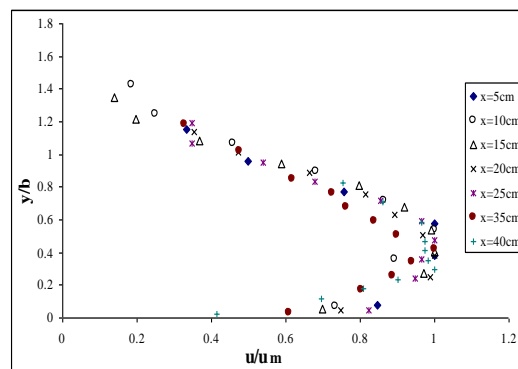
شکل (۲): (الف-و) پروفیل‌های عمقی سرعت در طول پرش هیدرولیکی در آزمایشات انجام شده

نتایج و بحث

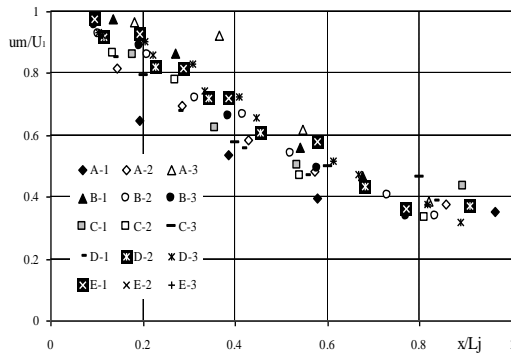
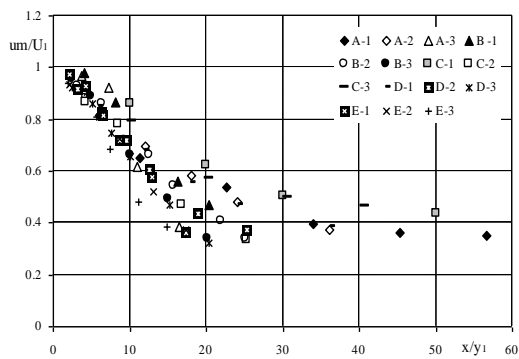
به منظور مقایسه پروفیل‌های قائم سرعت برداشت شده در آزمایش‌های مختلف با یکدیگر (شکل (۲) الف تا و)، مقادیر b (عمقی که در آن سرعت جریان برابر نصف سرعت ماکزیمم می‌باشد) برای هر منحنی به دست آمد و سپس مقادیر پارامترهای بی‌بعد y/b و u/um در هر آزمایش محاسبه گردید. شکل‌های ۳ تا ۷ پروفیل‌های سرعت بی‌بعد شده هر کدام از آزمایش‌های مورد نظر را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل‌ها مشخص است، توزیع سرعت در هر کدام از آزمایش‌های انجام شده متشابه می‌باشد.



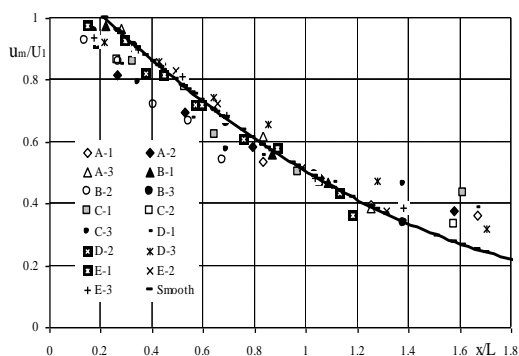
شکل (۳): پروفیل‌های بی‌بعد سرعت آزمایش A-۲



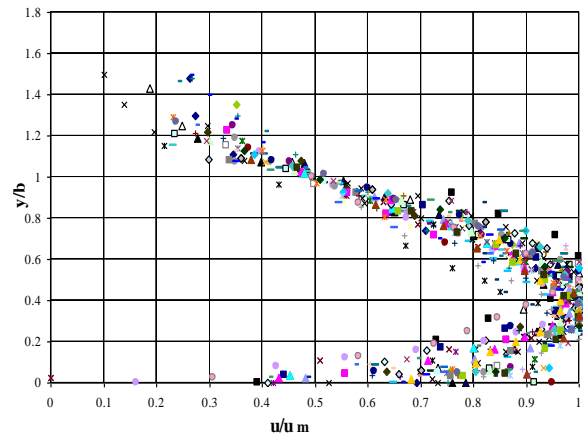
شکل (۴): پروفیل‌های بی‌بعد سرعت آزمایش B-۵

شکل (۱۰): تغییرات u_m/U_1 به ازای x/L_j شکل (۱۱): تغییرات u_m/U_1 به ازای x/y_1

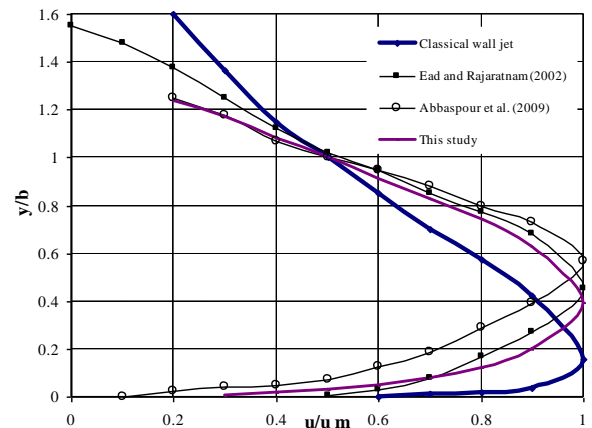
شکل (۱۲) تغییرات u_m/U_1 در برابر x/L را نشان می‌دهد که L فاصله افقی از ابتدای پرش است که در آن فاصله، سرعت ماکزیمم نصف سرعت متوسط U_1 می‌باشد ($u_m=0.5U_1$). این مقیاس طولی توسط لانگ و همکاران (۱۹۹۰) و راجاراتنام (۱۹۹۵) برای مطالعه پرش‌های آزاد و مستغرق مورد استفاده قرار گرفته است (اید و راجاراتنام، ۲۰۰۲). پس از آن اید و راجاراتنام (۲۰۰۲)، ایزدجو و شفافی بجستان (۲۰۰۷) و عباسپور و همکاران (۲۰۰۹) از این مقیاس برای مطالعه پرش بر روی بستر زبر استفاده نمودند.

شکل (۱۲): تغییرات u_m/U_1 به ازای x/L

کلاسیک در نقطه بالاتری اتفاق می‌افتد و ضخامت δ/b در ضخامت لایه مرزی) در پرش بر روی بستر زبر بیشتر خواهد بود.

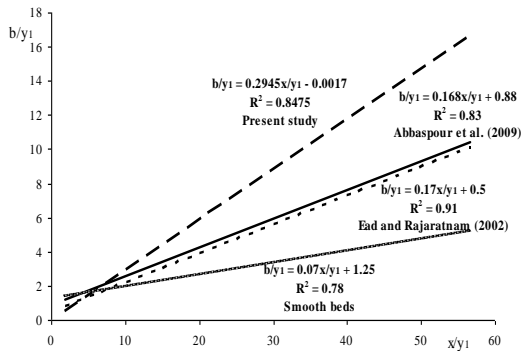


شکل (۸): منحنی تجمعی پروفیل‌های بی بعد شده سرعت



شکل (۹): پروفیل‌های بی بعد شده سرعت برای پرش بر روی بسترهای زبر و صاف

شکل‌های ۱۰ و ۱۱ تغییرات u_m/U_1 را به ترتیب به ازای x/L_j و x/y_1 نشان می‌دهند. همان‌طور که دیده می‌شود، نتایج حاصله، پراکندگی زیادی را نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مقیاس طولی انتخاب شده صحیح نمی‌باشد (اید و راجاراتنام، ۲۰۰۲).

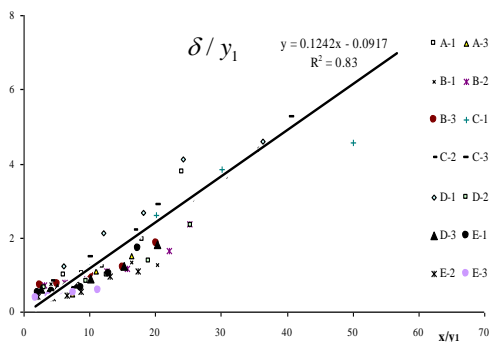


شکل (۱۴): تغییرات مقیاس طولی b/y_1 به ازای x/y_1 برای بسترهای صاف و زبر

ضخامت لایه مرزی (δ) در هر مقطع از پرش هیدرولیکی برابر عمقی است که در آن سرعت ماکزیمم است. شکل (۱۵) و (۱۶) تغییرات مقادیر ضخامت لایه مرزی بی‌بعد δ/y_1 و δ/b به ازای x/y_1 را نشان می‌دهند. روابط زیر برای ضخامت لایه مرزی بی‌بعد در امتداد طولی پرش هیدرولیکی برای بستر با زبری‌های مثلی تعیین شده است:

$$\frac{\delta}{y_1} = 0.1242 \frac{x}{y_1} - 0.0917, \quad R^2 = .83 \quad (۷)$$

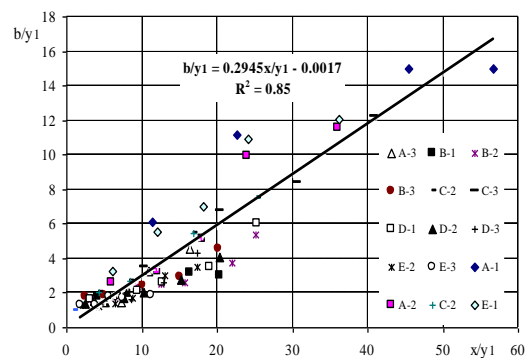
$$\frac{\delta}{b} = 0.39 \quad (۸)$$



شکل (۱۵): تغییرات ضخامت لایه مرزی بی‌بعد δ/y_1 به ازای x/y_1

شکل (۱۳) تغییرات مقیاس طولی بی‌بعد b/y_1 به ازای فواصل مختلف x را نشان می‌دهد. رابطه رگرسیونی خطی b/y_1 و x/y_1 در بسترهای موج‌دار مثلی مورد استفاده در این تحقیق به صورت زیر است:

$$\frac{b}{y_1} = 0.2945 \frac{x}{y_1} - 0.0017, \quad R^2 = 0.8475 \quad (۳)$$



شکل (۱۳): تغییرات مقیاس طولی b/y_1 به ازای x/y_1

رابطه رگرسیونی خطی b/y_1 و x/y_1 در بسترهای صاف عبارت است از:

$$\frac{b}{y_1} = 0.07 \frac{x}{y_1} + 1.25, \quad R^2 = 0.78 \quad (۴)$$

اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) و عباسپور و همکاران (۲۰۰۹) این نسبت را برای بستر با زبری‌های سینوسی به ترتیب به صورت روابط (۵) و (۶) به دست آوردند:

$$\frac{b}{y_1} = 0.17 \frac{x}{y_1} + 0.5, \quad R^2 = 0.91 \quad (۵)$$

$$\frac{b}{y_1} = 0.168 \frac{x}{y_1} + 0.88, \quad R^2 = 0.83 \quad (۶)$$

شکل (۱۴) مقایسه تغییرات مقیاس طولی b/y_1 به ازای x/y_1 را برای بسترهای صاف و زبر با توجه به تحقیقات دیگر محققین و نتایج حاصل از این تحقیق برای محدوده مورد نظر در این پژوهش را نشان می‌دهد.

افت نسبی انرژی در پرش هیدرولیکی

با معلوم بودن سرعت و عمق‌های اولیه و ثانویه پرش و به کار بردن معادله انرژی بین دو مقطع، می‌توان افت انرژی در پرش هیدرولیکی (E_{Lj})، را محاسبه نمود:

$$E_{Lj} = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1y_2} \quad (11)$$

معادله فوق، انرژی تلف شده در واحد وزن سیال را نشان می‌دهد.

نسبت E_{Lj}/E_1 را افت انرژی نسبی می‌نامند که از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\frac{E_{Lj}}{E_1} = \frac{(-3 + \sqrt{1 + 8Fr_1^2})^3}{8(2 + Fr_1^2)(-1 + \sqrt{1 + 8Fr_1^2})} \quad (12)$$

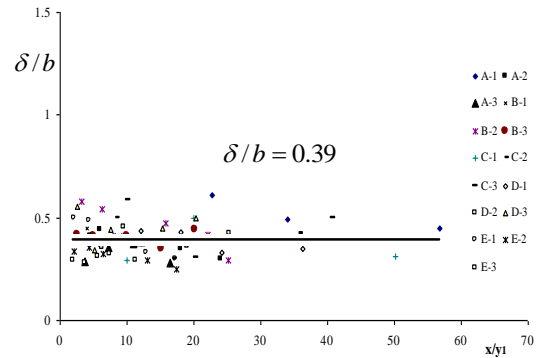
علت افت انرژی در پرش هیدرولیکی را می‌وان این چنین بیان کرد که میانگین انرژی جنبشی نخست به نوسانات سرعت تبدیل شده و سپس بر اثر لزجت تلف و به گرما تبدیل می‌گردد (ایزدجو، ۱۳۸۳).

اگر E'_L ، E_L به ترتیب افت انرژی مخصوص در پرش کلاسیک و پرش بر روی بستر زبر باشد، رابطه زیر بین E'_L ، E_L برقرار است:

$$\frac{E'_L}{E_L} = \frac{\left[1 - \frac{y_2}{y_2^*} \cdot \frac{y_2}{y_1}\right] + \frac{Fr_1^2}{2} \left[1 - \left(\frac{y_1}{y_2}\right) \left(\frac{y_2}{y_2^*}\right)^2\right]}{\left[1 - \frac{y_2}{y_1}\right] + \frac{Fr_1^2}{2} \left[1 - \left(\frac{y_1}{y_2}\right)^2\right]} \quad (13)$$

معادله (۱۳) برای دو مقدار زبری نسبی $K_0/y_1 = 0/0, 5/0, 5$ توسط راجاراتنام تعیین شده است که بیانگر این است که برای اعداد فرود مشابه، اتلاف انرژی بر روی بستر زبر بیشتر از مقدار متناظر آن در پرش کلاسیک می‌باشد.

مطالعات توکیای (۲۰۰۵) نشان داد که برای عدد فرود یکسان، انرژی تلف شده بر روی بسترهای زبر بزرگتر از مقدار متناظر بر روی بسترهای صاف است و



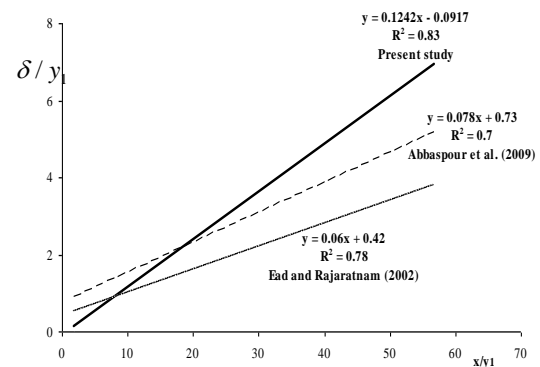
شکل (۱۶): تغییرات ضخامت لایه مرزی بی‌بعد δ/b به ازای x/y_1

روابط (۹) و (۱۰) به ترتیب مقادیر ضخامت لایه مرزی بی‌بعد (δ/y_1) به ازای x/y_1 را در مطالعات اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) و عباسپور و همکاران (۲۰۰۹)، برای زبری‌های سینوسی شکل را ارائه می‌نمایند:

$$\frac{\delta}{y_1} = 0.06 \frac{x}{y_1} + 0.42, \quad R^2 = 0.78 \quad (9)$$

$$\frac{\delta}{y_1} = 0.078 \frac{x}{y_1} + 0.73, \quad R^2 = 0.7 \quad (10)$$

همانطور که قبلاً بیان شد، ضخامت لایه مرزی بی‌بعد δ/b در بستر صاف $0/16$ می‌باشد. همچنین شکل (۱۷) تغییرات ضخامت لایه مرزی بی‌بعد δ/y_1 را به ازای x/y_1 برای محدوده آزمایشات این تحقیق با توجه به نتایج به دست آمده توسط اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) و عباسپور و همکاران (۲۰۰۹) برای زبری‌های سینوسی و نتایج حاصل از مطالعه حاضر برای زبری‌های مثلثی را نشان می‌دهد.



شکل (۱۷): تغییرات ضخامت لایه مرزی بی‌بعد δ/y_1 به ازای x/y_1 برای بستر با زبری‌های متفاوت

$$\frac{E_L}{E_1} = 0.8864(1 - \exp^{-0.2245Fr_1}), R^2 = 0.95 \quad (14)$$

نرخ اتلاف انرژی (G) به فرم رابطه زیر تعریف می‌گردد (توکیبای، ۲۰۰۵):

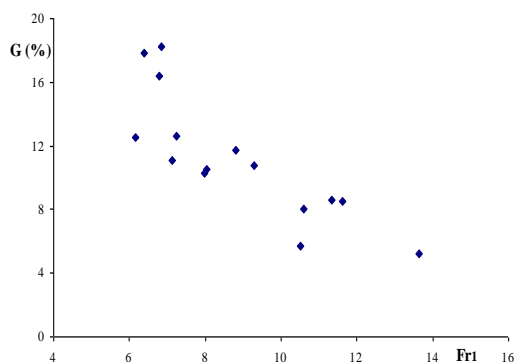
$$G = \frac{E_L - E'_L}{E'_L} \times 100 \quad (15)$$

نتایج تحقیق مورد نظر نشان داد که نرخ افت انرژی پرش هیدرولیکی در بسترهای موج‌دار با افزایش عدد فرود کاهش می‌یابد.

مطالعات ایزدجو (۱۳۸۳) نشان داد که راندمان پرش در بسترهای زیر (η_1)، در اعداد فرود کمتر از حدود شش، کمتر از مقادیر مربوطه در بستر صاف (η^*) و در اعداد فرود بزرگتر از حدود شش، مقادیر راندمان پرش بر روی بستر زیر بیشتر از مقادیر مربوطه بر روی بستر صاف است.

نرخ اتلاف انرژی (G) از رابطه (۱۵) محاسبه شده و تغییرات نرخ اتلاف انرژی پرش هیدرولیکی به ازای اعداد فرود اولیه در شکل (۱۹) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که نرخ اتلاف انرژی پرش هیدرولیکی در بسترهای موج‌دار با افزایش عدد فرود کاهش می‌یابد که با نتایج گزارش شده توسط عباسپور و همکاران (۲۰۰۹) مطابقت دارد. رابطه تغییرات نرخ اتلاف انرژی با عدد فرود به صورت زیر می‌باشد:

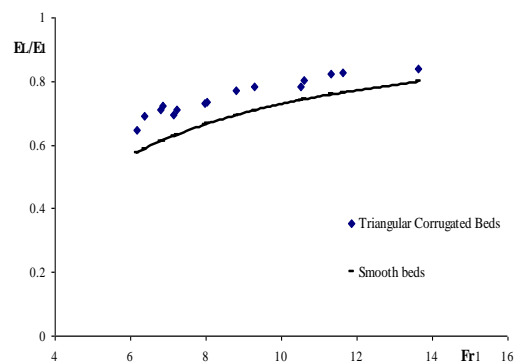
$$G(\%) = 122.5Fr_1^{-1.138}, R^2 = 0.67 \quad (16)$$



شکل (۱۹): تغییرات نرخ اتلاف انرژی پرش هیدرولیکی به ازای اعداد فرود اولیه

نرخ اتلاف انرژی برای پرش‌ها بر روی بسترهای موج‌دار با افزایش عدد فرود، کاهش می‌یابد و برای اعداد فرود بزرگتر از هشت به یک مقدار ثابت شش درصد منجر می‌شود. همچنین عباسپور و همکاران (۲۰۰۹) دریافتند که به ازای عدد فرود یکسان اتلاف انرژی در بسترهای موج‌دار بیشتر از بسترهای صاف است.

منحنی تغییرات افت نسبی انرژی (E_L/E_1) در مقابل اعداد فرود اولیه برای هر زبری بستر ترسیم گردید. در شکل (۱۹) روند تغییرات یاد شده برای پرش هیدرولیکی کلاسیک مورد محاسبه قرار گرفته از رابطه (۱۲) و زبری‌های مختلف بستر حاصل از آزمایشات نشان داده شده است. در این شکل، نقاط، مربوط به داده‌های آزمایشگاهی و خطوط ممتد نشانگر پرش هیدرولیکی کلاسیک است.



شکل (۱۸): تغییرات اتلاف انرژی نسبی پرش هیدرولیکی در بسترهای موج‌دار به ازای اعداد فرود اولیه

مقایسه‌های صورت گرفته بر اساس روند تغییرات افت انرژی نسبی پرش از شکل (۱۸) نشان می‌دهد که، برای کلیه حالات، افت نسبی انرژی پرش بر روی بستر زیر با افزایش عدد فرود افزایش می‌یابد و افزایش افت نسبی انرژی پرش در بستر زیر بیشتر از پرش هیدرولیکی بر روی بستر صاف می‌باشد که با نتایج گزارش شده توسط توکیبای (۲۰۰۵) و عباسپور و همکاران (۲۰۰۹) مطابقت دارد.

با توجه به شکل (۱۹) و نتایج حاصل از آزمایشات می‌توان رابطه E_L/E_1 بر حسب Fr_1 را به صورت زیر ارائه نمود:

مشابه بوده و با پروفیل جت آب بر روی بستر صاف متفاوت می‌باشند. همچنین مقدار ضخامت لایه مرزی بی بعد بر روی بستر موج‌دار برابر 0.39 به دست آمد که نسبت به زبری‌های دیگر از جمله زبری سینوسی و دوزنقه‌ای، به ضخامت لایه مرزی در بستر صاف که معادل 0.16 است، نزدیکتر است. همچنین نتایج نشان داد که بین تغییرات um/U_1 در برابر x/L (که $um=0.5U_1$ و L فاصله افقی از ابتدای پرش) به دست آمده در این تحقیق و منحنی به دست آمده برای بستر صاف تفاوت معنی‌دار وجود ندارد. در نهایت مشخص شد افت انرژی در پرش بر روی بستر موج‌دار مثلثی، حداقل $5/18\%$ ، حداکثر $11/2\%$ و به‌طور میانگین $11/3\%$ بیشتر از بستر صاف است.

نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر اثر زبری‌های مثلثی شکل بر پروفیل‌های سرعت در مقاطع مختلف پرش هیدرولیکی در آزمایشگاه بر روی مدل فیزیکی مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی در این تحقیق بررسی تاثیر زبری‌های ممتد مثلثی بر پروفیل سرعت در طول پرش هیدرولیکی و استهلاك انرژی و مقایسه نتایج با تحقیقات قبلی انجام شده در خصوص پروفیل سرعت در طول پرش هیدرولیکی بر روی سایر بسترهای زبر و نیز پرش بر روی بستر صاف بود.

در همه آزمایشات، تاثیر زبری‌های بستر بر پرش هیدرولیکی در اعداد فرود مختلف با تحلیل پروفیل سرعت و استهلاك انرژی بررسی شد. پارامترهای بی‌بعد هیدرولیکی به صورت تابعی از عدد فرود تعیین گردید. بررسی پروفیل‌های سرعت اندازه‌گیری شده در مقاطع مختلف پرش هیدرولیکی نشان داد که این پروفیل‌ها

منابع

- ۱- ایزدجو، ف. ۱۳۸۳. تاثیر موج بودن بستر بر روی طول پرش و نوسانات زیر فشار در حوضچه‌های آرامش از نوع پرش هیدرولیکی. پایان‌نامه‌ی دکترای سازه‌های آبی، دانشکده‌ی مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- 2- Abbaspour, A., A. Hosseinzadeh Dalir, D. Farsadizadeh and A.A. Sadraddini. 2009. Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics. Applied Sciences 9(11):2045-2055.
- 3- Ead, S.A., N. Rajaratnam, C. Katopodis and F. Ade. 2000. Turbulent open channel flow in circular corrugated culverts. Hydraulic Engineering 126(10):750-757.
- 4- Ead, S.A. and N. Rajaratnam. 2002. Hydraulic jumps on corrugated bed. Hydraulic Engineering 128(2):656-663.
- 5- Hager, W.H. 1992. Energy dissipators and hydraulic jump. Kluwer academic Publishers.
- 6- Izadjoo, F. and M. Shafai Bejestan. 2007. Corrugated bed hydraulic jump stilling basin. Applied Sciences 7(8):1164-1169.
- 7- Peterka, A.J. 1983. Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators. Engineering Monograph No. 25, U.S. Bureau of Reclamation, Denver. Seventh Printing.
- 8- Rajaratnam, N. 1968. Hydraulic jump on rough bed. Trans. Eng. Inst. Canada 11:1-8.
- 9- Shafai Bejestan, M. and K. Neisi. 2009. A New Roughened Bed Hydraulic Jump Stilling Basin. Applied Sciences 2(5): 436-445.
- 10- Tokyay, N.D. 2005. Effect of channel bed corrugations on hydraulic jumps. EWRI, Water & Environmental Resources Congress, Anchorage, Alaska, USA.

A Laboratory study of Velocity profile at Hydraulic Jump on Triangular Corrugated Bed

M. Ghazali¹, H. Samadi Boroujeni², A. Rahmati³, B. Ghorbani⁴

Abstract

In the present research, the hydraulic jump characteristics were studied experimentally over five triangular corrugated beds at the Hydraulics Laboratory of the Department of Water Engineering, University of Shahrekord, Iran. The flume has the dimensions of 0.4 m wide, 0.4 m deep and 12 m long. A total number of 15 tests were carried out for the range of initial Froude number from 6.1 to 13.1. In all tests, effect of triangular corrugated bed on velocity profiles and energy dissipation were studied. The dimensionless hydraulic parameters were determined as a function of the Froude number. The analysis of velocity profiles at different sections of the jump showed that the velocity profiles were similar and different from the profile of the simple plane wall jet. The normalized boundary layer thickness δ/b was equal to 0.39 for jumps on corrugated bed compared to 0.16 for the simple wall jet. It was also found that for similar Froude number the energy loss of jump on corrugated bed is more than the smooth bed (average=11.3%).

Key words: Hydraulic jump, Triangular corrugated beds, Velocity profiles, Energy loss.

¹ Former M. Sc. Student, Department of Water Engineering, faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

² Assistant professor, Department of Water Engineering, faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

³ Former M. Sc. Student, Department of Water Engineering, faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

⁴ Associate professor, Department of Water Engineering, faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.