

بررسی نوسانات فشار در پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر

پرستو پارسامهر^{۱*}، داود فرسادی زاده^۲، علی حسین زاده دلیر^۳، محمد جواد نصر اصفهانی^۴ و اکرم عباسپور^۵

*- 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 پذیرش: ۹۵/۱۲/۲۴

تاریخ دریافت: ۹۵/۵/۲۵

چکیده

پرش هیدرولیکی تغییر ناگهانی جریان از حالت فوق بحرانی به زیر بحرانی است که این پدیده هیدرولیکی به صورت تلاطم 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 $(h/y_1) = 0.67$ و $1/33$ بر نوسانات فشار در پرش هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج به دست آمده 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 پایین دست پرش نوسانات فشار در مقایسه با پرش هیدرولیکی بر روی بستر صاف به طور 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 $|C_p^-|$ و 0.178 و 0.134 به دست آمد.

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

مقدمه

پرش هیدرولیکی تغییر ناگهانی جریان از حالت فوق بحرانی به زیر بحرانی است که همراه با محدوده وسیعی از گرداب‌های با مقیاس بزرگ و کوچک می‌باشد. ناحیه غلطایی پرش بلافاصله پایین دست پنجه پرش با وجود گرداب‌های در مقیاس بزرگ و جریان‌های چرخشی تشکیل می‌شود. طبیعت نوسانی جریان به صورت نوسان طولی موقعیت پنجه پرش و ایجاد گرداب‌های بزرگ به صورت شبه تناوبی قابل مشاهده می‌باشد. آشفتگی و تلاطم در پرش هیدرولیکی موجب استهلاک انرژی جریان فوق بحرانی می‌گردد، لذا از این پدیده به عنوان مستهلک کننده انرژی در پایین دست 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. به طور 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 $4/7$ و $5/9$ و $6/6$ 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 توسعه یافته با مفهوم ارائه شده توسط Leutheusser و Kartha (1972) یکسان بوده، به طوری که معیار آن‌ها به صورت فاصله ابتدای پرش از دریچه بالادست ۲۰۰ برابر بازشدگی دریچه بیان شده 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

و ۱۰ و شیب ورودی ۲۵ درجه و سه شیب کف معکوس ۰/۰۰۵، ۰/۱۵ و ۰/۲۵ در فلومی به طول ۱۲ متر، عرض ۰/۷۵ متر و ارتفاع ۰/۸۵ متر به صورت 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 ۱۰ × ۳۰ 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 دی‌های مختلف ۰/۱۸ تا ۰/۵۸ به‌دست آمد.

Farhodi (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 استعراق 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 $C_p + \hat{C}_p$ (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:

جریان توسعه یافته بکار می‌رود. برای جریان توسعه نیافته فشار متوسط (p_m) ممکن است به نصف مقدار به‌دست‌آمده برسد. Loprdو 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 پایین دست سرریز در عدد فرود ۶/۵ رخ داده است. این اختلاف به دلیل ساختار متفاوت تشکیل پرش در پایین دست دریچه و سرریز می‌باشد. Rinaldo و Fiorotto (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.

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

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:

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

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

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_{pmax}) در پرش واگرای زبر تا مقدار ۰/۲۳ به دست 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. به طور 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 استهلاك گردابه‌های چرخشی می‌باشد که با زمان و مکان به صورت تصادفی تغییر می‌یابد. بررسی و تحلیل محث 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 به منظور 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 پایین دست 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 $h/y_1 = 0.67$) که h ارتفاع

$$(C_p + \hat{C}_p)_m = 5.263(F_1)^{-0.9895} \quad (3)$$

که در رابطه فوق پارامتر C_p ضریب فشار متوسط $(\hat{C}_p = \frac{P_{avg}}{1/2\rho V_1^2})$ ضریب نوسانات $(C_p = \frac{\sqrt{\overline{P^2}}}{1/2\rho V_1^2})$ و $(C_p + \hat{C}_p)_m$ حداکثر فشار کل می‌باشد. با افزایش نسبت استغراق مقدار حداکثر فشار کل افزایش یافته در صورتی که موقعیت آن ثابت باقی می‌ماند. فشار کل با افزایش عدد فرود اولیه در جهت جریان روندی کاهشی داشته و به سمت پایین دست و موازی با محور افقی می‌شود. در سطوح جانبی بلوک پای تنداب تغییرات $C_p + \hat{C}_p$ در جهت جریان به سمت پایین دست روندی کاهشی داشته و با افزایش عدد فرود ثابت می‌شوند. همچنین تحلیل نتایج این تحقیق نشان داد که حداکثر نوسانات فشار لحظه‌ای می‌تواند 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 به دست آمده، 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 \hat{C}_p افزایش یافته و در یک دبی ثابت با افزایش زاویه برخورد از صفر به ۹۰ درجه مقادیر \hat{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 تپ دو سد گلابر که با مقیاس ۱:۳۰ مدل شده بر رفتار هیدرولیکی و دینامیکی جریان داخل حوضچه در سه دبی ۱۰۰۰ و 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 تپ دو بیشتر است.

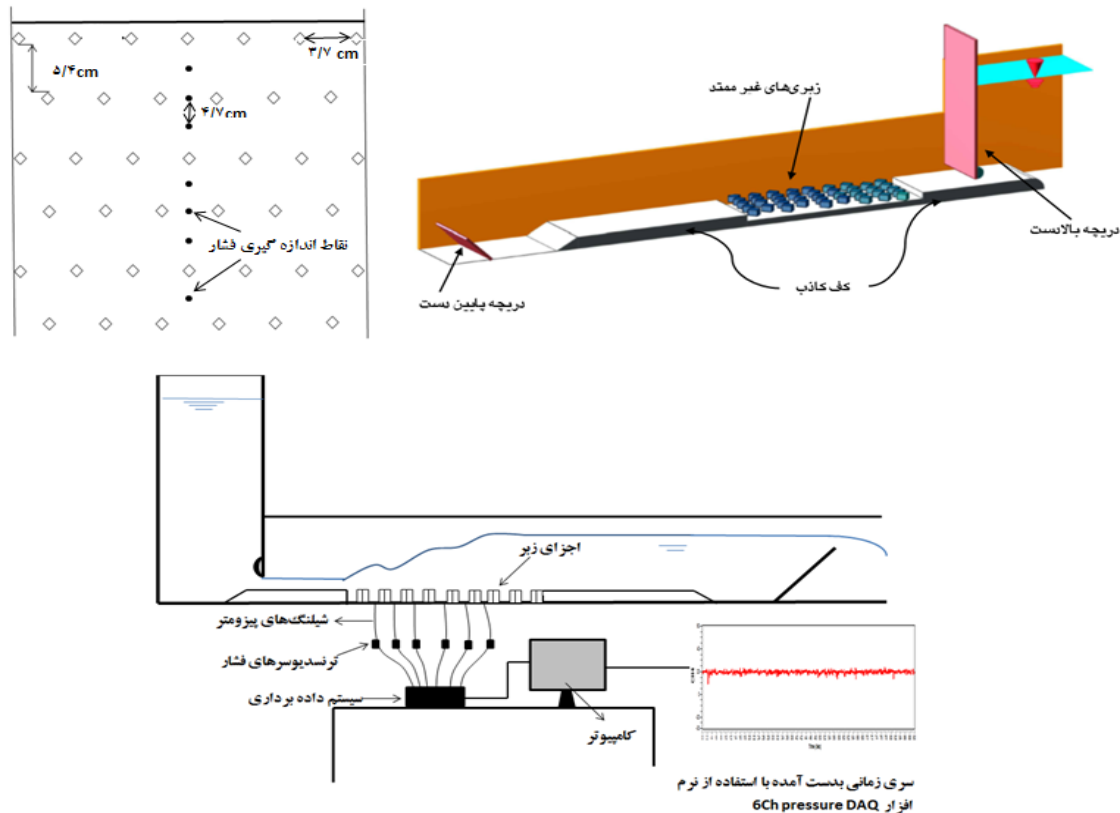
Nasr Esfahani و Shafai-Bajestan (2012) نوسانات

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 به دست آمده مقادیر ضریب فشار C_p در ابتدای پرش مقادیر بالایی بوده و به سمت پایین دست 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.

اولین ردیف از زبری‌ها مطابق با مطالعات Mohamed Ali (1991) به اندازه ارتفاع زبری‌ها از محل تشکیل عمق اولیه پرش قرار گرفت. 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 قطر داخلی 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 ± 100 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.

زبری و y_1 عمق اولیه پرش می‌باشد) و $2/8$ سانتی‌متری از جنس پلی اتیلن با تراکم $10/67$ درصد مورد آزمایش قرار گرفتند. لازم به ذکر است در تحقیق حاضر شکل اجزای زبر با توجه به مطالعات Neisi و Shafai-Bejestan (2009) و ارتفاع اجزای زبر با در نظر 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 $i = \frac{a \cdot N}{A} \times 100$ 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 هم‌تراز سطح بالای اجزای زبر قرار می‌گیرد. زبری‌ها به صورت ردیف‌های هفت و شش تایی با فواصل طولی و عرضی $3/7$ و $5/4$ سانتی‌متر در طول $2/10$ متر از فلوم چیده شدند. فواصل عرضی و طولی بین اجزای زبر با توجه به ابعاد زبری، آرایش زیگزاگی، ابعاد حوضچه آرامش و تراکم $10/67$ درصد انتخاب شده است.



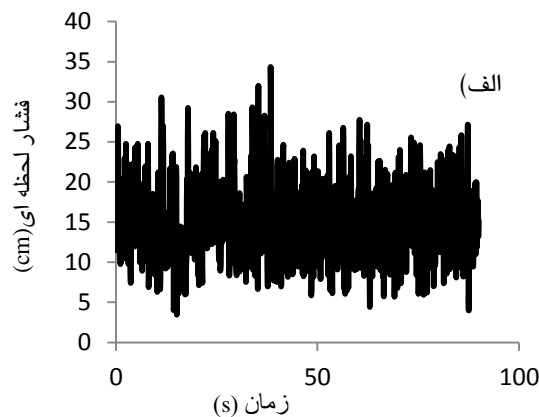
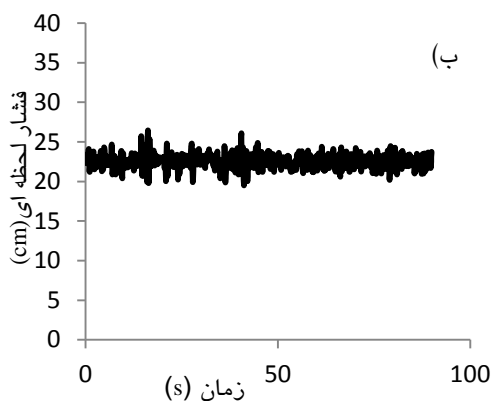
شکل ۱- شمای کلی بستر زبر در کانال آزمایشگاهی

نتایج و بحث

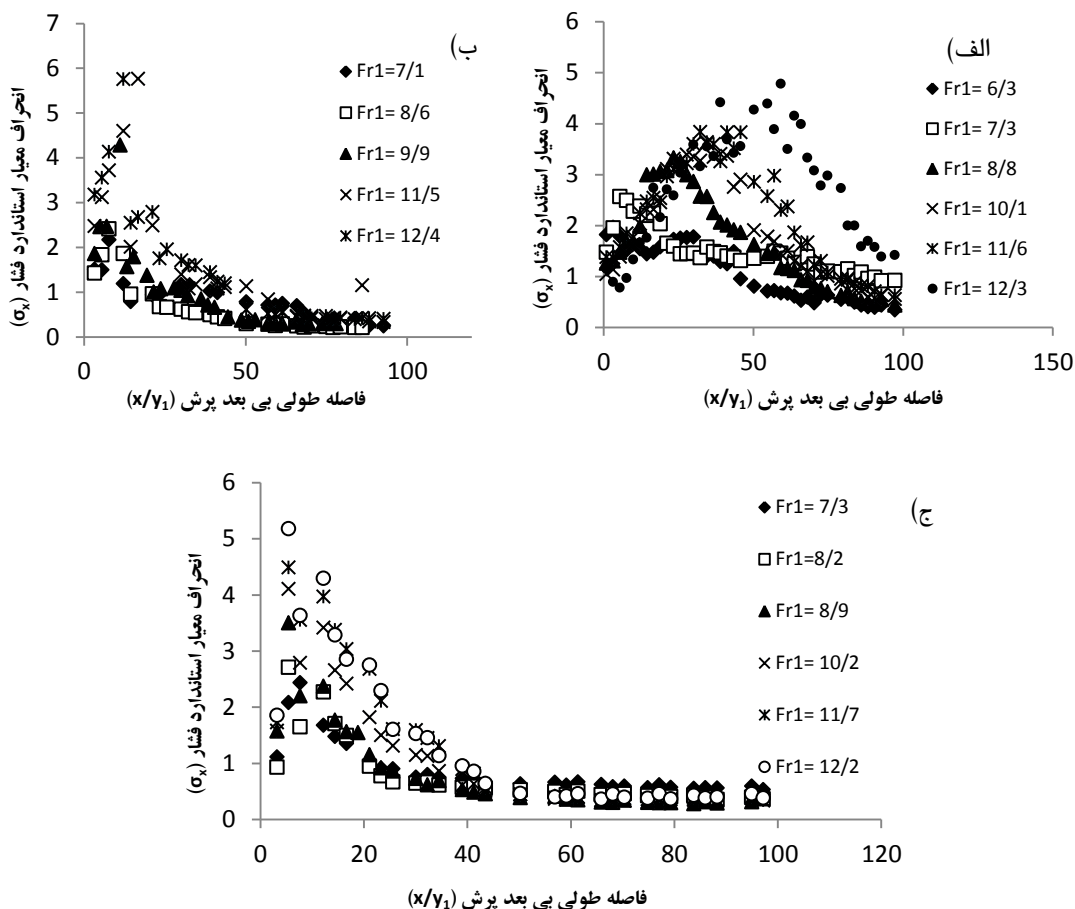
نوسانات فشارهای لحظه‌ای هیدرودینامیکی در عدد فرود $11/7$ در بستر زبر با ارتفاع زبری $2/8$ سانتی‌متر در شکل (۲) نشان داده شده است. در این شکل نوسانات فشار با فرکانس 20 هرتز در مدت 90 ثانیه در دو پیژومتر شماره 11 و 83 که به ترتیب در فواصل $11/4$ و $86/6$ سانتی‌متری از پنجه پرش قرار گرفته‌اند، مشاهده می‌شود.

اتلاف انرژی در پرش هیدرولیکی همواره همراه نوسانات بزرگ فشار با فرکانس کم است، از آنجایی که نوسانات تلاطم ناشی از ایجاد، انتشار و استهلاك 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 استاندارد فشار لحظه‌ای در بستر صاف، زبر با $h/y_1 = 0/67$ و $h/y_1 = 1/33$ 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

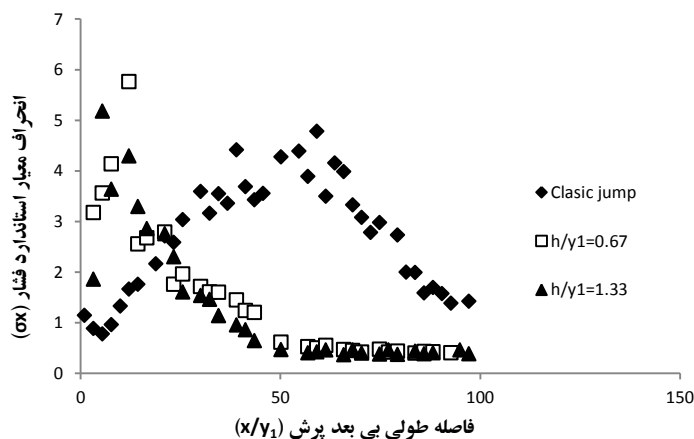
(۳-ج) مشاهده می‌شود روند تغییرات انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار یکسان بوده به‌طوری که ابتدا روندی افزایشی داشته پس از رسیدن به مقدار حداکثر سیری نزولی دارد، که نشان می‌دهد نوسانات فشار در قسمت ابتدایی پرش بیشتر بوده و به سمت پایین دست نوسانات فشار کاهش می‌یابد. هم‌چنین با توجه به شکل (۳) مشاهده 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 استهلاك 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 $12/3$ 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 $h/y_1 = 1/33$ میزان کاهش نوسانات فشار به‌طور متوسط در حدود 80 درصد نسبت به پرش کلاسیک می‌باشد.



شکل ۲- نوسانات فشار لحظه‌ای الف- در فاصله $11/4$ سانتی‌متری از پنجه پرش ب- $86/6$ سانتی‌متری از پنجه پرش



شکل ۳- تغییرات انحراف معیار استاندارد فشار الف- بستر صاف، ب- بستر زبر $h/y_1=0/67$ ، ج- بستر زبر $h/y_1=1/33$



شکل ۴- تغییرات انحراف معیار استاندارد فشار در فواصل طولی بی بعد پرش

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 می‌گیرند، با

تغییرات ضریب بی بعد انحراف معیار استاندارد فشار، ضریب بی بعد فشار مثبت (C_p^+) و ضریب بی بعد فشار منفی (C_p^-) به ازای اعداد فرود مختلف در پرش روی بستر زبر $h/y_1=1/33$ در شکل (۵) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که این ضریب در

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 زیر مؤثرتر بوده و باعث کاهش بیشتر مقادیر حداکثر ضریب نوسانات فشار شده است.

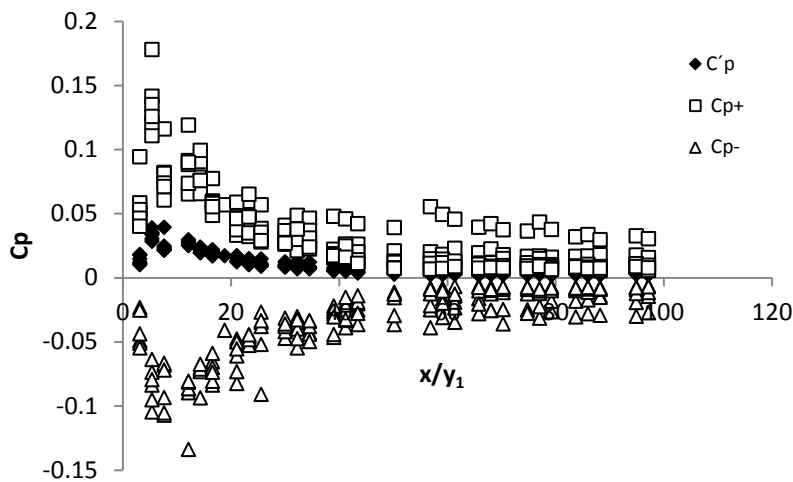
$$\hat{C}_p = \frac{RMS}{V_1^2/2g} = \frac{\left(\frac{\sum(p-\bar{p})^2}{N}\right)^{1/2}}{V_1^2/2g} \quad (4)$$

توزیع فشار متوسط (P_{avg}) به صورت 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 زیر با ارتفاع زبری $2/8$ سانتی‌متر بر اساس رابطه (۵) برای اعداد فرود و در موقعیت‌های نسبی مختلف ترسیم شده است.

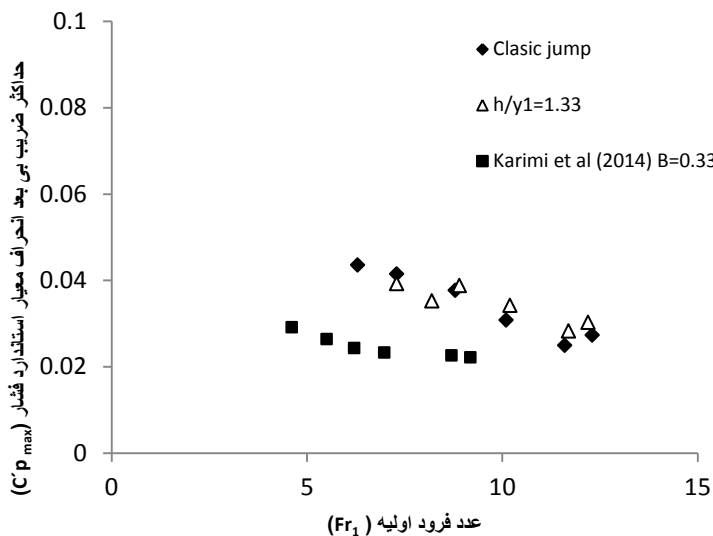
$$\psi_{ave} = \frac{P_{avg} - y_1}{y_2 - y_1} = f\left(\frac{x}{y_1}\right) \quad (5)$$

افزایش فاصله از پنجه پرش و در نتیجه استهلاك انرژی شدت تلاطم جریان کاهش می‌یابد. با توجه به شکل (۵) حداکثر 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 C_p با استفاده از رابطه (۴) بصورت زیر محاسبه شدند. مقادیر حداکثر C_p^+ و $|C_p^-|$ ۰/۱۷۸ و ۰/۱۳۴ به دست 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 به دست آمده است، که به نوعی می‌تواند نشان‌دهنده اثرات گرداب‌های قوی و ضربات ناشی از نوسانات فشار در بستر زیر باشد. همچنین مقدار حداکثر $|C_p^-|$ محاسبه شده، بیشترین اختلاف میان فشارهای حداقل وارده بر بستر زیر را نسبت به فشار متوسط نشان می‌دهد.

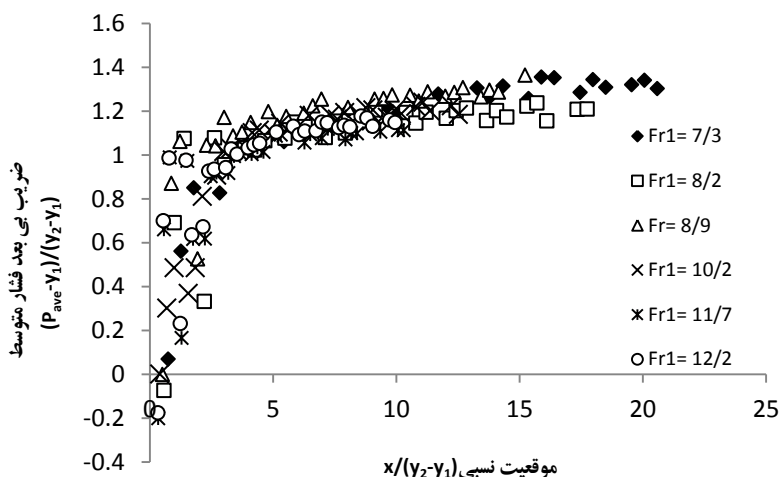
تغییرات مقادیر حداکثر ضریب بی‌بعد نوسانات فشار نسبت به عدد فرود اولیه در شکل (۶) ترسیم و با نتایج تحقیق Karimi et al. (2014) مربوط به مطالعه نوسانات فشار در پرش هیدرولیکی بر روی بستر زیر با بازشدگی ناگهانی، مقایسه شده است. با توجه به شکل، روند تغییرات در هر دو تحقیق یکسان می‌باشد. به طوری که با افزایش عدد فرود اولیه مقادیر حداکثر ضریب بی‌بعد انحراف معیار استاندارد فشار کاهش می‌یابد.



شکل ۵- تغییرات ضریب فشار در فواصل طولی بی‌بعد پرش



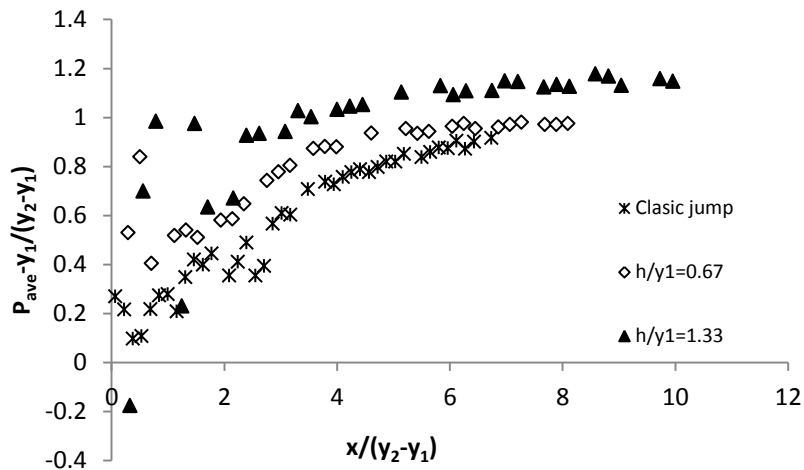
شکل ۶- تغییرات حداکثر ضریب بی بعد انحراف معیار استاندارد فشار نسبت به عدد فرود در بستر صاف و زبر



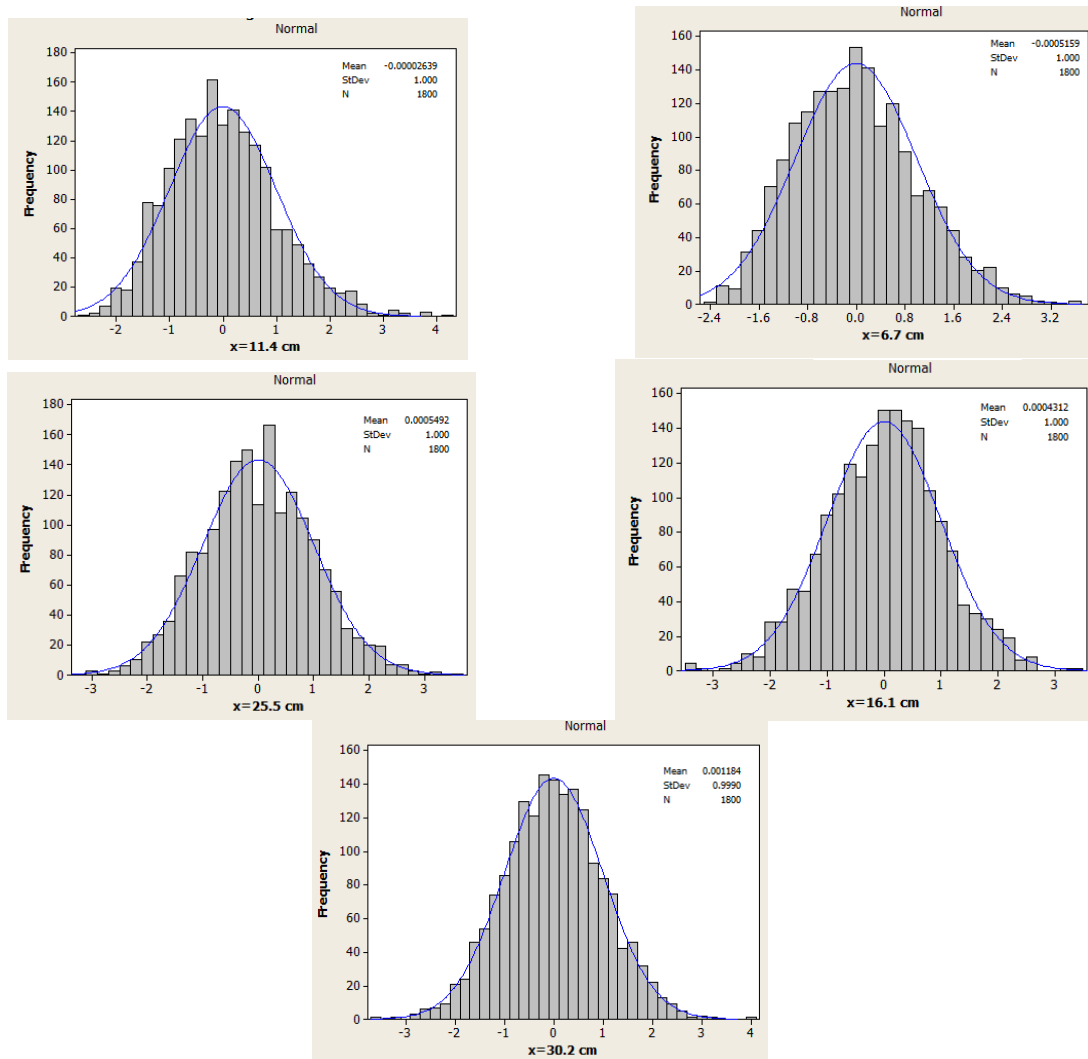
شکل ۷- تغییرات ضریب بی بعد فشار متوسط در بستر زبر $h/y_1=1/33$ در اعداد فرود مختلف

مشخص می‌باشد. در شکل (۹) برای ۵ پیژومتر 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 $h/y_1=1/33$ ، 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.

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 بی بعد 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 به دست آوردن فشار محتمل با یک احتمال وقوع



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



شکل ۹- منحنی توزیع نرمال نوسانات فشار پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر $h/\gamma_1 = 1/33$

نتیجه گیری

پرش گردابه‌هایی 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 زیر 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 زیر 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.

در تحقیق حاضر مشخصات هیدرودینامیکی پرش هیدرولیکی روی بستر زیر با دو ارتفاع زبری $1/4$ و $2/8$ سانتی‌متر مورد مطالعه قرار گرفت. از آنجایی که تأثیر ارتفاع زبری $2/8$ 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 (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

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 Mohammadi, 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.