

مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش کانال‌های آبیاری با بستر موج‌دار

رضا بدیع زادگان^{۱*} - کاظم اسماعیلی^۲ - محمود فغفورمغربی^۳ - مجتبی صانعی^۴

تاریخ دریافت: ۸۹/۱۰/۲۶

تاریخ پذیرش: ۹۰/۲/۱۸

چکیده

یکی از مهمترین پدیده‌های هیدرولیکی در جریان‌های متغیر سریع، پرش هیدرولیکی می‌باشد که در فاصله کوتاهی جریان از حالت فوق بحرانی به زیر بحرانی تغییر می‌نماید. اکثر پژوهشگران در تحقیقات خود سعی بر این دارند با تغییر ساختگاه تشکیل پرش، شرایط را برای بیشترین میزان انرژی فراهم آورند. این امر موجب کاهش نسبت عمق‌های مزدوج Y_2/Y_1 و طول پرش نسبت به پرش کلاسیک یا نوع A می‌شود. هدف از این پژوهش مطالعه پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش با بستر سینوسی می‌باشد. در این پژوهش عمق موج t به طول موج S که با مقدار بدون بعد شیب موج t/S نشان داده می‌شود در محدوده ۰/۱۶۷ تا ۰/۷۵ و تغییرات عدد فرود اولیه بین ۴/۶ تا ۱۲/۲۶ می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد با به کارگیری بستر موج‌دار سینوسی در حوضچه آرامش، می‌توان شاهد کاهش، نسبت اعماق ثانویه به اولیه تقریباً به میزان ۲۰ درصد در بیشترین مقدار خود در حدود عدد فرود ۱۲ و کاهش طول پرش هیدرولیکی به میزان ۳۵ درصد نسبت به پرش کلاسیک در این نوع از حوضچه‌ها بود.

واژه‌های کلیدی: پرش هیدرولیکی، بسترهای موج‌دار سینوسی، شیب موج

مقدمه

در این رابطه $Fr_1 = V_1 / \sqrt{gy_1}$ عدد فرود در مقطع بالادست پرش و g شتاب ثقل می‌باشد.

در ساختمان‌های مستهلک کننده انرژی آب یا همان حوضچه‌های آرامش، معمولاً از بلوک‌ها و آب پایه‌ها به عنوان لوازم جانبی برای کنترل پرش در حوضچه‌ها استفاده می‌شود که می‌توان به کاربرد آنها در تثبیت، کنترل، کاهش عمق ثانویه و طول پرش اشاره نمود. از این رو توسعه تحقیقات بعدی محققین در جهت بکارگیری اجزاء زیر در کف حوضچه‌های آرامش و بررسی تاثیر زبری‌ها بر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی بوده است.

حوضچه‌های آرامش با بستر زبر به حوضچه‌هایی اطلاق می‌شود که المان‌های زبری به صورت نوارهای موازی یکنواخت، عمود بر جهت جریان در کف حوضچه قرار گرفته باشند و از آنجا که مقاومت حوضچه آرامش در مقابل فرسایش و کاویناسیون حائز اهمیت می‌باشد، بر اساس نظر اید و راجاراتنام (۴) نوارهای زبری در داخل حوضچه باید به نحوی قرار گیرند که تاج آنها هم سطح بستر بالا دست بوده و نقش گودافتادگی را ایفا نمایند.

تاکنون مطالعات مختلفی در زمینه تشکیل پرش هیدرولیکی روی بسترهای زبر انجام گرفته است، اما با توجه به گستردگی شرایط و پیچیدگی رفتار جریان در حالات مختلف لزوم تحقیقات بیشتر در این زمینه ضروری بنظر می‌رسد.

پرش هیدرولیکی از پدیده‌های مهم در علم هیدرولیک بوده و در زمره جریان‌های متغیر سریع طبقه‌بندی می‌شود. این پدیده امکان استهلاک انرژی اضافی آب را در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی نظیر سربازها، تندآب‌ها، و دریچه‌ها فراهم می‌آورد. ساده‌ترین نوع پرش هیدرولیکی را که در کانال‌هایی با مقطع مستطیلی و کف افقی تشکیل می‌شود، پرش هیدرولیکی کلاسیک یا نوع A می‌نامند که بطور وسیع توسط پترکا (۱۹۵۸)، راجاراتنام (۹)، هاگر و برمن (۱۹۸۹) و ... مورد بررسی قرار گرفته است (۳). بر اساس رابطه ارائه شده توسط بلانگر (۱۸۲۸) عمق ثانویه پرش هیدرولیکی کلاسیک y_2^* به ازای عمق اولیه یا همان عمق فوق بحرانی در پنجه پرش y_1 و سرعت متوسط V_1 در این مقطع به صورت زیر بدست می‌آید (۳):

$$y_2^* / y_1 = \frac{1}{2} (\sqrt{1 + 8Fr_1} - 1) \quad (1)$$

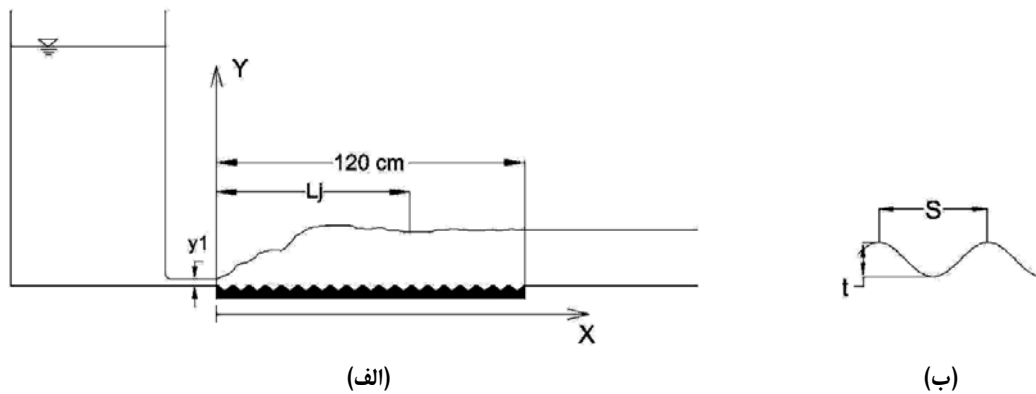
۱- دانشجوی کارشناسی ارشد و استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده

کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

(*) نویسنده مسئول : (Email: rbadizadegan@gmail.com)

۳- استاد گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۴- استادیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری



شکل ۱- (الف) پرش هیدرولیکی روی بستر موج‌دار سینوسی (ب) جزئیات موج بستر

بسترهای موج‌دار در بازه عدد فرود ۱۰-۴ با ارتفاع نسبی موج t/y_1 برابر ۰/۲۵، ۰/۴۳، و ۰/۵ انجام دادند. نتایج آنها نشان داد عمق پایاب مورد نیاز برای تشکیل پرش روی بستر زبر نسبت به بستر صاف کمتر بوده و طول پرش روی بسترهای موج‌دار نصف طول پرش روی بستر صاف می‌باشد و همچنین تنش برشی نیز در حدود ۱۰ برابر تنش برشی روی بستر صاف است.

ایزدجو و همکاران (۱) مطالعات خود را در زمینه پرش هیدرولیکی روی بسترهای زبر به شکل نوارهای با مقطع دوزنقه‌ای با مقادیر t/y_1 در بازه ۰/۳۷۱ تا ۱/۲۳۳ و S/y_1 (فاصله بین زبری‌ها) در بازه ۰/۹۷۱ تا ۸/۳۳۳ در محدوده عدد فرود ۴ تا ۱۲ انجام داده نشان دادند موج‌دار بودن بستر باعث کاهش عمق ثانویه پرش به میزان ۲۰ درصد و نیز کاهش طول پرش به میزان ۵۰ درصد نسبت به پرش نوع کلاسیک می‌شود.

توکای (۱۰) اثرات بستر موج‌دار را بر روی پرش هیدرولیکی به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داد. در آزمایش‌های وی شیب موج t/s برابر ۰/۱، ۰/۲، ۰/۲۶ بوده و مطالعات در بازه عدد فرود ۱۲-۵ صورت گرفته که نتایج وی نشان می‌دهد که طول پرش حدود ۳۵ درصد و نسبت عمق ثانویه به اولیه در حدود ۲۰ درصد کمتر از شرایط مشابه در پرش نوع کلاسیک است.

عباسپور و همکاران (۲) مطالعات آزمایشگاهی دیگری روی بسترهای موج‌دار سینوسی در محدوده عدد فرود ۳/۸ تا ۸/۶ با مقادیر شیب موج t/s در بازه ۰/۲۸۶ تا ۰/۶۲۵ انجام دادند. همچنین نتایج آنها نشان داد که به ازای عمق اولیه و فرود معین عمق ثانویه حدود ۲۰ درصد نسبت به بستر صاف کاهش یافته و نیز طول پرش در مقایسه با پرش کلاسیک تقریباً به نصف کاهش پیدا کرده است.

گوهری و فرهودی (۵) آزمایشات خود را بر روی بسترهایی با زبری‌های نواری مستطیلی انجام دادند. بازه اعداد فرود مورد آزمایش

راجاتنام (۹) اولین کسی بود که مطالعات سیستماتیک خود را در زمینه پرش هیدرولیکی روی بسترهای زبر انجام داد وی پارامتر $k = k_e / y_1$ را به عنوان عامل زبری معرفی نمود که k_e ارتفاع معادل زبری و y_1 عمق جریان ورودی قبل از پرش به بستر زبر می‌باشد. او همچنین بیان نمود که طول پرش L_z و طول غلظاب L_t روی بسترهای زبر در مقایسه بسترهای صاف بطور قابل ملاحظه ای کاهش می‌یابد.

لوت هوسر و شیلر (۷) در زمینه جریان‌های ورودی روی بستر زبر مطالعاتی انجام دادند، آنها بیان نمودند که وجود زبری در کف باعث تسریع در رشد لایه مرزی شده و برای ایجاد جریان‌های فوق بحرانی توسعه یافته در پایین دست دریچه‌ها و سربزه‌ها نیاز به طول کوتاه‌تری است.

هیوز و فلاک (۶) بیان نمودند که ناهمواری‌های مرزی بطور قطع عمق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی را کاهش می‌دهد که این میزان کاهش تابعی از عدد فرود اولیه و میزان ناهمواری نسبی بستر می‌باشد.

موریس (۸) مفهوم زبری را مورد بررسی قرار داد. وی فرض کرد افت هد در جریان متلاطم روی بستر زبر بیشتر ناشی از جریان‌های گردابی می‌باشد. همچنین وی بیان نمود فاصله بین اجزاء زبری می‌تواند بر تشکیل حرکت‌های گردابه‌ای تاثیر گذار باشد. چنانچه فاصله بین اجزاء زبری زیاد باشد گردابه‌ها به صورت مستقل تشکیل شده و اگر فاصله خیلی نزدیک باشد سطح زبری به حالت یک سطح صاف عمل می‌نماید. وی این شرایط را، مبنای تقسیم بندی جریان، روی سطوح زبر بصورت زیر قرار داد.

۱- جریان با زبری مجزا ۲- جریان با تداخل ضعیف ۳- جریان تقریباً صاف

اید و راجاتنام (۴) آزمایش‌های در زمینه پرش هیدرولیکی روی

آنها ۳ تا ۱۰ بود است. آنها مشاهده کردند عمق ثانویه پرش روی این نوع از زبری نسبت به سطح صاف کاهش دارد و این کاهش با افزایش فاصله بین زبری‌ها، افزایش می‌یابد. همچنین پی‌بردند که تغییر ارتفاع زبری‌ها و عمق اولیه پرش اثر ناچیزی بر مشخصات هیدرولیکی می‌گذارند.

این پژوهش، با هدف ارزیابی نتایج تحقیقات قبلی از طریق انجام آزمایشات لازم برای بررسی تغییرات خصوصیات پرش هیدرولیکی روی بسترهای موج‌دار سینوسی انجام گرفته است.

مواد و روش‌ها

تحلیل ابعادی

ویژگی‌های پرش هیدرولیکی روی بسترهای موج‌دار سینوسی متأثر از خصوصیات سیال، مشخصات فیزیکی بستر و شرایط هیدرولیکی جریان می‌باشد. ارتفاع عمق ثانویه پرش بر روی بسترهای سینوسی را می‌توان وابسته به ارتفاع موج t ، طول موج s ، عمق اولیه پرش y_1 ، سرعت متوسط جریان V_1 ، شتاب ثقل g ، لزجت سیال μ و جرم مخصوص ρ دانست.

$$y_2 = f_1(y_1, V_1, t, s, g, \mu, \rho) \quad (2)$$

به کارگیری روش پی‌باکینگهام برای دستیابی به گروه‌های بدون بعد، موثر بر جریان به صورت زیر خواهد بود.

$$\frac{y_2}{y_1} = f_2\left(\text{Re} = \frac{\rho V_1 y_1}{\mu}, Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g y_1}}, \frac{t}{y_1}, \frac{s}{y_1}\right) \quad (3)$$

در تابع فوق Fr_1 عدد فرود اولیه و Re عدد رینولدز جریان می‌باشد. براساس محاسبات انجام شده عدد رینولدز آزمایش‌های صورت گرفته در محدوده ۲۳۰۰۰ تا ۵۷۰۰۰ قرار دارد و از آنجا که این اعداد بیشتر از ۲۰۰۰ می‌باشند، می‌توان به همین خاطر از اثر لزجت صرف نظر نمود.

$$\frac{y_2}{y_1} = f_3\left(Fr_1, \frac{t}{y_1}, \frac{s}{y_1}\right) \quad (4)$$

در رابطه (۴) t/y_1 و s/y_1 به ترتیب ارتفاع و طول موج بی بعد می‌باشند که از تقسیم آنها بر یک دیگر، گروه جدید t/s حاصل

می‌گردد.

$$\frac{y_2}{y_1} = f_3\left(Fr_1, \frac{t}{s}\right) \quad (5)$$

در تابع فوق t/s نسبت به عنوان شیب موج شناخته می‌شود و تأثیر موج‌دار بودن بستر را روی نسبت عمق ثانویه به اولیه در پرش هیدرولیکی بیان می‌نماید. بطور مشابه می‌توان تغییرات طول پرش هیدرولیکی L_j را نیز وابسته به عدد فرود اولیه و شیب موج دانست.

$$\frac{L_j}{y_2} = f_4\left(Fr_1, \frac{t}{s}\right) \quad (6)$$

مشخصات کانال آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در کانالی با مقطع مستطیلی به عرض ۳۰ سانتیمتر، ارتفاع ۴۰ سانتیمتر و طول ۱۲ متر انجام گردید. کانال مجهز به یک سیستم پمپ حلزونی برای به چرخش در آوردن جریان آب در کانال می‌باشد. در انتهای کانال یک سرریز مستطیلی هم عرض کانال قرار گرفته که با کالیبره شدن سرریز به روش حجمی می‌توان با اندازه گیری عمق آب روی سرریز میزان جریان عبوری را بدست آورد. برای ایجاد جریان فوق بحرانی از یک دریچه کشویی نصب شده بر روی مخزن ابتدای کانال استفاده شد. با ثابت نگه داشتن بازشدگی دریچه، به میزان ۲ سانتیمتر و تغییر ارتفاع آب در داخل مخزن میزان شدت جریان تغییر می‌نمود. حداکثر ارتفاع آب در مخزن ۱۰۵ سانتیمتر نسبت به بستر بالادست پرش هیدرولیکی می‌باشد.

آزمایش‌ها و مشخصات بسترهای موج دار سینوسی

برای انجام آزمایش‌ها اقدام به ساخت ۷ مدل بستر سینوسی از جنس بتن گردید که مشخصات آنها در جدول ۱ آمده است. همچنین پارامترهای این جدول در شکل ۱ نشان داده شده است. همان طور که قبلاً ذکر شد برای ایجاد جریان فوق بحرانی از یک مخزن به ارتفاع ۷۵ سانتیمتر استفاده گردید. به منظور جلوگیری از تأثیر اثر انقباض ناشی از دریچه بر جریان خروجی اندازه‌گیری عمق اولیه به فاصله تقریبی ۲۰ سانتیمتر بعد از دریچه صورت گرفت.

جدول ۱- مشخصات بسترهای موج‌دار سینوسی

شماره زبری	نام زبری	طول موج		شماره زبری	نام زبری	عمق موج	
		s (mm)	t (mm)			s (mm)	t (mm)
۱	A	۲۰	۱۰	۵	E	۶۰	۱۰
۲	B	۴۰	۱۰	۶	F	۶۰	۲۰
۳	C	۴۰	۲۰	۷	G	۶۰	۳۰
۴	D	۴۰	۳۰				

تأثیر شیب موج در تمامی پرش‌ها به صورت تقریباً یکسان می‌باشد. این مسئله ناشی از آن است که تاج موج‌ها هم تراز با کف کانال بالادست بوده و بستر موج‌دار سینوسی به صورت حفره عمل می‌نماید. برای بررسی‌های بیشتر به صورت جداگانه هر کدام از بسترها را با هم مقایسه نموده که نتایج آن در جدول ۲ آمده است.

نتایج اغلب محققین نشان می‌دهد، تأثیر شیب موج t/s بر نسبت اعماق ثانویه به اولیه ناچیز بوده و لذا می‌توان از آن صرف نظر نمود. جدول ۴ برخی از روابط ارائه شده را نشان می‌دهد.

همان‌طور که بیان شد در شکل ۴ مقادیر اعماق ثانویه به اولیه، حاصل از آزمایش‌های انجام شده روی بسترهای موج‌دار سینوسی و صاف با رابطه ۱ که توسط بلانگر برای بسترهای صاف ارائه گردیده نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود نتایج بدست آمده از آزمایش‌های صورت گرفته روی بستر صاف با معادله بلانگر تطابق خوبی داشته و همچنین نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود اولیه، نسبت اعماق ثانویه به اولیه روی بسترهای موج‌دار نسبت به بستر صاف کاهش یافته که این میزان کاهش در بیشترین حالت خود، در حدود عدد فرود ۱۲ تقریباً برابر ۲۰ درصد می‌باشد.

همچنین اید و راجاراتنام (۴) پارامتر کاهش عمق نسبی را به صورت روبه‌رو معرفی نمودند:

$$D' = \frac{y_2^* - y_2}{y_2^*} \quad (7)$$

در این رابطه y_2^* عمق ثانویه پرش روی بستر صاف (پرش کلاسیک) به ازای عمق اولیه و عدد فرود اولیه یکسان با بستر موج‌دار سینوسی می‌باشد. در شکل ۵ تغییرات مقدار کاهش عمق نسبی پرش هیدرولیکی روی بسترهای موج‌دار سینوسی به ازای اعداد مختلف فرود نمایش داده شده است. مطابق این شکل در محدوده عدد فرود ۴/۶ تا ۱۲/۲۶ و شیب موج بستر ۰/۱۶۷ تا ۰/۷۵ متوسط کاهش عمق نسبی D' برابر ۰/۱۵ می‌باشد که بیانگر این است که متوسط کاهش عمق ثانویه روی بسترهای موج‌دار سینوسی در حدود ۱۵ درصد نسبت به بستر صاف می‌باشد.

عمق اولیه در تمامی آزمایش‌ها با ثابت نگه داشتن بازشدگی دریچه به صورت یکسان، حدوداً برابر ۱۳ میلی‌متر بوده است. در تمامی آزمایش‌ها پروفیل سطح آب به صورت عکس برداری دیجیتال بدست آمده است. برای اندازه‌گیری سرعت در جهت جریان از یک سرعت سنج پروانه‌ای به همراه نمایشگر عددی آن، که دقت آن برابر cm/s ۰/۱ می‌باشد مقادیر سرعت در مرکز کانال در سه مقطع با فواصل حدوداً مساوی به ثبت رسیده است. در این پژوهش تعداد ۴۵ آزمایش انجام گرفت که محدوده‌ی اعداد فرود آن بین ۴/۶ تا ۱۲/۲۶ بوده و همچنین بازه تغییرات شیب موج بستر t/s در محدوده ۰/۱۶۷ تا ۰/۷۵ انتخاب گردید.

نتایج و بحث

برای بررسی ویژگی‌های پرش هیدرولیکی روی بسترهای موج‌دار سینوسی مشخصاتی از جمله پروفیل سطح آب، نسبت اعماق ثانویه به اولیه، طول نسبی پرش هیدرولیکی و پروفیل سرعت در مقاطع مختلف پرش، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

پروفیل سطح آب در پرش هیدرولیکی

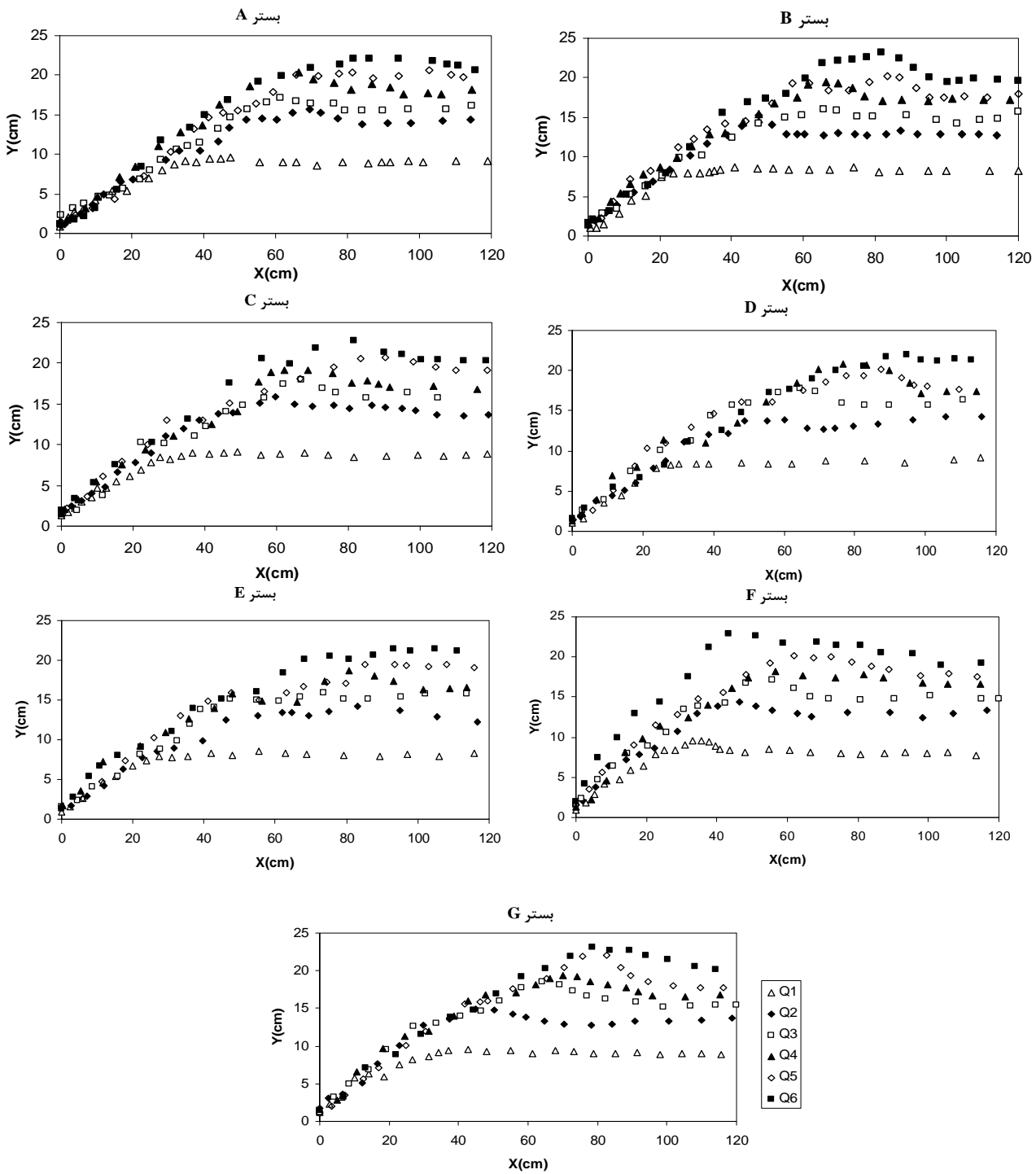
پروفیل سطح آب در پرش هیدرولیکی برای تعیین محل و میزان عمق اولیه y_1 ، عمق ثانویه y_2 و طول پرش هیدرولیکی L_r استفاده می‌گردد (شکل ۲). نتایج بدست آمده از پروفیل بی‌بعد شده سطح آب (شکل ۳) حاکی از آن است که پروفیل سطح آب در مورد تمامی آزمایش‌ها روند مشابه‌ای داشته و امکان انتخاب یک منحنی را برای تمامی نتایج ممکن می‌سازد.

نسبت عمق ثانویه به اولیه در پرش هیدرولیکی

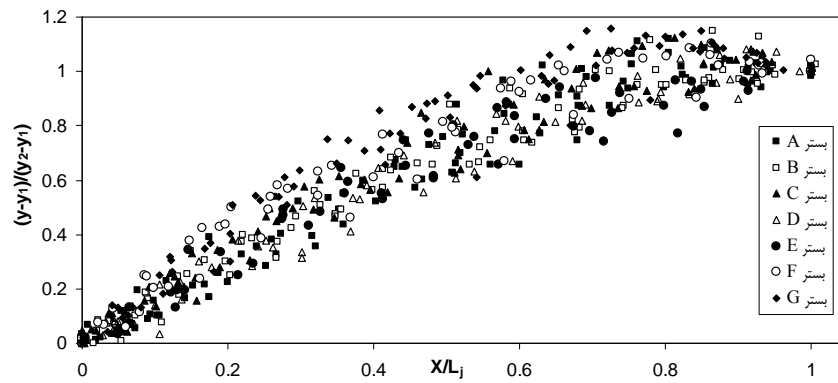
با توجه به رابطه ۵ می‌توان نسبت عمق ثانویه به اولیه y_2/y_1 را تابعی از عدد فرود اولیه پرش و نسبت شیب موج t/s دانست. جهت بررسی تأثیر شیب موج‌های بستر، تغییرات عمق ثانویه به اولیه نسبت به عدد فرود در شکل ۴ نمایش داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود مقادیر عمق نسبی پرش تابعی از عدد فرود اولیه می‌باشد و

جدول ۲- روابط بدست آمده از رگرسیون نسبت اعماق ثانویه به اولیه در عددهای فرود مختلف بر اساس، نوع بسترها

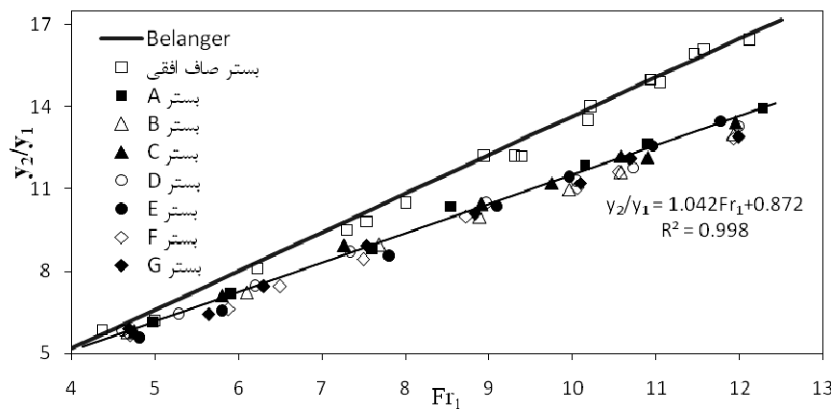
نوع بستر	معادله y_2/y_1	R^2	نوع بستر	معادله y_2/y_1	R^2
بستر A	$y_2/y_1 = 1.083 Fr_1 + 0.8$	0.995	بستر G	$y_2/y_1 = 1.004 Fr_1 + 1.119$	0.992
بستر B	$y_2/y_1 = 0.984 Fr_1 + 1.237$	0.999	بسترهای هم طول موج $S = 4$	$y_2/y_1 = 1.011 Fr_1 + 1.17$	0.993
بستر C	$y_2/y_1 = 1.033 Fr_1 + 1.129$	0.994	بسترهای هم طول موج $S = 6$	$y_2/y_1 = 1.054 Fr_1 + 0.653$	0.99
بستر D	$y_2/y_1 = 1.006 Fr_1 + 1.197$	0.997	بسترهای هم عمق موج $t = 1$	$y_2/y_1 = 1.075 Fr_1 + 0.62$	0.987
بستر E	$y_2/y_1 = 1.155 Fr_1 + 0.162$	0.996	بسترهای هم عمق موج $t = 2$	$y_2/y_1 = 1.039 Fr_1 + 0.861$	0.987
بستر F	$y_2/y_1 = 1.019 Fr_1 + 0.815$	0.996	بسترهای هم عمق موج $t = 3$	$y_2/y_1 = 1.005 Fr_1 + 1.16$	0.994



شکل ۲- پروفیل سطح آب در پرس هیدرولیکی



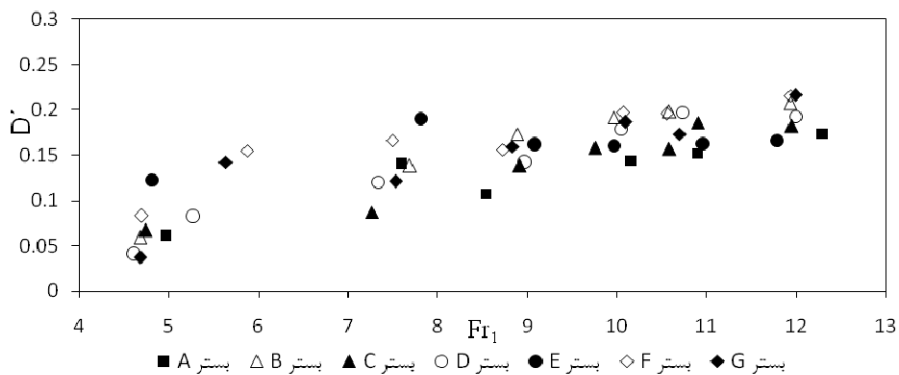
شکل ۳- پروفیل بی بعد شده سطح آب در پرش هیدرولیکی



شکل ۴- تغییرات عمق نسبی پرش هیدرولیکی در بسترهای موج دار سینوسی و صاف به ازای اعداد فرود اولیه

جدول ۴- روابط ارائه شده توسط محققین مختلف برای نسبت اعماق ثانویه به اولیه پرش روی بسترهای موج دار

نام پژوهشگر	R^2	رابطه ارائه شده
راجاراتنام	۰/۹۹	$y_2/y_1 = Fr_1$
عباسپور و همکاران	۰/۹۱	$y_2/y_1 = 1.1146Fr_1$
توکبای	۰/۹۳۷۶	$y_2/y_1 = 1.1223Fr_1 + 0.0365$
این پژوهش	۰/۹۹۸	$y_2/y_1 = 1.042Fr_1 + 0.872$



شکل ۵- تغییرات مقدار کاهش عمق نسبی پرش هیدرولیکی نسبت به اعداد فرود اولیه

طول نسبی پرش هیدرولیکی

طول پرش یکی از پارامترهای مهم در طراحی حوضچه‌های آرامش می‌باشد. در تعریف معیار طول پرش، فاصله افقی بین پنجه پرش تا محلی که سطح آب بلافاصله پس از آخرین موج غلطایی تقریباً برابر با ارتفاع پایاب بوده و افقی می‌شود را طول پرش هیدرولیکی می‌نامند. شکل ۶ طول بی‌بعد شده پرش L_j / y_2^* در مقابل عدد فرود را نشان می‌دهد.

مطابق این نمودار نسبت L_j / y_2^* تقریباً برابر ۳/۵ در اعداد فرود کمتر از ۶ و برابر ۴ در اعداد فرود بیشتر از ۶ می‌باشد همچنین به منظور مقایسه، شکل ۶ مقادیر L_j / y_2^* بدست آمده از آزمایش‌های بستر صاف افقی به همراه منحنی بی‌بعد شده طول پرش هیدرولیکی که توسط USBR برای بسترهای افقی ارائه شده است را نمایش می‌دهد. طول نسبی پرش هیدرولیکی L_j / y_2^* روی بسترهای موج‌دار در بررسی‌های اید و راجاراتام (۴) در حدود ۳، توکیای (۱۰) برابر ۴ و عباسپور و همکاران (۲) برای بازه عدد فرود کمتر از ۶ در حدود ۳ و به ازای اعداد فرود بالاتر از ۶ برابر ۳/۵ بیان شده است. بنابراین همان‌طور که ملاحظه می‌شود مقدار طول نسبی پرش هیدرولیکی روی بسترهای موج‌دار سینوسی با بررسی‌های تجربی محققین قبلی همخوانی مناسبی دارد. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که کاهش طول پرش هیدرولیکی روی بسترهای موج‌دار نسبت به بستر صاف در حدود ۳۵ درصد می‌باشد.

اتلاف انرژی

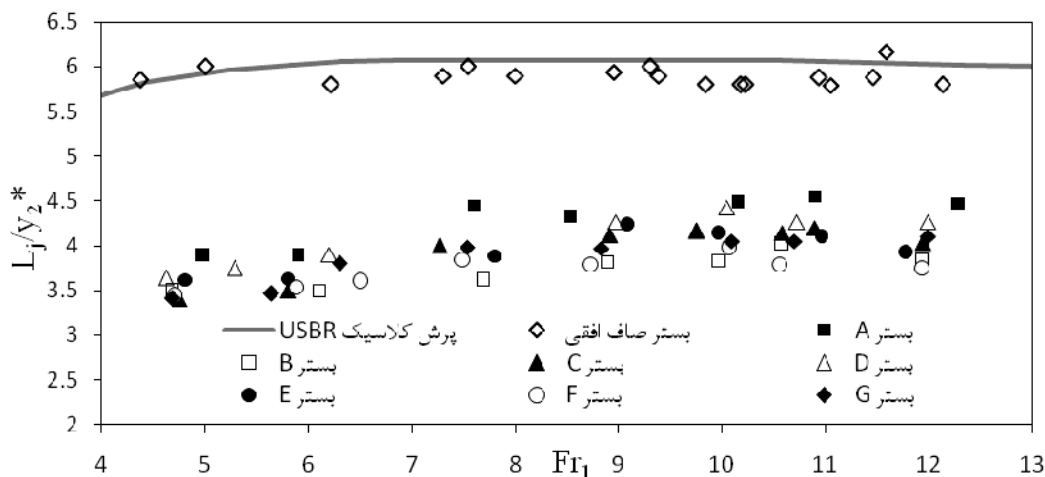
اتلاف انرژی پرش هیدرولیکی E_L برابر با اختلاف انرژی قبل و بعد از پرش هیدرولیکی $E_1 - E_2$ می‌باشد. شکل ۷ نمودار تغییرات اتلاف انرژی نسبی $E_L / E_1 = (E_1 - E_2) / E_1$ به ازای اعداد فرود اولیه روی بسترهای صاف و موج‌دار سینوسی را نشان می‌دهد. مطابق این نمودار به ازای عدد فرود یکسان اتلاف انرژی در بسترهای موج‌دار سینوسی در عدد فرود ۱۲ حدوداً ۵ درصد بیشتر از بستر صاف می‌باشد. همچنین در شکل ۸ نمودار درصد نرخ اتلاف انرژی G' که به صورت زیر تعریف می‌شود، نمایش داده شده است.

$$G'\% = \frac{E_L - E_L^*}{E_L^*} \times 100 \quad (۸)$$

در رابطه ۸ E_L^* اتلاف انرژی پرش هیدرولیکی در بستر صاف و E_L اتلاف انرژی در! بسترهای موج‌دار سینوسی به ازای عمق و عدد فرود اولیه یکسان می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد درصد نرخ اتلاف انرژی پرش در بسترهای موج‌دار سینوسی، در عدد فرود ۴ حدود ۴ تا ۱۲ درصد و در عدد فرود ۱۲ حدوداً برابر با ۶ درصد می‌باشد که این موضوع بیانگر کاهش بازه تغییرات نرخ اتلاف انرژی پرش هیدرولیکی و یکنواخت‌تر شدن تاثیر موج‌های بستر در اتلاف انرژی پرش در اعداد فرود بالا می‌باشد.

نیروی برشی در بستر پرش هیدرولیکی

از جمله دلایل اصلی کاهش عمق ثانویه و کاهش طول پرش هیدرولیکی در پرش‌های تشکیل شده روی بسترهای موج‌دار سینوسی، افزایش نیروی برشی در بستر پرش می‌باشد.



شکل ۶- تغییرات طول نسبی پرش هیدرولیکی در بسترهای موج‌دار سینوسی و صاف به ازای اعداد فرود اولیه

تشکیل شده روی بستر موج‌دار می‌نویسیم می‌توان نیروی تنش برشی

به همین جهت بر اساس معادله اندازه حرکتی که برای پرش‌های

دلیل آن را افزایش نیروی برشی بستر به خاطر تشکیل جریان های گردابه‌ای در داخل موج‌های بستر دانست.

پروفیل سرعت

در این پژوهش روی تمامی بسترها، در یک دبی ثابت، پروفیل سرعت در سه مقطع از پرش و در مرکز کانال، توسط سرعت سنج الکترونیکی به همراه نمایشگر عددی با دقت ۰/۱ cm/s اندازه گیری و در شکل ۱۰ پروفیل‌های سرعت برداشت شده در سه مقطع، یک سوم ابتدای پرش، یک سوم میانی و یک سوم انتهای پرش در بستر های موج‌دار سینوسی در کنار هم نشان داده شده است.

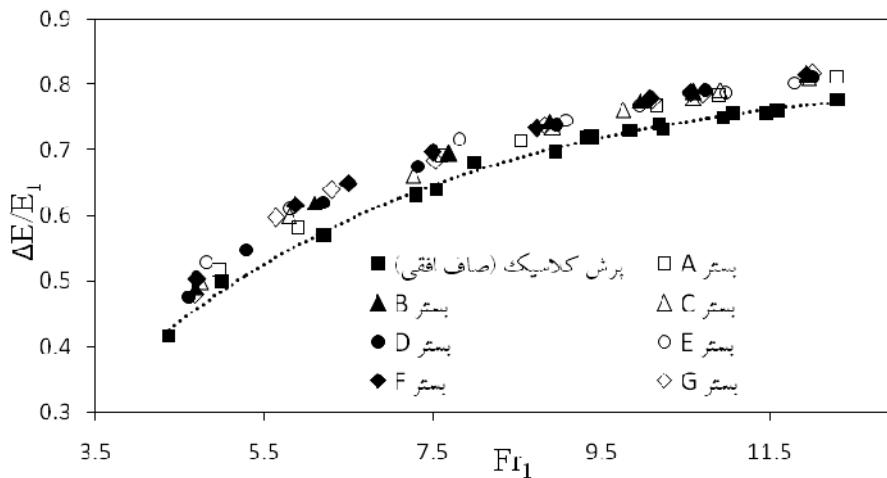
متوسط وارد بر کف را محاسبه نمود.

$$F_{\tau} = (F_{p1} - F_{p2}) + (M_1 - M_2) \quad (9)$$

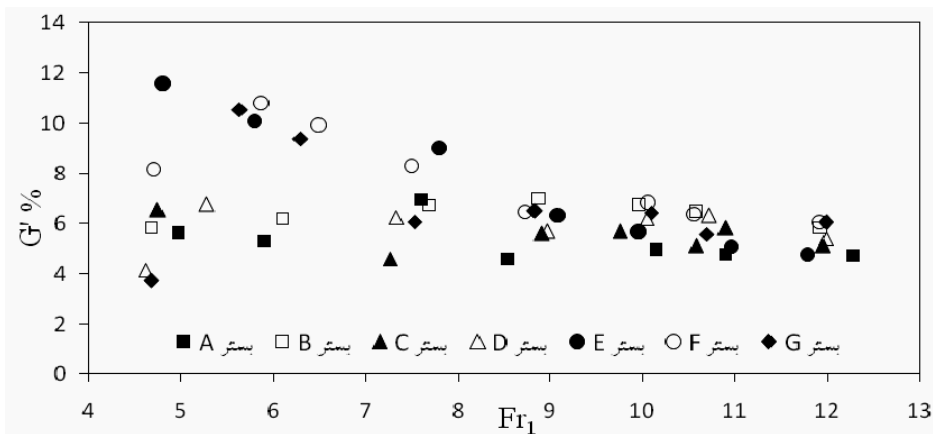
اید و راجعات نام (۴) ضریبی را به عنوان ضریب نیروی برشی برای بسترهای موج‌دار و سینوسی ارائه نمودند که به صورت زیر بیان شده است:

$$\varepsilon = F_{\tau} / (\gamma y_1^2 / 2) \quad (10)$$

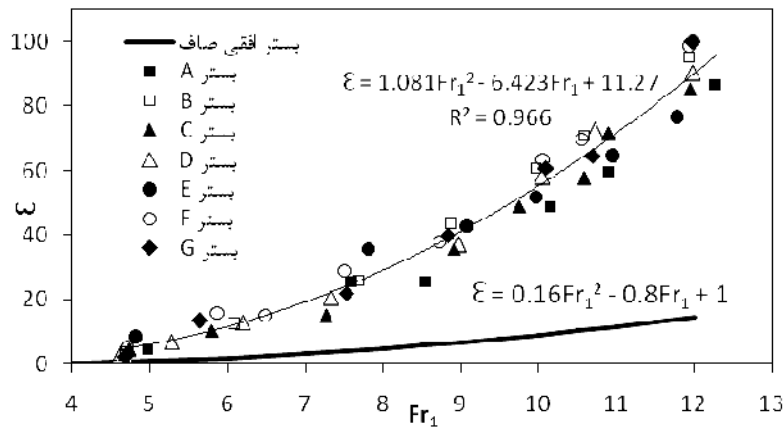
در رابطه بالا F_{τ} نیروی برشی متوسط وارد بر بستر پرش، y_1 عمق اولیه پرش هیدرولیکی، γ وزن مخصوص آب می باشند. در شکل ۹ ضریب نیروی برشی برای تمامی بسترهای موج‌دار سینوسی ترسیم شده است همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش عدد فرود میزان ضریب نیروی برشی نسبت به بستر صاف افزایش یافته که می‌توان



شکل ۷- تغییرات اتلاف انرژی نسبی پرش روی بسترهای موج‌دار سینوسی و صاف به ازای اعداد فرود اولیه



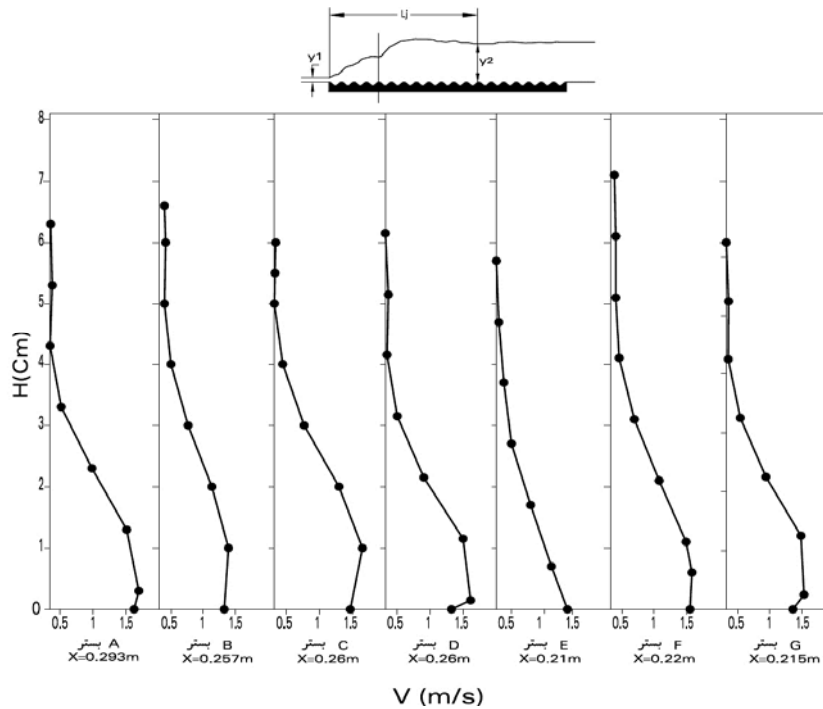
شکل ۸- تغییرات نرخ اتلاف انرژی پرش روی بستر موج‌دار به ازای اعداد فرود اولیه مختلف



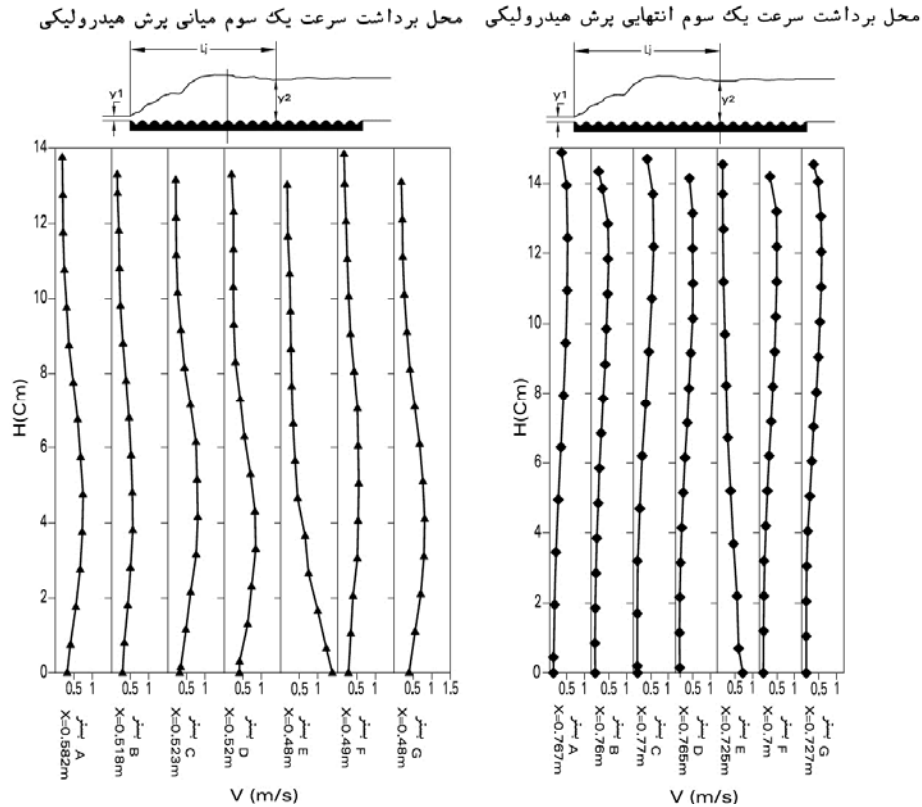
شکل ۹- ضریب نیروی برشی در مقابل عدد فرود اولیه پرش برای انواع بسترهای افقی موج‌دار

همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود با افزایش فاصله از ابتدای پرش از میزان حداکثر سرعت در پروفیل‌های سرعت کاسته می‌شود که این موضوع بیانگر آن است، که میزان سرعت در طول پرش کم شده و لایه مرزی با افزایش فاصله از ابتدای پرش رشد می‌نماید.

محل برداشت سرعت یک سوم ابتدای پرش هیدرولیکی



شکل ۱۰- پروفیل‌های سرعت روی بستر افقی موج‌دار در سه مقطع، یک سوم ابتدای پرش، یک سوم میانی و یک سوم انتهایی پرش روی بسترهای موج‌دار سینوسی



ادامه شکل ۱۰- پروفیل‌های سرعت روی بستر افقی موج‌دار در سه مقطع، یک سوم ابتدای پرش، یک سوم میانی و یک سوم انتهایی پرش روی بسترهای موج‌دار سینوسی

عدد فرود ۴ در بازه ۴ تا ۱۲ درصد و در عدد فرود ۱۲ حدوداً برابر با ۶ درصد می‌باشد.

با افزایش عدد فرود اولیه میزان ضریب نیروی برشی بسترهای موج‌دار نسبت به بستر صاف افزایش یافته که می‌توان دلیل آن را افزایش نیروی برشی بستر به خاطر تشکیل جریان‌های گردابه‌ای در داخل موج‌های بستر دانست.

با افزایش فاصله از ابتدای پرش هیدرولیکی، از سرعت جریان کاسته شده و ماکزیمم سرعت در روی پروفیل‌های سرعت به سمت سطح پرش حرکت می‌کند.

سپاسگزاری

از مسئولین آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده‌های کشاورزی و مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد به خاطر فراهم نمودن شرایط مناسب، جهت انجام آزمایش‌های مربوط به این پژوهش، صمیمانه تقدیر و تشکر می‌گردد.

نتیجه گیری

در این پژوهش تاثیر بسترهای موج‌دار سینوسی بر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفت که خلاصه نتایج آن بشرح زیر می‌باشد.

نسبت عمق ثانویه به اولیه در پرش هیدرولیکی روی بسترهای موج‌دار سینوسی در بازه عدد فرود ۴/۶ تا ۱۲/۲۶ و شیب موج t/s ۰/۱۶۷ تا ۰/۷۵ نسبت به بستر صاف (پرش کلاسیک) کاهش یافته که این میزان کاهش بطور متوسط برابر ۱۵ درصد بوده و در بیشترین مقدار خود در محدوده عدد فرود ۱۲ تقریباً برابر ۲۰ درصد می‌باشد.

به ازای اعداد فرود کمتر از ۶ نسبت بی‌بعد شده طول پرش هیدرولیکی L_j / y_2^* در حدود ۳/۵ و به ازای اعداد فرود بیشتر از ۶ این نسبت برابر ۴ می‌باشد که نشان می‌دهد میزان کاهش طول پرش نسبت به پرش کلاسیک در حدود ۳۵ درصد می‌باشد.

میزان اتلاف انرژی نسبی پرش هیدرولیکی روی بستر موج‌دار سینوسی در عدد فرود ۱۲ حدوداً ۵ درصد بیشتر از بستر صاف است.

درصد نرخ تغییرات اتلاف انرژی در پرش هیدرولیکی روی بستر موج‌دار سینوسی با افزایش عدد فرود کاهش می‌یابد به طوری که در

منابع

- ۱- ایزدجو ف.، شفاعی بجستان م. و بینا م. ۱۳۸۳. مشخصات پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای موجدار دوزنقه‌ای شکل. مجله علمی کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز، جلد ۲۷:۱۲۲-۱۰۷.
- 2- Abbaspour A., Hosseinzadeh Dalir A., Farsadizadeh D., and Sadraddini A.A. 2009. Effect of Sinusoidal Corrugated Bed on Hydraulic Jump Characteristics. *Journal of Hydro-Environment Research*, 3(2):109-117.
- 3- Chow V.T. 1959. *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill. New York.
- 4- Ead S.A., and Rajaratnam N. 2002. Hydraulic jump on corrugated beds. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE, 128(7):656-663.
- 5- Gohari A., and Farhoudi J. 2009. The characteristics of hydraulic jump on rough bed stilling basins. 33rd IAHR Congress. *Water Engineering for a Sustainable Environment*, Vancouver, British Columbia, pp. 1-9.
- 6- Hughes W.C., and Flack J.E. 1984. Hydraulic jump properties over a rough bed. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 110(12):1755-1771.
- 7- Leutheusser H.J., and Schiller E.J. 1975. Hydraulic jump in a rough channel, *Water Power and Dam Construction*. 186-191.
- 8- Morris H.M. 1995. A new concept of flow in rough conduits *Transaction. American society of Civil Engineers*, 120:373-398.
- 9- Rajaratnam N. 1968. Hydraulic jump on rough bed, *Transaction of the Engineering Institute of Canada*, 11(2):1-8.
- 10- Tokyay N.D. 2005. Effect of channel bed corrugations on hydraulic jumps. In: *Impacts of Global Climate Change Conference*, EWRI, May, Anchorage, Alaska, USA, 408-416.



Hydraulic Jump Properties in Irrigation Canals with Corrugated Bed

R. Badizadegan^{1*} - K. Esmaili² - M.F. Maghrebi³ - M. Saneie⁴

Received:16-1-2011

Accepted:8-5-2011

Abstract

One of the most frequently encountered cases of rapid varied flow is the hydraulic jump. It occurs when a supercritical open channel flow changes into sub critical flow. In the present research, the experimental study of the hydraulic jump on seven sinusoidal corrugated beds with different wave steepness. The wave steepness of sinusoidal corrugated beds is in the range of 0.1667 to 0.75 and Froude number was in the range of 4.5 to 12.26. The results showed that the tail water depth of a jump on a corrugated bed is about 20% smaller than that on smooth bed in Froude number 12 and the length of jump on corrugated beds is about 35% less than that for smooth bed.

Keywords: Hydraulic jump, Corrugated bed, Wave steepness

1,2- Msc Student and Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

(*- Corresponding Author Email : rbadizadegan@gmail.com)

3- Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

4- Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Center, Tehran