علوم و مهندسی آبیاری
جلد ۴۱، شماره‌ی۲، تابستان ۹۷، ص. ۲۱۰-۱۹۷

بررسی نوسانات فشار در پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر

پرستو پارسامهر[1*]، داود فرسادی زاده[2]، علی حسین زاده دلیر[3]، محمد جواد نصر اصفهانی[4] و اکرم عباسپور[5]

۱*- نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری سازه‌های آبی گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز. Parastoo.parsamehr@gmail.com
۲- استاد گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز.
۳- استاد گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز.
۴- دکتری سازه‌های آبی. دانشکده علوم و مهندسی آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۵- استادیار گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز.

تاریخ دریافت: ۹۵/۵/۲۵ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۲/۲۴

چکیده

پرش هیدرولیکی تغییر ناگهانی جریان از حالت فوق بحرانی به زیربحرانی است که این پدیده هیدرولیکی به‌صورت متلاطم و همراه با محدوده وسیعی از گرداب‌های با مقیاس بزرگ و کوچک می‌باشد. اتلاف انرژی در پرش هیدرولیکی همواره همراه با نوسانات بزرگ فشار با فرکانس کم است که می‌تواند باعث ایجاد خسارت و فرسایش شده و امنیت سازه را به خطر اندازد. در تحقیق حاضر تأثیر اجزای زبر غیرممتد لوزی شکل با زبری نسبی (h/y_1) ۰/۶۷ و ۱/۳۳ بر نوسانات فشار در پرش هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده با افزایش عدد فرود نوسانات فشار افزایش می‌یابد که ناشی از افزایش شدت تلاطم در پرش هیدرولیکی می‌باشد. در بستر زبر در فاصله طولی $x/y_1 < 20$ نوسانات فشار بیشتر و به سمت پایین‌دست پرش نوسانات فشار در مقایسه با پرش هیدرولیکی بر روی بستر صاف به‌طور متوسط در حدود ۸۰ درصد کاهش می‌یابد. تغییرات فشار متوسط در پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر در طول نسبی $x/(y_2 - y_1) = 7$ تقریباً ثابت می‌گردد. در تحقیق حاضر، مقادیر حداکثر C_p^+ و $|C_p^-|$ ۰/۱۷۸ و ۰/۱۳۴ به‌دست آمد.

کلید واژه‌ها: اتلاف انرژی، بستر زبر، پرش هیدرولیکی، تلاطم، نوسانات فشار.

مقدمه

پرش هیدرولیکی تغییر ناگهانی جریان از حالت فوق بحرانی به زیربحرانی است که همراه با محدوده وسیعی از گرداب‌های با مقیاس بزرگ و کوچک می‌باشد. ناحیه غلطابی پرش بلافاصله پایین‌دست پنجه پرش با وجود گرداب‌های در مقیاس بزرگ و جریان‌های چرخشی تشکیل می‌شود. طبیعت نوسانی جریان به‌صورت نوسان طولی موقعیت پنجه پرش و ایجاد گرداب‌های بزرگ به‌صورت شبه تناوبی قابل مشاهده می‌باشد. آشفتگی و تلاطم در پرش هیدرولیکی موجب استهلاک انرژی جریان فوق بحرانی می‌گردد، لذا از این پدیده به‌عنوان مستهلک کننده انرژی در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی نظیر سرریزها، دریچه‌ها، تندآب‌ها و غیره استفاده می‌شود (Wang et al., 2014). اتلاف انرژی در پرش هیدرولیکی همواره همراه با نوسانات بزرگ فشار با فرکانس کم است که می‌تواند باعث ایجاد خسارت و فرسایش شده و امنیت سازه را به خطر اندازد به‌طور مثال پس از بررسی‌های انجام گرفته روی تخریب ایجاد شده در حوضچه آرامش سد کارنافولی در مکزیک، مشخص گردید که در اثر انتقال نوسانات فشار در این حوضچه‌ها به زیر دال‌های بتنی و نوسانات فشار ایجاد شده در نیروی برکنش، سرریز و حوضچه‌های آرامش آن‌ها تخریب گردیده‌اند (Toso and Bowers, 1988). بررسی رفتار هیدرودینامیکی جریان آشفته پرش هیدرولیکی می‌تواند باعث شناخت بهتر این پدیده شده و در طراحی صحیح حوضچه‌های آرامش مؤثر واقع گردد.

Abdul Khader و Elango (1974) اولین مطالعه در رابطه با موارد لازم در خصوص محاسبه بارگذاری در کف حوضچه‌های آرامش و قابلیت مکانیزم‌های خستگی در تخریب حوضچه‌ها و همچنین مشخصه‌های آماری در خصوص نوسانات فشار تلاطم را در اعداد فرود ۴/۷ و ۵/۹ و ۶/۶ ارائه دادند. نتایج نشان دادند که فشار متوسط علاوه بر عدد فرود اولیه به شرایط توسعه یافتگی جریان ورودی نیز بستگی دارد. لازم به ذکر است در این تحقیق جریان کاملاً توسعه‌یافته با مفهوم ارائه‌شده توسط Leutheusser و Kartha (1972) یکسان بوده، به‌طوری‌که معیار آن‌ها به‌صورت فاصله ابتدای پرش از دریچه بالادست ۲۰۰ برابر بازشدگی دریچه بیان‌شده است، در برخی مراجع فاصله‌ای که لایه مرزی جریان به سطح آب می‌رسد در حدود ۵۰ برابر بازشدگی دریچه نیز در نظر گرفته شده است. نتایج آن‌ها برای

جریان توسعه یافته بکار می‌رود. برای جریان توسعه نیافته فشار متوسط (p_m) ممکن است به نصف مقدار به‌دست‌آمده برسد.

Loprdo و Henning (1985) تأثیر شرایط ورودی پرش هیدرولیکی به حوضچه را در دو حالت نصب دریچه و سرریز مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که بیشترین مقدار ضریب در پایین دست دریچه تقریباً در عدد فرود ۴/۵ و در پایین‌دست سرریز در عدد فرود ۶/۵ رخ داده است. این اختلاف به دلیل ساختار متفاوت تشکیل پرش در پایین‌دست دریچه و سرریز می‌باشد.

Fiorotto و Rinaldo (1992) در مورد نوسانات فشار بالابرنده(Uplift) و طراحی پوشش حوضچه آرامش سرریز مطالعاتی انجام دادند. در این تحقیق شرح و کنترل فشار بالابرنده متغیر ایجاد شده در اثر نوسانات فشار در حوضچه‌های آرامش سرریز و تعیین معیار طراحی دال کف مناسب، با تعیین حداکثر فشار بالابرنده لحظه‌ای وارد بر پوشش، بحث شده است. آن‌ها در این مطالعه با اندازه‌گیری لحظه‌ای نوسانات فشار و آنالیز آماری، مقادیر نسبت تفاوت حداکثر فشار و حداقل فشار با متوسط فشار و پارامتر $V_1^2/2g$ را به‌صورت پارامترهای بی‌بعد ضریب فشار مثبت C_p^+ و ضریب فشار منفی C_p^- نشان داده‌اند. نتایج کلی این مطالعه نشان می‌دهد که نوسانات فشار باعث تخریب درزهای انبساطی بین دال‌ها می‌شود.

$$C_p^+ = \frac{P_{max}-P_{avg}}{\alpha V_1^2/2g}, \quad C_p^- = \frac{P_{min}-P_{avg}}{\alpha V_1^2/2g} \qquad (۱)$$

در نتیجه تحقیق انجام گرفته، ضخامت پوشش بتن موردنیاز برای پایداری (بدون در نظر گرفتن لنگرهای کمکی محتمل) به‌صورت تابعی از: ۱) ارتفاع انرژی جنبشی یا عدد فرود جریان ورودی، ۲) ابعاد بی‌بعد طولی و عرضی پوشش دال، ۳) نسبت وزن مخصوص آب و بتن غوطه‌ور، ۴) ضریب بی‌بعد فشار بیان‌کننده حداکثر اختلاف نوسانات فشار مثبت و منفی نسبت به مقدار متوسط بیان شده است. معیار پایداری بر اساس بررسی‌های نظری و تجربی برای طراحی‌های مهندسی با در نظر گرفتن حالت یک‌بعدی انتشار فشار، به‌صورت زیر پیشنهاد شده است:

$$\frac{s}{V_1^2/2g} > (0.5-0.8)\frac{\gamma}{\gamma_c-\gamma} \approx 0.3-0.5 \qquad (۲)$$

که s عبارت است از ضخامت معادل دال کف، $V_1^2/2g$ برابر است با ارتفاع انرژی جنبشی جریان و γ و γ_c به ترتیب وزن مخصوص آب و بتن می‌باشد. آن‌ها برای تعیین صحت رابطه تئوری خود اقدام به ساخت یک مدل فیزیکی به ابعاد چهار متر طول، ۰/۳ متر عرض و ۰/۵ متر ارتفاع نمودند و با عبور دادن جریان‌هایی با دبی ۱ تا ۱۱ لیتر بر ثانیه داده‌هایی را برداشت و رابطه خود را کنترل نمودند.

Kavianpour و Mohammadi (2001) اثر شیب کف حوضچه آرامش را بر فشارهای دینامیک مؤثر در اعداد فرود ۶ و ۸ و ۱۰ و شیب ورودی ۲۵ درجه و سه شیب کف معکوس ۰/۰۰۵، ۰/۰۱۵ و ۰/۰۲۵ در فلومی به طول ۱۲ متر، عرض ۰/۷۵ متر و ارتفاع ۰/۸۵ متر به‌صورت تجربی مطالعه نمودند. در حوضچه با شیب معکوس، با افزایش عدد فرود مقادیر نوسانات فشار مثبت و منفی به دلیل افزایش سرعت و در نتیجه انرژی جنبشی جریان اولیه کاهش می‌یابد. این مقادیر چنانچه پرش در پای شیب تشکیل شود نسبت به حالتی که پرش روی شیب تشکیل گردد، بزرگتر خواهد بود. در طول ثابت حوضچه، با افزایش شیب معکوس ضرایب مثبت و منفی شدت نوسانات فشار کاهش می‌یابند.

Hassonizadeh و Shafai Bajestan (2001) تأثیر نیروهای هیدرودینامیکی ناشی از پرش هیدرولیکی و نیروهای بالابرنده بر کف حوضچه آرامش را در محدوده اعداد فرود ۵ تا ۱۱ در مدل فیزیکی فلومی به طول ۷ متر، عرض ۰/۹ متر و ارتفاع ۰/۵ متر در محدوده داده‌برداری ۵۰ تا ۱۰۰ هرتز بررسی نمودند. آزمایش‌ها در سه مرحله انجام گرفت، بدین صورت که ابتدا فشارهای دینامیکی روی کف حوضچه با کف صلب و یکنواخت اندازه‌گیری شده و در مرحله بعد اندازه‌گیری فشارهای دینامیکی بر روی کف حوضچه در محدوده بحرانی، بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از مرحله قبل انجام گرفت. در نهایت اندازه‌گیری فشارهای دینامیکی و تعیین آستانه حرکت دال با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از مرحله دوم بررسی گردید، بدین ترتیب که دال‌هایی به ابعاد ۳۰× ۱۰ سانتی‌متر با ضخامت پنج تا هفت سانتی‌متر نصب و فشارهای حداکثر و حداقل اندازه‌گیری شد. جریان آب برای ایجاد نیروهای بالابرنده تنظیم و علاوه بر فشارهای حداکثر، میانگین و حداقل، ایستادگی دال‌ها نیز با تغییر در ضخامت آن‌ها مورد آزمایش قرار گرفته و آستانه حرکت دال‌ها مشخص گردید. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده حداکثر و حداقل فشارهای حادث شده روی دال‌های حوضچه آرامش در ۳۰٪ طول اولیه پرش اتفاق می‌افتد. در محدوده اعداد فرود این تحقیق مقادیر ضرایب C_p^+ و C_p^- برای دبی‌های مختلف ۰/۱۸ تا ۰/۵۸ به‌دست آمد.

Farhoudi (2009) فشار کلی اطراف بلوک‌های پای تندآب را در حوضچه آرامش SAF در فلومی به طول شش متر، عرض ۰/۲۵ متر و ارتفاع ۰/۳۰ متر در محدوده اعداد فرود ۵/۵ تا ۱۲، نسبت استغراق ۰ تا ۱۰۰٪ در فواصل ۱۰٪ و مدت زمان داده‌برداری ۱۲۰ ثانیه، مورد بررسی قرار داد. بزرگی میدان فشار در سطح سرریز به سمت پنجه آن مستقل از اعداد فرود افزایش می‌یابد. در محل اتصال تندآب با بلوک، میدان فشار کلی به بیشترین مقدار خود می‌رسد. هم‌چنین مشاهده گردید که با افزایش عدد فرود، مقادیر حداکثر میدان فشاری دارای مقدار حداکثر دومی با اندازه کمتر و در پایین‌دست است. ارزیابی دقیق در مقادیر $C_p + \acute{C}_p$ (میدان فشار کلی) و موقعیت رخ داد آن‌ها، نشان داد که تغییرات میدان فشار کلی با مقادیر فرود اولیه به‌صورت یک تابع توانی با ضریب تعیین R^2=۰/۹۷۵ بیان می‌شود:

$$\left(C_p + \acute{C}_p\right)_m = 5.263(F_1)^{-0.9895} \quad (۳)$$

که در رابطه فوق پارامتر C_p ضریب فشار متوسط $(C_p = \frac{P_{avg}}{1/2\rho V_1^2})$، $\acute{C}_p$ ضریب نوسانات $(\acute{C}_p = \frac{\sqrt{(\overline{P^2})}}{1/2\rho V_1^2})$ و $(C_p + \acute{C}_p)_m$ حداکثر فشار کل می‌باشد. با افزایش نسبت استغراق مقدار حداکثر فشار کل افزایش یافته درصورتی‌که موقعیت آن ثابت باقی می‌ماند. فشار کل با افزایش عدد فرود اولیه در جهت جریان روندی کاهشی داشته و به سمت پایین‌دست و موازی با محور افقی می‌شود. در سطوح جانبی بلوک پای تندآب تغییرات $C_p + \acute{C}_p$ در جهت جریان به سمت پایین‌دست روندی کاهشی داشته و با افزایش عدد فرود ثابت می‌شوند. هم‌چنین تحلیل نتایج این تحقیق نشان داد که حداکثر نوسانات فشار لحظه‌ای می‌تواند ۴/۵± برابر مقادیر انحراف معیار باشد.

Fathi Moghdam et al. (2008) فشارهای دینامیکی ناشی از جت خروجی از پرتابه جامی شکل را به ازای زوایای مختلف برخورد مورد بررسی قرار دادند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، بیشترین نوسانات فشار و همچنین، بیشترین مقدار میانگین نوسانات در زاویه برخورد ۹۰ درجه رخ داده است، که با کاهش زاویه برخورد، نوسانات فشار و میانگین نوسانات کاهش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش دبی مقادیر $\acute{C}_p$ افزایش یافته و در یک دبی ثابت با افزایش زاویه برخورد از صفر به ۹۰ درجه مقادیر $\acute{C}_p$ افزایش می‌یابد.

Behrouzi Rad et al. (2008) تأثیر ساختار انتهایی حوضچه آرامش را در دو حوضچه آرامش غیر استاندارد پله دار(Step-end Stilling Basin) و USBR تیپ دو سد گلابر که با مقیاس ۱:۳۰ مدل شده بر رفتار هیدرولیکی و دینامیکی جریان داخل حوضچه در سه دبی ۱۰۰۰و ۱۰۰۰۰ ساله و RMF بررسی کردند. بررسی نوسانات فشار دینامیکی وارد بر کف حوضچه‌ها نشان داد که مقادیر میانگین فشارهای دینامیکی در حوضچه آرامش پلکانی، به جز در یک سوم انتهایی طول حوضچه، در سایر نقاط از مقادیر میانگین‌های فشار دینامیکی در حوضچه تیپ دو بیشتر است.

Nasr Esfahani و Shafai-Bajestan (2012) نوسانات فشار را بر روی بستر زبر در پرش هیدرولیکی نوع B در محدوده اعداد فرود ۳/۰۳ تا ۱۱/۶۸ در فلومی به طول ۱۵ متر و عرض ۸۰ سانتی‌متر به منظور بهبود معیار طراحی ضخامت دال کف چنین حوضچه‌هایی بررسی نمودند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده مقادیر ضریب فشار C_p در ابتدای پرش مقادیر بالایی بوده و به سمت پایین‌دست با افزایش عمق آب کاهش یافته و بهم نزدیک می‌شوند. با افزایش عدد فرود اولیه مقادیر حداکثر C_p^+ و C_p^- به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. مقادیر حداقل C_p^+ و C_p^- با افزایش عدد فرود کاهش می‌یابد. بستر زبر باعث کاهش نوسانات فشار شده و بنابراین می‌تواند ضخامت دال کف را کاهش دهد.

Karimi et al. (2014) نوسانات فشار در پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر را در یک فلوم نسبتاً بزرگ به عرض ۰/۸ و طول ۱۲ متر در حوضچه واگرای ناگهانی با نسبت واگرایی (B_1/B_2) برابر با ۰/۳۳ و در محدوده اعداد فرود ۴/۵ تا ۹ بررسی کردند. نتایج نشان داد که وجود زبری در بستر حوضچه باعث کاهش شدت نوسانات تلاطمی پرش شده است. حداکثر ضریب شدت نوسانات فشار $(C_{p_{max}})$ در پرش واگرای زبر تا مقدار ۰/۰۲۳ به‌دست آمده که تقریباً ۵۳ درصد نسبت به پرش واگرای صاف و ۷۰ درصد نسبت به پرش کلاسیک کاهش یافته است. حداکثر ضرایب نوسانات فشار در ابتدای پرش و در فاصله ۱۵ الی ۳۰ درصد از طول پرش رخ می‌دهد. حداکثر انحراف معیار استاندارد در بستر زبر واگرا حدود ۶۰ درصد نسبت به بستر صاف واگرا کاهش یافته است. طول حداکثر نوسانات فشار $(L_{\sigma max})$ در فاصله $x/(y_2 - y_1) = 3.8$ و طول پرش در فاصله $x/(y_2 - y_1) = 10$، که x فاصله از پنجه پرش، y_1 و y_2 به ترتیب عمق اولیه و ثانویه پرش می‌باشد، رخ می‌دهد.

در زمینه پرش هیدرولیکی روی بستر زبر، بیشتر مطالعات انجام گرفته بر خصوصیات ظاهری پرش هیدرولیکی متمرکز بوده و کمتر به مشخصات هیدرودینامیکی پرش روی بستر زبر پرداخته شده است. به‌طور مثال تاکنون نوسانات فشار پرش هیدرولیکی روی بستر زبر با پله معکوس (Esfahani and Bajestan, 2012) بستر زبر با واگرایی ناگهانی (Karimi et al., 2014) مورد بررسی قرار گرفته است. نوسانات تلاطم در پرش در نتیجه ایجاد، انتشار و استهلاک گردابه‌های چرخشی می‌باشد که با زمان و مکان به‌صورت تصادفی تغییر می‌یابد. بررسی و تحلیل مبحث پیچیده پدیده نوسانات هیدرودینامیکی فشار با استفاده از روش‌های آماری امکان‌پذیر می‌باشد. در تحقیق حاضر تأثیر ارتفاع زبری بر نوسانات فشار دینامیکی بر روی بستر زبر با اجزای زبر لوزی شکل در پرش هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفته است.

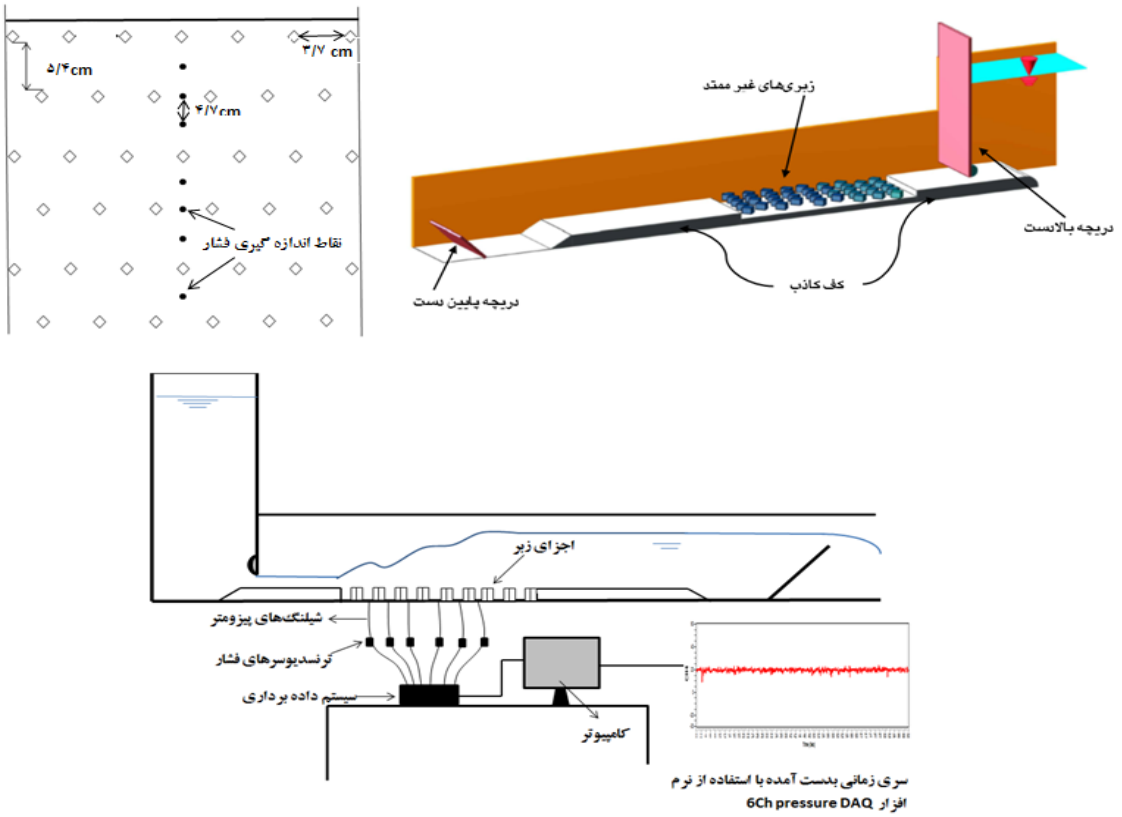
مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در فلوم آزمایشگاهی به طول ۱۰ متر، عرض ۰/۵ متر و ارتفاع ۰/۶ متر با شیب کف افقی در آزمایشگاه هیدرولیک گروه آب دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز انجام شد. به منظور تأمین ارتفاع آب به‌منظور تشکیل پرش هیدرولیکی در اعداد فرود مختلف، مخزنی به ارتفاع دو متر در بالادست دریچه کشویی بالادست احداث گردید. به منظور جلوگیری از انقباض خطوط جریان خروجی از دریچه و هم‌چنین برای اینکه عمق اولیه پرش با بازشدگی دریچه برابر باشد، لبه بالادست دریچه به شکل نیم دایره ساخته شد. در پایین‌دست فلوم نیز برای تثبیت موقعیت پرش از دریچه کشویی دیگری استفاده شد. در تمامی آزمایش‌ها بازشدگی دریچه ثابت و برابر ۲/۱ سانتی‌متر بود. اجزای زبر در تحقیق حاضر با مقطع عمود بر جریان به شکل لوزی با دو ارتفاع زبری ۱/۴ سانتی‌متر (زبری نسبی h/y_1=۰/۶۷، که h ارتفاع

زبری و y_1 عمق اولیه پرش می‌باشد) و ۲/۸ سانتی‌متری (h/y_1=۱/۳۳)، از جنس پلی اتیلن با تراکم ۱۰/۶۷ درصد مورد آزمایش قرار گرفتند. لازم به ذکر است در تحقیق حاضر شکل اجزای زبر با توجه به مطالعات Shafai-Bejestan و Neisi (2009) و ارتفاع اجزای زبر با درنظر گرفتن آرایش زیگزاگ و متناسب با ابعاد فلوم آزمایشگاهی انتخاب گردید. (منظور از میزان تراکم نسبت مساحت اجزای زبر به مساحت کل بستر زبر می‌باشد و با استفاده از رابطه $i = \frac{a*N}{A} \times 100$ محاسبه می‌شود که در این رابطه a مساحت هر المان زبری، N تعداد کل زبری‌ها و A مساحت حوضچه آرامش می‌باشد.)

همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، اجزای زبر به‌گونه‌ای در کف فلوم قرار داده شدند که تاج آن‌ها با سطح بستر در بالادست و پایین‌دست بستر زبر هم‌تراز باشند بدین ترتیب لبه پایین جت ورودی هم تراز سطح بالای اجزای زبر قرار می‌گیرد. زبری‌ها به صورت ردیف‌های هفت و شش تایی با فواصل طولی و عرضی۳/۷ و ۵/۴ سانتی‌متر در طول ۲/۱۰ متر از فلوم چیده شدند. فواصل عرضی و طولی بین اجزای زبر با توجه به ابعاد زبری، آرایش زیگزاگی، ابعاد حوضچه آرامش و تراکم ۱۰/۶۷ درصد انتخاب شده است.

اولین ردیف از زبری‌ها مطابق با مطالعات Mohamed Ali (1991) به اندازه ارتفاع زبری‌ها از محل تشکیل عمق اولیه پرش قرارگرفت. پرش هیدرولیکی در تمامی آزمایش‌ها در ابتدای حوضچه آرامش در فاصله ۱۵۸ سانتی‌متری از دریچه بالادست، که دیواره‌های کانال شیشه‌ای بوده و امکان اندازه‌گیری خصوصیات پرش وجود داشت، تشکیل گردید. جهت اندازه‌گیری فشارهای دینامیکی، ۳۰ پیزومتر در راستای محور مرکزی در کف فلوم نصب گردید. پیزومترها با فاصله ۴/۷ سانتی‌متری از یکدیگر در میان اجزای زبر تعبیه شدند. فشار پیزومتر توسط لوله‌های پلاستیکی به طول حداکثر ۲ متر و قطرداخلی ۳ میلیمتر به سنسورهای فشار منتقل می‌شدند. پس از اتصال لوله‌ها به مبدل‌های فشار، تمامی آن‌ها بدقت هواگیری شده و اطمینان حاصل می‌گردید تا حباب هوا در لوله وجود نداشته باشد. فشارهای لحظه‌ای پیزومترهای مختلف نصب شده در کف بستر زبر، توسط مبدل‌های فشار شش کاناله، کالیبره شده در محدوده ۱۰۰± میلی بار، به سیگنال‌های الکتریکی تبدیل شده و پس از پردازش سیگنال‌ها با استفاده از سیستم DAQ، ضبط و نمایش اطلاعات توسط کامپیوتر و با استفاده از نرم افزار 6CH Pressure DAQ صورت می‌گرفت. شماتیک کلی سیستم اندازه‌گیری نوسانات فشار در شکل (۱) قابل مشاهده می‌باشد.

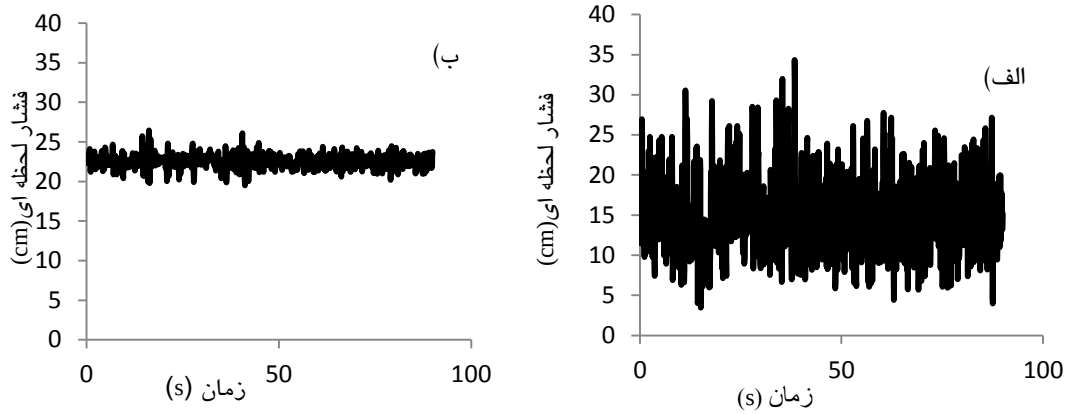


شکل۱- شمای کلی بستر زبر در کانال آزمایشگاهی

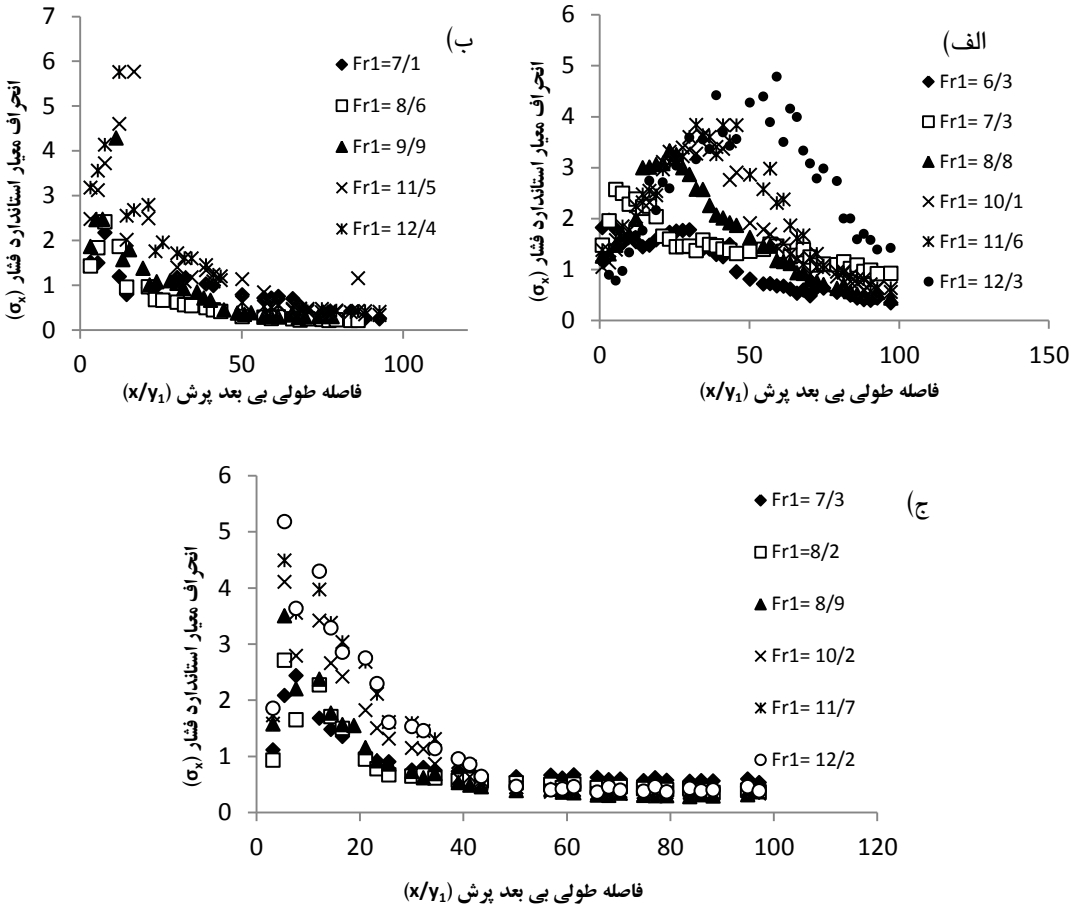
نتایج و بحث

نوسانات فشارهای لحظه‌ای هیدرودینامیکی در عدد فرود ۱۱/۷ در بستر زبر با ارتفاع زبری ۲/۸ سانتی‌متر در شکل (۲) نشان داده شده است. در این شکل نوسانات فشار با فرکانس ۲۰ هرتز در مدت ۹۰ ثانیه در دو پیزومتر شماره ۱۱ و ۸۳ که به ترتیب در فواصل ۱۱/۴ و ۸۶/۶ سانتی‌متری از پنجه پرش قرار گرفته‌اند، مشاهده می‌شود.

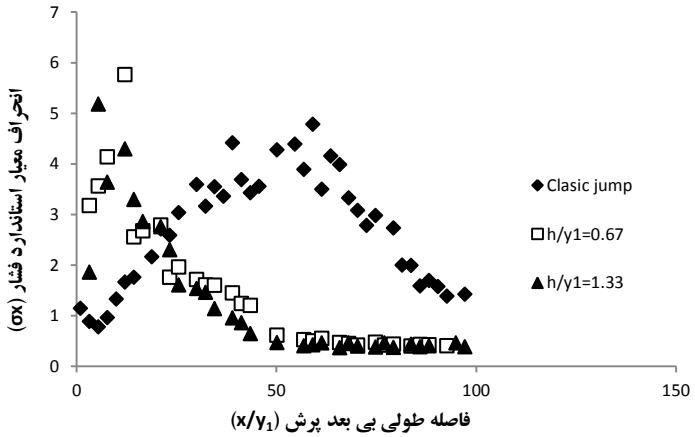
اتلاف انرژی در پرش هیدرولیکی همواره همراه نوسانات بزرگ فشار با فرکانس کم است، از آن‌جایی‌که نوسانات تلاطم ناشی از ایجاد، انتشار و استهلاک گرداب‌ها می‌باشد که در هر لحظه از زمان و هر نقطه از مکان با حالت بسیار پیچیده و تصادفی تغییر می‌نماید، بررسی و تحلیل مبحث پیچیده پدیده نوسانات هیدرودینامیکی فشار با استفاده از روش‌های آماری امکان‌پذیر می‌باشد. از جمله پارامترهای آماری می‌توان به انحراف معیار، ضرایب نوسانات فشار و تابع توزیع احتمال فشار اشاره کرد که در ادامه با توجه به نتایج حاصل از تحقیق حاضر محاسبه شده است. در شکل (۳) مقادیر انحراف معیار استاندار فشار لحظه‌ای در بستر صاف، زبر با h/y_1=۰/۶۷ و h/y_1=۱/۳۳ در اعداد فرود مختلف رسم شده است. انحراف معیار استاندارد یکی از شاخص‌های پراکندگی در تحلیل آماری است. در بحث تحلیل نوسانات فشار، این پارامتر می‌تواند معیار مناسبی به منظور بررسی تغییرات فشار دینامیکی باشد. همان‌طور که در شکل‌های (۳-الف)، (۳-ب) و (۳-ج) مشاهده می‌شود روند تغییرات انحراف معیار استاندار نوسانات فشار یکسان بوده به‌طوری‌که ابتدا روندی افزایشی داشته پس از رسیدن به مقدار حداکثر سیری نزولی دارد، که نشان می‌دهد نوسانات فشار در قسمت ابتدایی پرش بیشتر بوده و به سمت پایین‌دست نوسانات فشار کاهش می‌یابد. هم‌چنین با توجه به شکل (۳) مشاهده می‌شود که با افزایش عدد فرود ، مقدار انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار افزایش یافته است. از آنجایی که با افزایش عدد فرود شدت تلاطم و گرداب‌های چرخشی بیشتر شده و در نتیجه استهلاک انرژی در پرش افزایش می‌یابد، نوسانات فشار هیدرودینامیکی نیز افزایش یافته و انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار بیشتر می‌شود. شکل (۴) تغییرات انحراف معیار استاندارد فشار را در بستر صاف و زبر در عدد فرود ۱۲/۳ نشان می‌دهد، با توجه به شکل می‌توان گفت اجزای زبر در بستر حوضچه آرامش باعث می‌شود حداکثر نوسانات فشار در فاصله نزدیک‌تری از پنجه پرش رخ دهد که دلیل آن برخورد مسقیم جت آب ورودی با اجزای زبر در ابتدای حوضچه و افزایش قدرت گرداب‌ها و در نتیجه افزایش نوسانات فشار می‌باشد. در فاصله طولی $x/y_1 < 20$ نوسانات فشار بیشتر از پرش کلاسیک بوده و به سمت انتهای پرش کاهش می‌یابد، به‌طوری که در بستر زبر با h/y_1=۱/۳۳ میزان کاهش نوسانات فشار به‌طور متوسط در حدود ۸۰ درصد نسبت به پرش کلاسیک می‌باشد.



شکل ۲- نوسانات فشار لحظه‌ای الف- در فاصله ۱۱/٤ سانتی‌متری ازپنجه پرش ب-۸٦/٦ سانتی‌متری از پنجه پرش



شکل ۳- تغییرات انحراف معیار استاندارد فشار الف- بستر صاف، ب- بستر زبر h/y_1=۰/٦۷ ، ج- بستر زبر h/y_1=۱/۳۳



شکل ٤- تغییرات انحراف معیار استاندارد فشار در فواصل طولی بی‌بعد پرش

تغییرات ضریب بی‌بعد انحراف معیار استاندارد فشار، ضریب بی‌بعد فشار مثبت (C_p^+) و ضریب بی‌بعد فشار منفی (C_p^-) به ازای اعداد فرود مختلف در پرش روی بستر زبر h/y_1=۱/۳۳ در شکل (۵) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که این ضریب در ابتدای پرش هیدرولیکی افزایش یافته و به مقدار حداکثر خود رسیده سپس سیر نزولی داشته و در انتهای پرش مقدار آن تقریباً ثابت می‌گردد. در واقع با شروع پرش در محدوده تقریباً نزدیک به پنجه پرش گرداب‌هایی قوی در زیر پرش شکل می‌گیرد، با

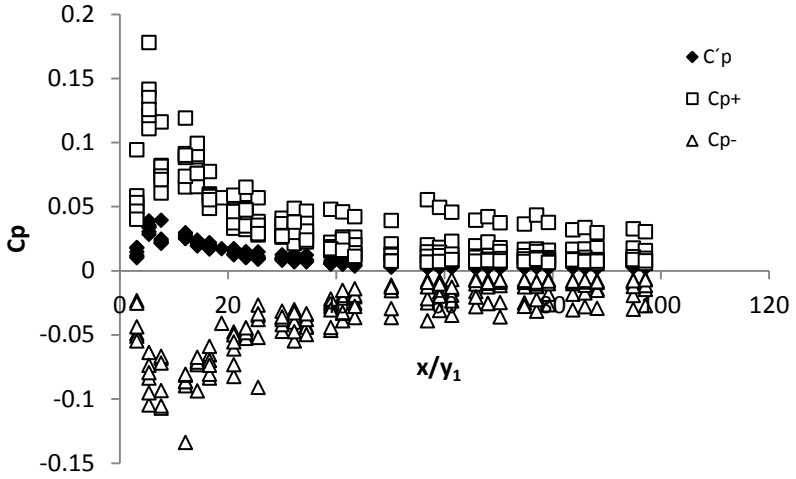
افزایش فاصله از پنجه پرش و در نتیجه استهلاک انرژی شدت تلاطم جریان کاهش می‌یابد. با توجه به شکل (۵) حداکثر $\acute{C}_p$ ، C_p^+ و C_p^- در یک سوم ابتدایی حوضچه اتفاق می‌افتد. ضرایب C_p^+ و C_p^- از رابطه (۱) و ضریب $\acute{C}_p$ با استفاده از رابطه (۴) بصورت زیر محاسبه شدند. مقادیر حداکثر C_p^+ و $|C_p^-|$ ۰/۱۷۸ و ۰/۱۳۴ به‌دست آمد. با توجه به مقدار حداکثر C_p^+ محاسبه شده، بیشترین اختلاف فشار حداکثر با فشار متوسط در تحقیق حاضر ۰/۱۷۸ برابر بار سرعت جریان ورودی به‌دست‌آمده است، که به نوعی می‌تواند نشان‌دهنده اثرات گرداب‌های قوی و ضربات ناشی از نوسانات فشار در بستر زبر باشد. هم‌چنین مقدار حداکثر $|C_p^-|$ محاسبه شده، بیشترین اختلاف میان فشارهای حداقل وارده بر بستر زبر را نسبت به فشار متوسط نشان می‌دهد.

تغییرات مقادیر حداکثر ضریب بی‌بعد نوسانات فشار نسبت به عدد فرود اولیه در شکل (۶) ترسیم و با نتایج تحقیق Karimi et al. (2014) مربوط به مطالعه نوسانات فشار در پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر با بازشدگی ناگهانی، مقایسه شده است. با توجه به شکل، روند تغییرات در هر دو تحقیق یکسان می‌باشد. به‌طوری‌که با افزایش عدد فرود اولیه مقادیر حداکثر ضریب بی‌بعد انحراف معیار استاندارد فشار کاهش می‌یابد. این امر ناشی از این می‌باشد که روند رشد انرژی جنبشی ($V_1^2/2g$) با افزایش عدد فرود بیشتر از رشد شدت نوسانات فشار(σ_x) می‌باشد. هم‌چنین وجود بازشدگی ناگهانی همراه با بستر زبر مؤثرتر بوده و باعث کاهش بیشتر مقادیر حداکثر ضریب نوسانات فشار شده است.

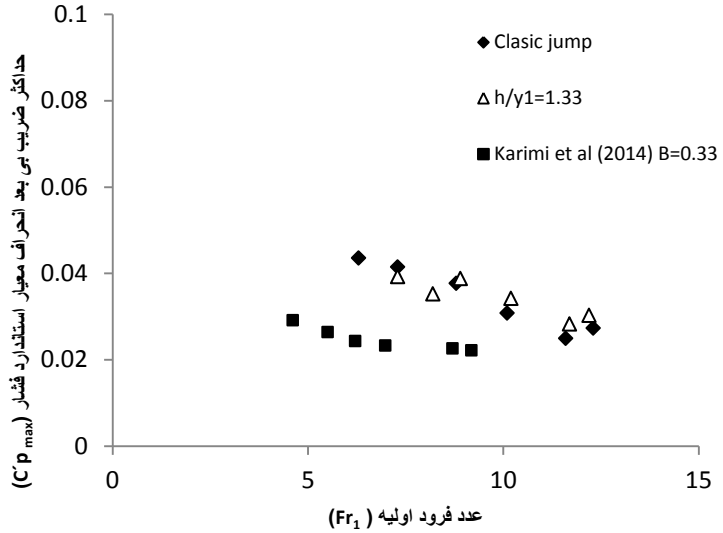
$$\acute{C}_p = \frac{RMS}{V_1^2/2g} = \frac{\left(\frac{\sum(p-\bar{P})^2}{N}\right)^{1/2}}{V_1^2/2g} \qquad (۴)$$

توزیع فشار متوسط (P_{avg}) به‌صورت بی‌بعد در طول پرش هیدرولیکی با استفاده از رابطه کلی (۵) (Karimi et al., 2014)، مورد بررسی قرار گرفت. در شکل (۷) مقادیر ضریب بی‌بعد فشار متوسط نوسانات فشار در پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر با ارتفاع زبری ۲/۸ سانتی‌متر بر اساس رابطه (۵) برای اعداد فرود و در موقعیت‌های نسبی مختلف ترسیم شده است.

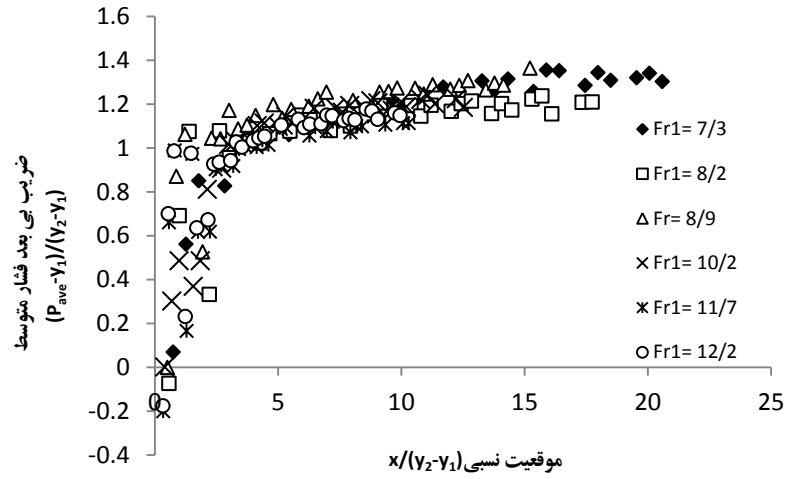
$$\psi_{ave} = \frac{P_{avg}-y_1}{y_2-y_1} = f\left(\frac{x}{y_2-y_1}\right) \qquad (۵)$$



شکل ۵- تغییرات ضریب فشار در فواصل طولی بی‌بعد پرش

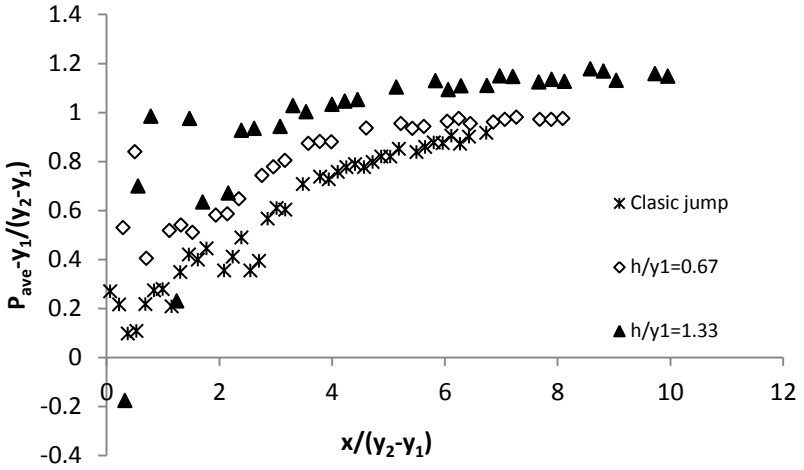


شکل ٦- تغییرات حداکثر ضریب بی‌بعد انحراف معیار استاندارد فشار نسبت به عدد فرود در بستر صاف و زبر

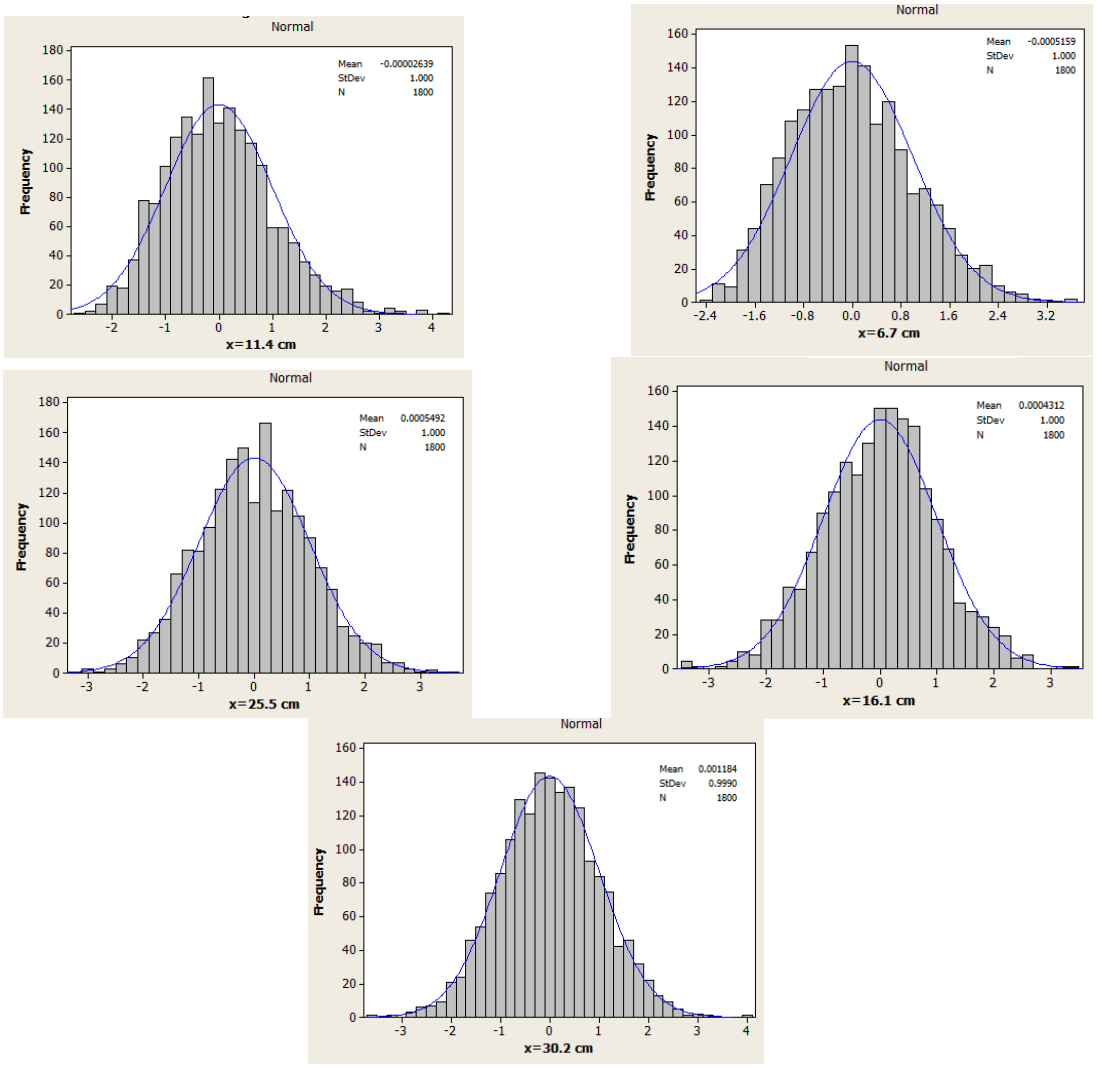


شکل ۷- تغییرات ضریب بی‌بعد فشار متوسط در بستر زبر h/y_1=۱/۳۳ در اعداد فرود مختلف

با توجه به شکل (۷) مشاهده می‌شود تغییرات فشار متوسط در پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر در موقعیت نسبی $x/(y_2-y_1)=7$ تقریباً ثابت می‌شود. با توجه به شکل (۸) می‌توان گفت ضریب بی‌بعد نوسانات فشار متوسط در بستر زبر نسبت به پرش کلاسیک افزایش می‌یابد. که این امر ناشی از کاهش عمق ثانویه در بستر زبر می‌باشد. هدف از رسم تابع چگالی احتمالاتی به‌دست آوردن فشار محتمل با یک احتمال وقوع مشخص می‌باشد. در شکل (۹) برای ۵ پیزومتر در فواصل طولی ۶/۷، ۱۱/۴، ۱۶/۱، ۲۵/۵ و ۳۰/۲ سانتی‌متری از ابتدای پرش در عدد فرود ۱۲/۳ بستر زبر با h/y_1=۱/۳۳ ، تابع چگالی احتمال و توزیع نرمال منطبق بر تابع مذکور ترسیم شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود توزیع این توابع با توزیع نرمال هماهنگ بوده و مغایرت محسوسی وجود ندارد.



شکل ۸- تغییرات ضریب بی‌بعد فشار متوسط در موقعیت نسبی مختلف در عدد فرود ۱۲/۳



شکل ۹- منحنی توزیع نرمال نوسانات فشار پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر h/y_1=۱/۳۳

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر مشخصات هیدرودینامیکی پرش هیدرولیکی روی بستر زبر با دو ارتفاع زبری ۱/۴ و ۲/۸ سانتی‌متر مورد مطالعه قرار گرفت. از آن‌جایی‌که تأثیر ارتفاع زبری ۲/۸ سانتی‌متر بر روی خصوصیات پرش هیدرولیکی بیشتر بوده لذا بیشتر به نتایج مربوط به زبری مذکور در این تحقیق اشاره شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده با افزایش عدد فرود نوسانات فشار افزایش می‌یابد که ناشی از افزایش شدت تلاطم در پرش هیدرولیکی می‌باشد. مقادیر ضریب بی‌بعد انحراف معیار استاندارد فشار ($\acute{C}_p$)، ضریب بی‌بعد فشار مثبت (C_p^+) و ضریب بی‌بعد فشار منفی (C_p^-) در ابتدای پرش هیدرولیکی افزایش یافته و به بیشترین مقدار خود رسیده، سپس سیر نزولی داشته و در انتهای پرش مقدار آن تقریباً ثابت می‌گردد. در واقع با شروع پرش در محدوده تقریباً نزدیک به پنجه پرش گرداب‌هایی قوی در زیر پرش شکل می‌گیرد، با افزایش فاصله از پنجه پرش و در نتیجه استهلاک انرژی شدت تلاطم جریان کاهش می‌یابد. هم‌چنین در فاصله $x/y_1 < 20$ نوسانات فشار در بستر زبر بیشتر از پرش کلاسیک بوده و در فاصله طولی به سمت انتهای پرش نوسانات فشار بسیار کاهش می‌یابد. مقادیر حداکثر ضریب بی‌بعد انحراف معیار استاندارد فشار با افزایش عدد فرود اولیه کاهش می‌یابد. این امر ناشی از روند رشد بیشتر انرژی جنبشی ($V_1^2/2g$) با افزایش عدد فرود نسبت به رشد شدت نوسانات فشار(σ_x) می‌باشد. تغییرات ضریب بی‌بعد فشار متوسط محاسبه شد، با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر در موقعیت نسبی $x/(y_2 - y_1) = 7$ تقریباً ثابت می‌شود. توزیع توابع چگالی احتمال با توزیع نرمال هماهنگ بوده و مغایرت محسوسی وجود ندارد.

منابع

1- Abdul Khader, M.H. and Elango, K., 1974. Turbulent pressure field beneath a hydraulic jump. *Journal of hydraulic research*, *12*(4), pp.469-489.

2- Behrouzi Rad, R., Fathi-Moghadam, M. and Filsoufian, M., 2008. The role of the terminal structure of stilling basins on the dynamic and hydrostatic pressures. In *4th National Congress on Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.* (In Persian).

3- Shafai Bejestan, M. and Neisi, K., 2009. A new roughened bed hydraulic jump stilling basin. *Asian J. Appl. Sci*, *2*(5), pp.436-445.

4- Nasr Esfahani, M.J. and Shafai-Bajestan, M., 2012. Dynamic Force Measurement of Roughened Bed B-jump at an Abrupt Drop. *Archives Des Sciences*, *65*(8).

5- Farhoudi, J., 2009. Total pressure around chute blocks of SAF stilling basins. *International Journal of Civil Engineering*, *7*(4) pp.271-279.

6- Fathi-Moghadam, M., Kermannezhad, J., Ghanbari-Adivi, E., Obeydavi, M. and Hodaei, F., 2008. Effect of Angle of Impact on Dynamic Pressure of the Flip Bucket Jets. *Irrigation Sciences and Engineering*, *36*(1), pp.1-10. (In Persian).

7- Fiorotto, V. and Rinaldo, A., 1992. Fluctuating uplift and lining design in spillway stilling basins. *Journal of hydraulic engineering*, *118*(4), pp.578-596.

8- Hassonizadeh, H. and Shafai-Bajestan, M., 2001. Experimental measurement of dynamic force on slab in stilling basins. In *Wetlands Engineering & River Restoration 2001* (pp. 1-10).

9- Karimi, M., Musavi Jahromi, S.H. and Shafai-Bajestan, M., 2014. The effect of roughness in pressure fluctuations in the stilling basin with sudden expansion. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, *4*(1), pp.63-78. (In Persian).

10- Kavianpour, M. and Mohmmadi, B., 2001. Evaluation of the pressure at chute blocks of stilling basins. *In 3th Iranian Hydraulics Conference, University of Tehran, Tehran, Iran.* (In Persian).

11- Leutheusser, H.J. and Kartha, V.C., 1972. Effects of inflow conditions on hydraulic jump. *Journal of the Hydraulics Division*, *98*(8), pp.1367-1385.

12- Lopardo, R.A. and Henning, R.E., 1985, August. Experimental advances on pressure fluctuations beneath hydraulic jumps. In *Proceedings of the 21st IAHR Congress, Melbourne, Australia* (Vol. 3, pp. 633-638).

13- Mohamed Ali, H.S., 1991. Effect of roughened-bed stilling basin on length of rectangular hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Engineering*, *117*(1), pp.83-93.

14- Toso, J.W. and Bowers, C.E., 1988. Extreme pressures in hydraulic-jump stilling basins. *Journal of Hydraulic Engineering*, *114*(8), pp.829-843.

15- Wang, H., Felder, S. and Chanson, H., 2014. An experimental study of turbulent two-phase flow in hydraulic jumps and application of a triple decomposition technique. *Experiments in fluids*, *55*(7), p.1775.

Shahid Chamran University of Ahvaz
Irrigation Sciences and Engineering **Vol. 41, No. 2, Summer 2018, p. 197-210**

EXTENDED ABSTRACT

Investigation of Pressure Fluctuations of Hydraulic Jump on Rough Bed

P. Parsamehr[1*], D. Farsadizadeh[2], A. Hosseinzadeh Dalir[2], M.J. Nasr Esfahani[3] and A. Abbaspour[4]

1*- Corresponding Author, Ph.D. Student, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran. *(parastoo.parsamehr@gmail.com).*
2- Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran.
3- Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran.
4- Ph.D. of Water Structures, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.
5- Assistant Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran.

Received:15 August 2016 Accepted: 14 March 2017

Keywords: Energy dissipation, fluctuation, Hydraulic jump, Pressure, Rough bed, Turbulence.

Introduction

A hydraulic jump is a sudden transition from a supercritical to subcritical flow with a broad range of turbulence Scales. The fluctuating nature of the flow such as oscillations of jump toe position and production of large eddies are visible in pseudo-periodic manners. Energy dissipation of hydraulic jump occurs with Low-frequency large scale pressure fluctuations which can cause damage and erosion and endanger the security of the structures. In the present study, the effects of discontinuous roughness elements of lozenge shape on the fluctuations of pressure in hydraulic jump have been investigated.

Methodology

The experiments were conducted in a flume with a length of 10.0 m, width of 0.5 m, and depth of 0.60 m at the hydraulic engineering laboratory of the University of Tabriz. The lozenges shape roughness elements with the heights of 1.4 cm (h/y_1=0.67) and 2.8 cm (h/y_1=1.33) and density of 10.67% were installed on the horizontal bed in such a way that the crest of elements was at the same level as the upstream and downstream bed, therefore, the elements are not directly subjected to the incoming jet. The shape of roughness elements was selected according to the study of Shafai Bajestan and Neisi 2009 and they were distributed in a staggered way on the bed. The distances between the roughness elements in the Transverse and longitudinal directions were obtained according to the dimensions of the roughness elements and the stilling basin. The hydraulic jump was formed on the installed roughness elements in the stilling basin with the length of 210 cm, which was located at a distance of 158 cm from the upstream sluice gate.
In order to measure dynamic pressures, 30 piezometers were installed on the central axis of the flume. The instantaneous pressures of the various piezometers installed on the rough bed were converted into electrical signals by pressure transducers via a 6-channel digital board, calibrated in for the range of ±100 mbar, and after processing of the signals using the DAQ system, the recorded data were displayed by the computer using the 6CH Pressure DAQ software.

Results and Discussion

Because of highly random nature of dynamic pressure fluctuations, the analysis is based predominantly on statistical methods. Three dimensionless pressure coefficients are defined as:

$$C_p^+ = \frac{P_{max}-P_{avg}}{\alpha V_1^2/2g}, C_p^- = \frac{P_{min}-P_{avg}}{\alpha V_1^2/2g}, \acute{C}_p = \frac{RMS}{V_1^2/2g} \quad (1)$$

Where P_{max} = the maximum pressure, P_{min}=the minimum pressure, P_{avg} = the mean pressure, RMS is standard deviation; V = the incident flow velocity; and g = the acceleration of gravity.

Figure 1 shows the dimensionless RMS of fluctuating pressures in hydraulic jump on the rough bed. It can be observed from the figure that the distributions of Cp rapidly increased at the beginning of the jump until a maximum value then its value decreased toward the down stream and got close to each other at the end of the hydraulic jump.

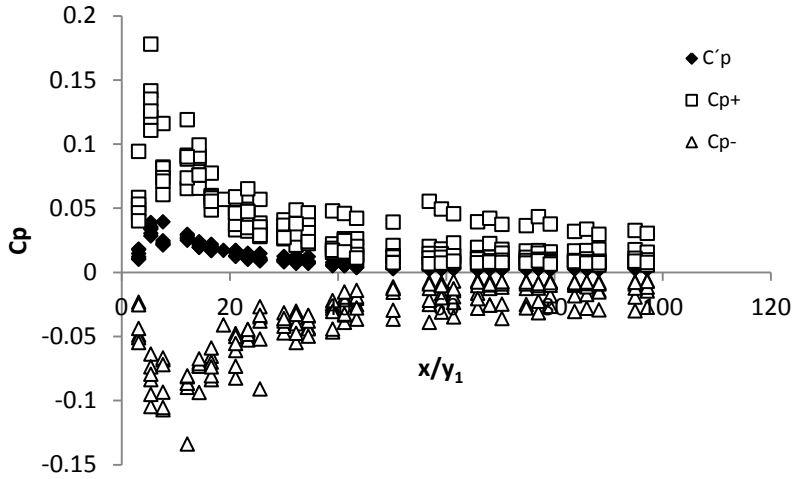
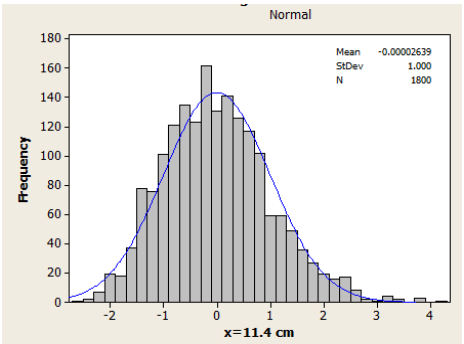
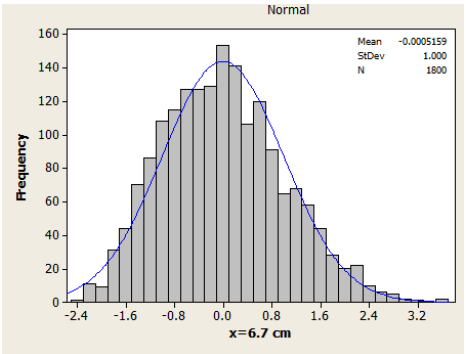


Figure 1– Pressure coefficient in dimensionless longitudinal distances of hydraulic jump on rough bed

The purpose of drawing the probability density function is to obtain the probable pressure with a probability of occurrence. In Fig. 2, the probability density function and the normal distribution are plotted for 5 piezometers at longitudinal intervals of 6.7, 11.4, 16.1, 25.5 and 30.2 cm from the beginning of the jump, in the Froude number of 12.3 with roughness elements of h/y_1 = 1.33. As it can be seen, the distribution of these functions is consistent with normal distribution and there is no significant difference.





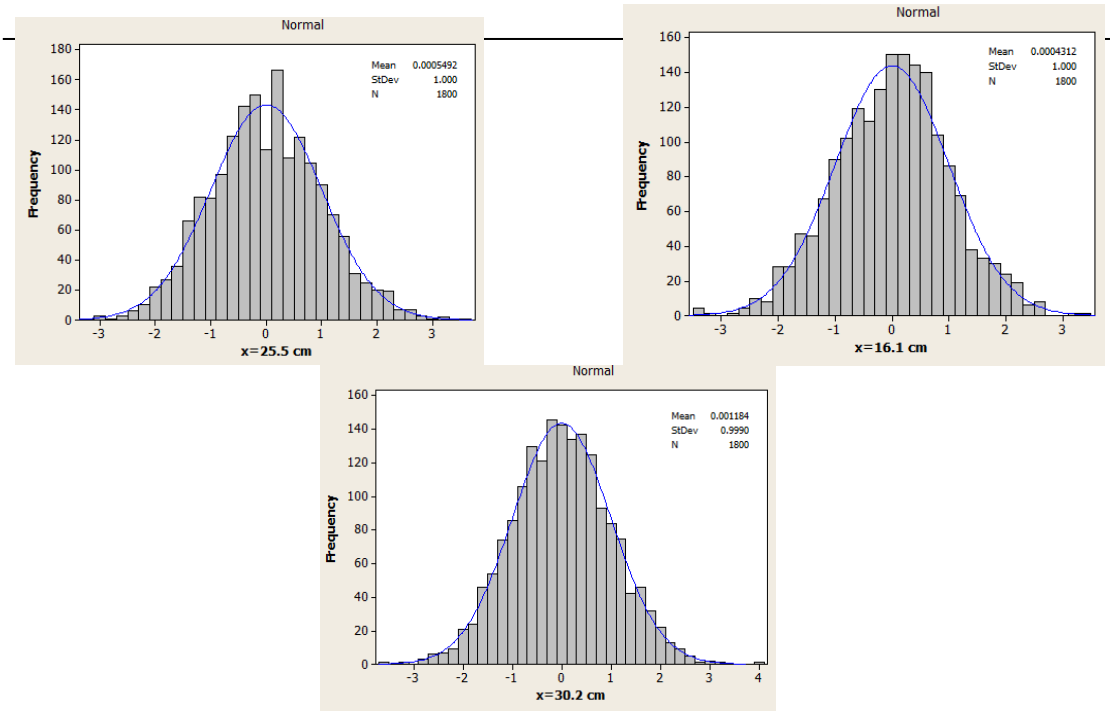


Figure 2– Probability density distributions of pressure fluctuation on rough bed h/y_1=1.33

Conclusion

In the present study, the hydrodynamic characteristics of hydraulic jump on a rough bed with two roughness heights of 1.4 and 2.8 cm were studied. According to the results, by increasing of the Froude number, the pressure fluctuations increases because of the increasing of turbulence intensity in the hydraulic jump. The values of the pressure standard deviation coefficient at the beginning of the hydraulic jump increased to its maximum value, then decreased and at the end of the jump its value is almost constant. In fact, at the beginning of the hydraulic jump near the toe, strong vortices below the jump forms, towards the downstream by increasing of the depth of water and as a result of the energy depletion, the intensity of the flow turbulence decreases. The pressure fluctuations on the rough bed are higher than the classic jump at $x/y_1 < 20$ and towards downstream of the jump decrease about 80% compared with the hydraulic jump on the smooth bed. The variations of the average pressure in the hydraulic jump on the rough bed are almost constant at relative length of $x/(y_2 - y_1) = 7$. In the present study, the peak value of C_p^+ and $|C_p^-|$ were obtained 0.178 and 0.134, respectively.

Refrences

1- Shafai Bejestan, M. and Neisi, K., 2009. A new roughened bed hydraulic jump stilling basin. *Asian J. Appl. Sci*, *2*(5), pp.436-445.

2- Wang, H., Felder, S. and Chanson, H., 2014. An experimental study of turbulent two-phase flow in hydraulic jumps and application of a triple decomposition technique. *Experiments in fluids*, *55*(7), p.1775.