

## اثر زبری بر شدت نوسانات فشار در حوضچه آرامش با واگرایی ناگهانی

مهناز کریمی<sup>۱\*</sup>، سید حبیب موسوی جهرمی<sup>۲</sup> و محمود شفاعی بجستان<sup>۳</sup>

۱) دانشجوی دکتری؛ رشته سازه های آبی؛ دانشکده مهندسی علوم آب؛ دانشگاه شهید چمران اهواز؛ اهواز؛ ایران

۲) استادا؛ دانشکده مهندسی علوم آب؛ دانشگاه شهید چمران اهواز؛ اهواز؛ ایران

\*نویسنده مسئول مکاتبات: [dr\\_hmusavi@yahoo.com](mailto:dr_hmusavi@yahoo.com)

۳) استادا؛ دانشکده مهندسی علوم آب؛ دانشگاه شهید چمران اهواز؛ اهواز؛ ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۷/۱۸ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۱/۱۳

### چکیده

حوضچه های آرامش با واگرایی ناگهانی از جمله سازه های مستهلک کننده انرژی هستند که در پایین دست سرریزها، درپچه ها و تندابها کاربرد فراوانی دارد. استهلاک انرژی در پرش هیدرولیکی در نتیجه گرداب های تلاطمی بزرگ مقیاس (macro-scale turbulence) می باشد که با نوسانات شدید فشار همراه است و باید در طراحی حوضچه مورد توجه قرار گیرد. از طرفی وجود زبری در بستر حوضچه می تواند سبب تغییر رفتار خطوط جریان و تشکیل گردابها در طول پرش گردد و تاکنون اثر آن بر میزان مشخصات هیدرودینامیکی پرش مورد مطالعه قرار نگرفته است. در این مطالعه آزمایش ها در یک فلوم نسبتاً بزرگ به عرض ۰/۸ و طول ۱۲ متر، در حوضچه واگرایی ناگهانی با نسبت واگرایی (B1/B2) برابر با ۰/۳۳ و در محدوده اعداد فرود بین ۴ تا ۹/۵ مورد بررسی قرار گرفت. فشارهای هیدرودینامیکی در بستر فلوم توسط دستگاه ترانسیدوسر ثبت شده است. نتایج نشان داد که وجود زبری در بستر حوضچه باعث کاهش شدت نوسانات تلاطمی پرش شده است. ماکزیمم ضریب شدت نوسانات فشار ( $CP_{max}$ ) در پرش واگرایی زیر تا مقدار ۰/۰۲۳ به دست آمده که تقریباً ۵۳ درصد نسبت به پرش واگرایی 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 می دهد. حداکثر مقدار ضریب  $CP^+$  و  $CP^-$  تا ۰/۰۸ به دست آمده است. علاوه بر ضرایب بدون بعد نوسانات فشار، توزیع طولی فشار و نوسانات فشار تعیین شده و مقادیر بحرانی در طول پرش به دست آمده است.

**کلید واژه ها:** بستر زبر؛ پرش هیدرولیکی؛ حوضچه واگرایی ناگهانی؛ نوسانات فشار

### مقدمه

سازه را به خطر اندازد. در طراحی حوضچه آرامش اثر نیروهای نوسانی ناشی از تلاطم در پرش می تواند قابل توجه باشد و باید در طراحی حوضچه آرامش مورد توجه قرار گیرد (آریان فر و همکاران، ۱۳۹۲). تا زمانی که امکان اندازه گیری نوسانات فشار برای محققین وجود نداشت، دانش کافی از میزان واقعی نیروهای وارد بر حوضچه آرامش و در نتیجه طراحی ایمن تر این سازه امکان پذیر نبود به طوری که بیشتر محققین با استفاده از سرعت و فشار متوسط روش هایی را برای طراحی دال

پرش هیدرولیکی از جمله روش های استهلاک انرژی جنبشی آب در پایین دست سازه هایی چون درپچه ها، سرریزها و تندابها می باشد که به منظور کنترل آن از سازه ای به نام حوضچه آرامش استفاده می گردد. استهلاک انرژی و تلاطم جریان در حوضچه های آرامش با نوسانات شدید فشار همراه است که می تواند باعث ایجاد ارتعاش، فرسایش و ایجاد حفره در دال کف و یا حتی فرسایش بیش از حد در پایین دست و بستر رودخانه گردد و امنیت

فروود ۴/۵ و تقریباً در فاصله ۳۰ درصد طول پرش واقع شده است. آنها به این نکته اشاره نمودند که در عدد فروود ۴/۵ پرش نوع انتقالی به پرش پایدار تبدیل می‌شود. همچنین مشخص گردید که با افزایش عدد فروود جریان مقدار ضریب نوسانات فشار کاهش می‌یابد و مقادیر حدی نوسانات فشار (حداکثر انحراف فشار ماکزیمم و مینیمم از فشار میانگین) در شرایط جریان توسعه یافته یا در حال توسعه اختلاف چندانی ندارد. Lopardo و

Henning (1985) تاثیر شرایط ورودی پرش هیدرولیکی به حوضچه را در دو حالت نصب دریچه و سرریز مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که بیشترین مقدار ضریب  $C'_p$  در پایین دست دریچه تقریباً در عدد فروود ۴/۵ و در پایین دست سرریز در عدد فروود ۶/۵ رخ داده است. که این اختلاف به دلیل ساختار متفاوت تشکیل پرش در پایین دست دریچه و سرریز می‌باشد. برای نمایش توزیع طولی فشار متوسط و نوسانات فشار در طول پرش روابط بدون بعد زیر را ارائه شده است (Marques et al., 1997):

$$\Psi = \frac{P_x - Y_1}{(Y_2 - Y_1)} = f\left(\frac{X}{Y_2 - Y_1}\right) \quad (2)$$

$$\Omega = \frac{\sigma_x Y_2}{H_t Y_1} = f\left(\frac{X}{Y_2 - Y_1}\right) \quad (3)$$

در این رابطه  $p_x$  فشار متوسط در نقطه مورد نظر،  $Y_1$  عمق اولیه پرش،  $Y_2$  عمق ثانویه پرش،  $X$  فاصله نقطه مورد نظر از پنجه پرش،  $\sigma_x$  انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار و  $H_t$  افت فشار می‌باشد. پارامتر  $X/(Y_2 - Y_1)$  بیانگر موقعیت نسبی جریان از پنجه پرش است که با علامت  $\Gamma$  نشان داده می‌شود. پارامتر  $(P_x - Y_1)/(Y_2 - Y_1)$  بیانگر توزیع فشار متوسط در طول پرش می‌باشد و با علامت  $\Psi$  نشان داده می‌شود و بالاخره پارامتر  $\Omega$  به عنوان ضریب بدون بعد شدت نوسانات فشار می‌باشد. در معادله شماره ۳ میزان افت

کف حوضچه ارائه نموده‌اند که در این روش‌ها شرایط حداکثر بارگذاری، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. با پیشرفت تکنولوژی و امکان اندازه‌گیری فشارهای لحظه‌ای توسط دستگاه ترانس‌دیوسر، این امکان برای محققین فراهم شده تا بتوانند نیروهای هیدرودینامیکی را در پرش هیدرولیکی محاسبه و اثرات این نیروها را در پدیده‌هایی همچون کاویتاسیون و ایجاد حفره در حوضچه آرامش و شکست دال کف و ... بررسی نمایند.

موضوع مشخصات هیدرودینامیکی و نوسانات فشار در پرش هیدرولیکی پس از حادثه تخریب‌های ایجاد شده در حوضچه آرامش سد کارنافولی (Karnafuli dam) در بنگلادش و مالپاسه (Malpaso) در مکزیک به شکل بارزی مشهود گردید. نوسانات فشار در این حوضچه‌ها به زیر دال‌های بتنی منتقل شده و موجب ایجاد نوسانات در نیروی برکنش گردیده به طوری که نهایتاً خرابی‌های عظیمی در سرریز و حوضچه‌های آرامش آنها بوجود آمده است (Bowers and Toso, 1987).

Abdul khader و Elango (۱۹۷۴)، Lopardo و Solari (۱۹۸۰)، اکبری و همکاران (۱۹۸۲) شدت نوسانات فشار را با استفاده از ضریب بدون بعد انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار ( $C'_p$ ) به صورت زیر تعریف نمودند:

$$C'_p = \frac{\sigma}{V_1^2 / 2g} \quad (1)$$

در این رابطه  $\sigma$  انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار و  $V_1$  سرعت در شروع تشکیل پرش می‌باشد. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که حداکثر ضریب بدون بعد انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار نزدیک به محل پنجه پرش و تقریباً برابر با ۰/۰۸۵ می‌باشد.

Lopardo و Solari (1980) نوسانات فشار را برای پرش هیدرولیکی در پایین دست یک دریچه برای اعداد فروود بین ۲/۵ تا ۷/۵ اندازه‌گیری نمودند و بیشترین مقدار ضریب  $C'_p$  را برابر با ۰/۰۸۴ به دست آوردند، که در عدد

انرژی،  $\gamma_1$  عمق اولیه پرش هیدرولیکی،  $I_x$  مقیاس طولی انتگرال نوسانات فشار،  $C_p^+$  ضریب بدون بعد حداکثر انحراف فشار ماکزیمم از مقدار میانگین،  $C_p^-$  ضریب بدون بعد حداکثر انحراف فشار مینیمم از مقدار میانگین،  $\gamma$  وزن مخصوص آب و  $\gamma_c$  وزن مخصوص بتن می‌باشد. حسونی زاده و شفاعی بجستان (۱۳۸۰) به بررسی توام نیروهای هیدرودینامیکی ناشی از پرش هیدرولیکی و نیروهای بالابرنده در کف حوضچه آرامش در اعداد فرود بین ۵ تا ۱۲ پرداختند. و در نتیجه روابطی را برای طراحی ضخامت دال کف حوضچه ارائه نمودند.

از آنجا که ابعاد حوضچه آرامش به مشخصات پرش هیدرولیکی بستگی دارد، در گذشته سعی شده به منظور کاهش هزینه‌های اجرایی با ایجاد تمهیداتی، پرش و به تبع آن طول حوضچه آرامش کاهش داده شود. از جمله این تمهیدات در نظر گرفتن بلوک‌های پای تنداب و یا بلوک‌های میانی می‌باشد که علاوه بر کنترل پرش سبب استهلاک بیشتر انرژی جنبشی می‌گردد.

اما از آنجا که این بلوک‌ها در معرض مستقیم جت ورودی جریان قرار دارند نه تنها از نظر سازه‌ای باید مقاوم باشند بلکه در سرعت جریان ورودی بیش از ۱۷ متر بر ثانیه باعث پدیده کاویتاسیون می‌گردند (Peterka, 1978). با توجه به مشکلات کاربرد بلوک‌ها، زبری بستر می‌تواند جایگزین مناسبی برای کاهش مشخصات پرش باشد. حال چنانچه بستری که پرش روی آن تشکیل می‌شود با استفاده از المان‌هایی به بستر زبر تبدیل شود، به نحوی که سطح فوقانی المان‌ها کاملاً در زیر جت ورودی قرار گیرد، علاوه بر کاهش انرژی جنبشی، مومتم کمتری به آنها وارد می‌شود و در این صورت پرش ایجاد شده را پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر (Hydraulic jump on a rough bed) گویند. Rajaratnam (1986) اولین مطالعات سیستماتیک را در خصوص پرش بر روی بستر زبر انجام داد. همچنین مطالعاتی توسط دیگر محققین چون Alhamid (1994)، Carolo و همکاران (2007) و

فشار در یک بستر زبر بر اساس رابطه زیر به دست می‌آید:

$$H_i = (Y_1 + V_1^2/2g + s) - (Y_2 + V_2^2/2g) \quad (4)$$

به طوری که  $s$  در این رابطه برابر با ارتفاع زبری می‌باشد. آنها در نتایج این تحقیق نشان دادند که بر اساس پارمترهای بدون بعد تعریف شده در معادله شماره ۳ و ۴ موقعیت نقاط مهم در طول پرش قابل پیش‌بینی می‌باشد. به طوری که طول حداکثر نوسانات فشار ( $L_{\sigma max}$ ) در فاصله  $X/(Y_2 - Y_1) \approx 1.75$ ، طول غلطاب‌ها ( $L_R$ ) در فاصله  $X/(Y_2 - Y_1) \approx 6$  و در نهایت طول پرش ( $L_j$ ) در فاصله  $X/(Y_2 - Y_1) \approx 8$  رخ می‌دهد.

Fioroto و Rinaldo (1992b) تاثیر شکاف‌های اطراف دال در کف حوضچه آرامش و نفوذ آب در زیر دال بر نوسانات فشار هیدرودینامیکی را مورد مطالعه قرار دادند. همچنین نتیجه مطالعات آنها نشان می‌دهد که نوسانات فشار باعث تخریب درزهای انبساطی بین دال‌ها می‌شود و از محل این درزها مقادیر فشار زیادی از ابتدا تا انتهای دال گسترش پیدا می‌کند. با افزایش اختلاف فشار ابتدا و انتهای دال، نیروی به وجود آمده در اثر نوسانات فشار ممکن است از وزن دال بیشتر گشته و سبب واژگونی دال گردد. به این ترتیب آنها معیار زیر را برای طراحی دال بتنی ارائه نمودند:

$$\frac{s}{v_j^2/2g} > \Omega_2 \left( \frac{L_B}{Y_j}, \frac{L_B}{I_x} \right) (C_p^+ + C_p^-) \frac{\gamma}{\gamma_c - \gamma} \quad (5)$$

آنها با توجه به آزمایشات انجام شده به این نتیجه رسیدند که ثبات و پایداری دال در شرایط زیر رخ خواهد داد:

$$\frac{s}{v_j^2/2g} > (0.5 - 0.8) \frac{\gamma}{\gamma_c - \gamma} \approx 0.3 - 0.5 \quad (6)$$

به طوری که  $s$  ضخامت معادل پوشش،  $\Omega_2$  ضریب بدون بعد تعدیل نیرو،  $L_B$  طول دال حوضچه استهلاک

ترتیب یک مدل با ابعاد نسبتاً بزرگ مورد استفاده قرار گرفته است. مقطع فلوم مستطیلی به طول ۱۲ متر، عرض ۰/۸ متر و ارتفاع دیواره‌های آن برابر با ۰/۷ متر می‌باشد. کف کانال فلزی (که توسط یک لایه ورق پلکسی‌گلاس پوشانده شده است) و دیواره‌های آن از جنس شیشه می‌باشد. فلوم مورد نظر به منظور تامین هد مورد نیاز دارای یک مخزن به ارتفاع ۳/۵ متر در ابتدای آن می‌باشد. به منظور تشکیل پرش و ایجاد جریان فوق بحرانی از یک دریچه کشویی در ابتدای فلوم استفاده شده است. به منظور جلوگیری از انقباض خطوط جریان خروجی از دریچه و همچنین اینکه عمق اولیه پرش با بازشدگی دریچه برابر باشد، شکل بالادست دریچه به صورت نیم دایره بوده است. در پایین دست فلوم نیز برای تثبیت موقعیت پرش از دریچه کشویی دیگری استفاده شد. برای تشکیل پرش واگرایی ناگهانی در تمام آزمایش‌ها، دریچه پایین‌دست همواره به گونه‌ای تنظیم می‌شد که عمق اولیه پرش در محل تغییر مقطع رخ دهد.



شکل ۱. نمای از پرش در بستر زبر

به منظور زبر کردن بستر از زبری‌های مصنوعی از جنس پلی‌آمید استفاده شده است. شکل زبری‌ها بر اساس مطالعات الله‌دادی و شفافی‌بجستان (۱۳۸۷) به صورت شش ضلعی انتخاب شده است. ابعاد زبری‌ها نیز بر اساس مطالعات کاظمیان زاده و شفافی‌بجستان (۱۳۸۷) انتخاب شده است، بطوری که دارای طول و عرض ۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۳ سانتی‌متر می‌باشد. نحوه آرایش زبری‌ها نیز بر اساس مطالعات محمدعلی (۱۹۹۱) به صورت زیگزاگ ۷-۶-۷ با فواصل عرضی ۷/۵ و فواصل طولی ۱۵

نصر و شفافی‌بجستان (۲۰۱۱) صورت گرفته است که نتایج این مطالعات بیانگر تاثیر زبری در کاهش طول پرش هیدرولیکی و عمق پایاب می‌باشد.

همچنین به منظور عملکرد بهینه حوضچه آرامش لازم است که پرش کاملاً در حوضچه رخ دهد که به عمق آب پایین دست بستگی دارد. اگر به هر دلیلی تامین عمق مورد نیاز برای وقوع پرش کلاسیک میسر نباشد و یا هزینه‌های حفاری به منظور پایین آوردن کف حوضچه مقرون به صرفه نباشد، یکی از راه‌های حصول اطمینان از تشکیل پرش در حوضچه استفاده از واگرایی مقطع می‌باشد (Hager and Bremen, 1993). با توجه به اهمیت این نوع پرش، مشخصات هیدرولیکی در مقاطع واگرایی ناگهانی توسط محققین مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است.

خصوصیات متوسط جریان پرش هیدرولیکی در بستر زبر و در مقاطع واگرایی ناگهانی در سطح گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است در حالی که در زمینه خصوصیات متلاطم پرش هیدرولیکی در بستر زبر با مقطع واگرایی ناگهانی تاکنون مطالعه‌ای انجام نپذیرفته است. بنابراین در این مطالعه هدف انجام مطالعه آزمایشگاهی به منظور تعیین میزان تاثیرگذاری زبری بر مشخصات هیدرودینامیکی نوسانات فشار در طول پرش هیدرولیکی با نسبت واگرایی (نسبت عرض بالادست به عرض پایین‌دست) به میزان ۰/۳۳ می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

### ساختار آزمایشگاهی

در جریان‌های با هوادهی طبیعی که هوادهی آنها عموماً ناشی از آشفته‌گی است (مانند جریان آشفته در پرش هیدرولیکی) استفاده از معیار تشابه عدد فرود در مدلسازی هنگامی معتبر است که مدل به حد کافی بزرگ باشد تا در طول پرش هیدرولیکی، ورود هوا بتواند تاثیر قابل ملاحظه‌ای در استهلاک انرژی داشته باشد. به این

هیدرولیکی پایدار جزء پدیده‌های تصادفی ساکن به حساب می‌آید (Lopardo and Henning, 1985). به این ترتیب مقدار متوسط و انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌گردد.

$$\bar{p} = \frac{1}{T} \int_0^T p dt \quad (7)$$

$$\sigma = \frac{1}{T} \int_0^T (p - \bar{p})^2 dt \quad (8)$$

در این روابط  $\bar{p}$  متوسط زمانی فشار،  $p$  مقدار فشار در هر لحظه،  $T$  زمان برداشت اطلاعات و  $\sigma$  انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار در پرش هیدرولیکی می‌باشد. مقدار میانگین فشار مشخص کننده مبنایی است که نوسانات فشار حول آن انجام می‌شود. در پرش هیدرولیکی مقدار متوسط نوسانات فشار تقریباً با فشار پیرومتریک و یا به عبارتی با پروفیل سطح آب در هر نقطه برابر می‌باشد (Fioroto and Rinaldo, 1992b). در صورتیکه انحراف معیار نوسانات فشار به وسیله ارتفاع معادل سرعت ورودی در پرش هیدرولیکی بدون بعد گردد، پارامتر مهمی بنام ضریب انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار ( $C_p'$ ) مطابق با رابطه ۱ به دست می‌آید.

از دیگر پارامترهای بسیار مهم در طراحی دال حوضچه‌های آرامش، اندازه حد نهایی نوسانات فشار می‌باشد. حد نهایی نوسانات فشار مشخص کننده انحراف مقادیر حداکثر و حداقل فشار از فشار میانگین می‌باشد و مطابق روابط زیر به دست می‌آیند.

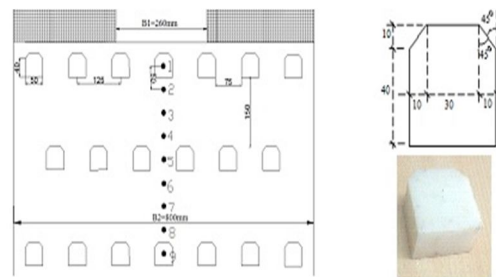
$$C_p^+ = (p_{\max} - \bar{p}) / \frac{V_1^2}{2g} \quad (9)$$

$$C_p^- = (p_{\min} - \bar{p}) / \frac{V_1^2}{2g} \quad (10)$$

در این روابط  $C_p^+$  حداکثر انحراف فشار ماکزیمم و  $C_p^-$  حداکثر انحراف فشار مینیمم از فشار میانگین نامیده می‌شود.

همچنین می‌توان استدلال کرد که فشارهای هیدرودینامیکی در حوضچه آرامش تابعی از متغیرهای زیر است.

سانتی‌متر در طول ۲/۴۵ متر از فلوم انتخاب شد. اولین ردیف از زبری‌ها مطابق با مطالعات محمدعلی (۱۹۹۱) به اندازه ارتفاع زبری‌ها از محل تشکیل عمق اولیه پرش (که در این پژوهش در محل تغییر مقطع بوده است) قرار گرفته است. در شکل (۲) نمونه‌ای از شکل و ابعاد زبری‌های مورد استفاده و آرایش قرارگیری آنها نشان داده شده است.



شکل ۲. شکل و ابعاد زبری‌ها و نحوه آرایش در بستر حوضچه (ابعاد به میلی‌متر می‌باشد)

با توجه به اینکه عرض فلوم آزمایشگاه برابر با ۸۰ سانتی‌متر است، برای ایجاد واگرایی ناگهانی باید عرض فلوم را در بخش کوتاهی کاهش داد. برای این منظور، دو باکس در ابعاد ۲۷×۷۰×۸۰ سانتی‌متر تهیه و در دو طرف فلوم نصب شد. به این ترتیب عرض مقطع اولیه برابر با ۲۶ سانتی‌متر و نسبت واگرایی (نسبت عرض بالادست به عرض پایین‌دست) به میزان ۰/۳۳ انتخاب شد که بر اساس مطالعات الحمید (۲۰۰۴) در مطالعه مشخصات هیدرولیکی پرش می‌باشد.

جدول ۱. محدوده متغیرها در نسبت واگرایی ۰/۳۳

نوع بستر	$\sigma Y_1$ (cm)	$\sigma Q$ (l/s)	$\sigma Fr$	$\sigma V$ (m/s)
بستر زبر	۰۴-۰۳	۰۰/۰۶-۰۳۰۳	۰۲/۰۹-۰۴۰۶	۰۵/۰۷-۰۲۹۰
بستر صاف	۰۴-۰۳	۰۵۲/۰۶-۰۲۶۰	۰۵/۰۸-۰۴۰۱	۰۲/۰۵-۰۲۶۰

### روابط تحلیلی و ابعادی

با توجه به اینکه فشار در کف حوضچه آرامش کاملاً دارای نوسانات تصادفی می‌باشد، تجزیه و تحلیل آن عمدتاً با استفاده از روش‌های آماری می‌باشد. باید توجه داشت که پدیده تصادفی نوسانات فشار در زیر پرش

برای اندازه‌گیری فشارهای هیدرودینامیکی از دستگاه ترانسدیوسر مدل DM5010S استفاده شد. جهت واسنجی دستگاه میانگین فشار ثبت شده توسط دستگاه در یک جریان آرام، با فشارهای استاتیکی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان می‌داد که میانگین فشارهای هیدرودینامیکی برابر با فشار استاتیکی می‌باشند.

از نقطه شروع واگرایی، در امتدادی به طول ۲/۳۵ متر در خط مرکزی کف فلوم، ۲۲ نقطه جهت اندازه‌گیری فشار در نظر گرفته شد. فاصله نقاط در طول ۰/۸۵ متر اولیه برابر با ۵ سانتی‌متر و در ادامه از ۱۰ تا ۲۵ سانتی‌متر افزایش داده شده است. نقاط اندازه‌گیری فشار را سوراخ نموده و نازل‌هایی در آنها نصب گردید. برای اتصال نازل‌ها به ترانسدیوسر از شیلنگ‌هایی به طول حداکثر ۱/۸ متر استفاده شده است.

همچنین از آنجا که ثابت شده است که فرکانس غالب نوسانات فشار در مدل پرش هیدرولیکی کمتر از ۲۵ هرتز می‌باشد (Toso and Bowers, 1988) و اکبری و همکاران (۱۹۸۲)، از دستگاهی با نرخ نمونه‌برداری ۴۰ هرتز در این مطالعه استفاده شده است. به این ترتیب نوسانات فشار در هر ۹۰ ثانیه توسط مبدل فشار اندازه‌گیری و ثبت شده‌اند. پس از پایداری پرش مقدار دبی جریان به وسیله دبی‌سنج آلتراسونیک قرائت شده و به منظور برداشت عمق ثانویه از عمق سنج دیجیتالی استفاده گردید. بر اساس دبی جریان و عمق اولیه پرش مقدار سرعت در هر یک از آزمایش‌ها محاسبه شده است. محدوده متغیرهای آزمایش به طور خلاصه در جدول ۱ ارائه شده است.

### نتایج و بحث

#### تغییرات نوسانات فشار در بستر پرش هیدرولیکی

شکل ۳ نوسانات لحظه‌ای فشارهای هیدرودینامیکی در یک بستر زبر با نسبت واگرایی ۰/۳۳ را برای دبی ۳۹ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد. در این شکل تغییرات فشار با فرکانس ۴۰ هرتز در مدت ۹۰ ثانیه در سه موقعیت

$$f(p', V_1, Y_1, Y_2, B_1, B_2, X, L_j, \rho, v, g) = 0 \quad (11)$$

در این رابطه  $p'$  جزئی نوسانی فشار که برابر است با  $(p - \bar{p})$ ، سرعت اولیه پرش،  $V_1$  عمق اولیه پرش که برابر با ارتفاع بازشدگی دریچه می‌باشد،  $Y_2$  عمق مزدوج پرش،  $B_1$  عرض مقطع اول،  $B_2$  عرض مقطع دوم،  $L_j$  طول پرش،  $X$  موقعیت پیژومترها نسبت به نقطه شروع واگرایی،  $v$  ویسکوزیته آب،  $\rho$  وزن مخصوص آب و  $g$  شتاب ثقل می‌باشد. با استفاده از آنالیز ابعادی پارامترهای بدون بعد به صورت زیر محاسبه شده است.

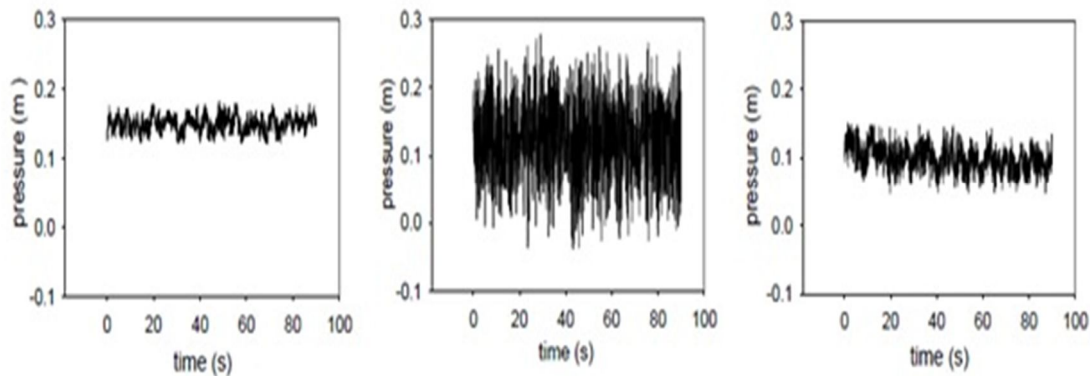
$$C_p = \frac{\sqrt{p'^2}}{V_1^2 / 2g} = f\left(\frac{Y_2}{Y_1}, \frac{B_1}{B_2}, \frac{X}{L_j}, \frac{V_1 v}{\sqrt{gY_1}}, \frac{V_1}{\sqrt{gY_1}}\right) \quad (12)$$

اولین پارامتر همان ضریب بدون بعد انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار می‌باشد. دومین پارامتر نسبت اعماق مزدوج پرش است که خود تابعی از عدد فرود اولیه پرش می‌باشد. پارامتر  $B_1 / B_2$  نسبت واگرایی می‌باشد که مقدارش ثابت و برابر با ۰/۳۳ است. پارامتر  $X / L_j$  بیانگر موقعیت نسبی از پنجه پرش، پارامتر  $V_1 v / \sqrt{gY_1}$  عدد رینولدز است که بیانگر میزان تلاطم جریان است و از آنجا که در پرش هیدرولیکی محدوده عدد رینولدز بسیار بالاست، می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. پارامتر  $V_1 / \sqrt{gY_1}$  عدد بدون بعد فرود می‌باشد که برای جریان با سطح آزاد برقرار است. نسبت عدد فرود اهمیت زیادی دارد و برای برقراری تشابه دینامیکی لازم است عدد فرود بین مدل و نمونه اصلی یکی باشد. بنابراین شدت نوسانات در پرش هیدرولیکی وابسته به عدد فرود و فاصله نسبی از پنجه پرش می‌باشد.

$$C_p' = f\left(\frac{X}{L_j}, Fr\right) \quad (13)$$

ابزار و روش اندازه‌گیری

مختلف توسط دستگاه ترانسدیوسر ثبت شده است. همانطور که اشاره شد، فشارهای هیدرودینامیک در زیر پرش دارای ماهیت تصادفی هستند و مقدار آن در موقعیت‌های مختلف پرش در هر لحظه متفاوت می‌باشد.



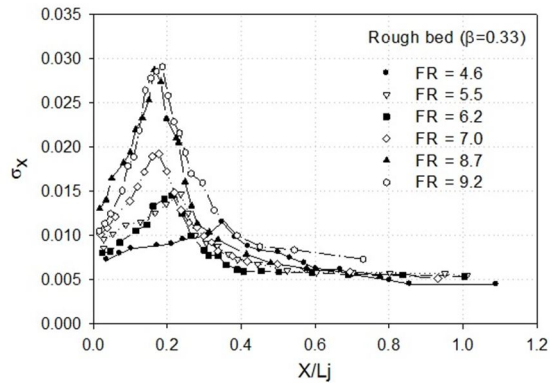
شکل ۳. تغییرات لحظه‌ای فشار در پیزومتر شماره ۵، ۱۲ و ۲۰ (به ترتیب از راست به چپ)

فشارهای هیدرودینامیکی می‌باشد. در حقیقت با افزایش عدد فرود جریان ورودی، پرش پایدارتری تشکیل می‌شود و شدت تلاطم در جریان افزایش می‌یابد همچنین گردابه‌های قوی‌تری تشکیل می‌شود که سبب افزایش انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار می‌شود.

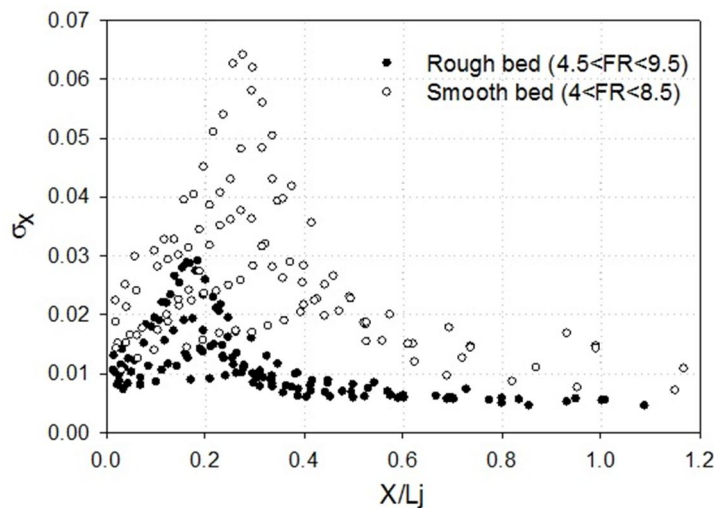
همچنین مقدار انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار در زیر پرش وابسته به فاصله از پنجه پرش می‌باشد. به طوری که در ابتدای پرش هیدرولیکی مقدار آن افزایش یافته تا اینکه به یک مقدار ماکزیمم می‌رسد. سپس سیر نزولی داشته و در انتهای پرش مقدار آن تقریباً ثابت می‌گردد. در واقع با شروع پرش در محدوده تقریباً نزدیک به پنجه پرش گردابه‌هایی قوی در زیر پرش شکل می‌گیرد، با افزایش فاصله از پنجه پرش و ورود هوا به جریان که با استهلاك انرژی همراه است، از شدت تلاطم و قدرت گردابه‌های جریان کاسته می‌شود تا اینکه در انتهای پرش مقدار تلاطم در جریان تقریباً ثابت می‌شود.

تغییرات آبی در شدت نوسانات فشار می‌تواند سبب تشکیل اختلاف پتانسیل لحظه‌ای در بستر پرش گردد و این اختلاف پتانسیل می‌تواند سبب تشدید نیروی برخاست، ایجاد خستگی در مصالح و تخریب بتن گردد. با توجه به حجم زیاد اطلاعات جمع‌آوری شده مربوط به نوسانات فشار بررسی مستقیم داده‌ها امکان پذیر نبوده به همین جهت انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار برای بستر زبر با نسبت واگرایی ۰/۳۳ بر ای اعداد فرود مختلف مطابق با رابطه ۸ محاسبه و در شکل ۴ ترسیم شده است.

انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار معیار مناسبی برای تعریف شدت نوسانات فشار می‌باشد. همانگونه که در شکل ۴ نشان داده شده است، با افزایش عدد فرود جریان ورودی، مقدار انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار افزایش یافته است. استهلاك انرژی در حوضچه آرامش به دلیل تشکیل گردابه‌های تلاطمی در پرش می‌باشد. این گردابه‌ها سبب ایجاد نوسانات شدید در



شکل ۴. تغییرات انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار در طول بستر زبر واگرا



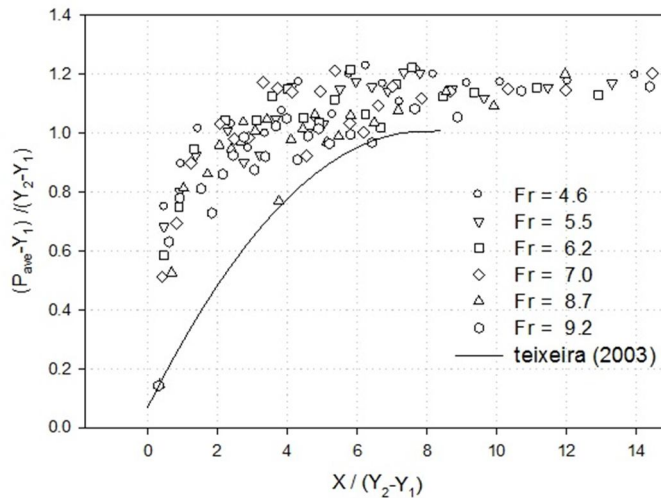
شکل ۵. تغییرات انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار در بستر واگرای زبر و صاف

تعیین توزیع فشار متوسط اولین گام ضروری برای توصیف میدان فشاری است که در بستر پرش هیدرولیکی رخ می‌دهد. به منظور بررسی توزیع فشار متوسط در بستر پرش هیدرولیکی Marques و همکاران (۱۹۹۷) رابطه بدون بعد ۲ را ارائه نمودند. بسیاری از محققان بر این باورند که سطح آزاد پرش را می‌توان با فشار متوسط در کف حوضچه آرامش نشان داد. به این ترتیب بر اساس رابطه ۲ مقدار ضریب بدون بعد فشار متوسط برای پرش واگرا با بستر زبر برای اعداد فرود مختلف محاسبه و در شکل ۶ ترسیم شده است. در این شکل محور افقی و عمودی به ترتیب بیانگر موقعیت نسبی نوسانات فشار و پارامتر بدون بعد فشار متوسط ( $\Psi_{ave}$ ) می‌باشند.

شکل ۵ مقدار انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار را برای بستر صاف و زبر در یک مقطع واگرای ناگهانی با نسبت واگرایی ۰/۳۳ نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد وجود زبری در بستر حوضچه سبب کاهش قابل ملاحظه‌ای در شدت نوسانات فشار می‌گردد. به طوری که ماکزیمم انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار در بستر زبر حدود ۶۰ درصد نسبت به بستر صاف کاهش یافته است. وجود زبری در بستر حوضچه سبب افزایش تنش برشی بستر و مانع از گسترش طولی گردابه‌های تلاطمی و در نتیجه کاهش مقدار و طول نوسانات فشار می‌شود.

توزیع طولی فشارهای هیدرودینامیکی ( $\Psi$ )





شکل ۶. توزیع طولی نوسانات فشار متوسط در امتداد بستر زبر با واگرایی ۰/۳۳

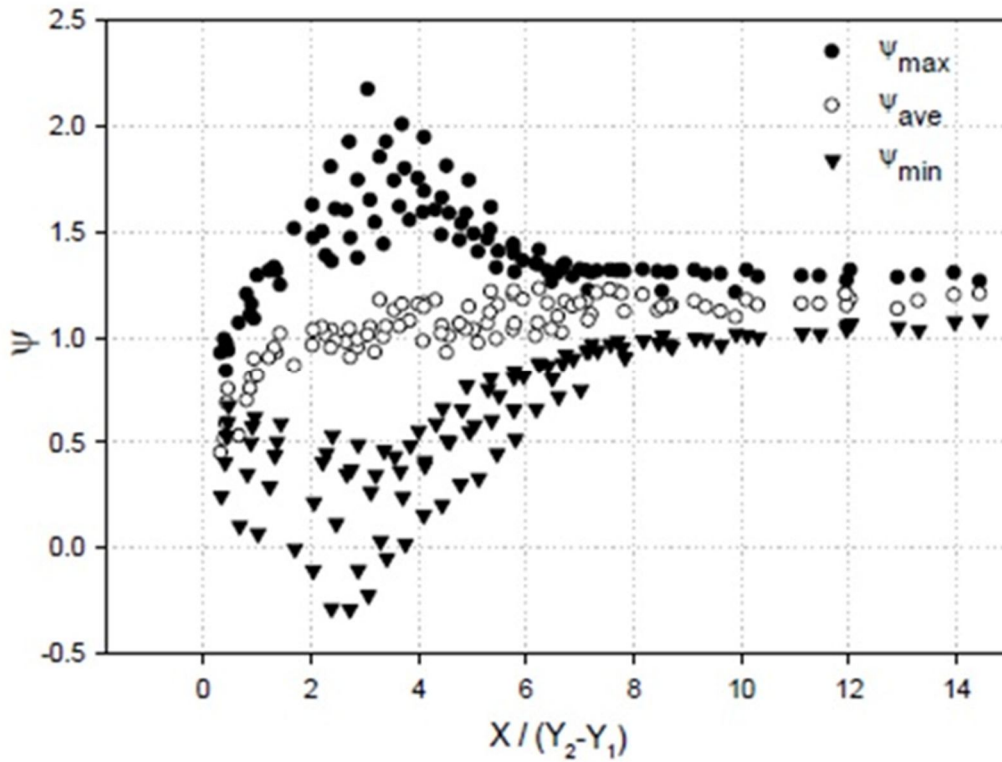
ضریب بدون بعد فشار متوسط نسبت به پرش کلاسیک افزایش یافته است.

تاکنون بیشتر مطالعات تنها به تجزیه و تحلیل توزیع نوسانات فشار برای مقادیر متوسط می‌پردازد در حالی که آگاهی از مقادیر حدی فشار می‌تواند در درک بهتری از اتلاف انرژی که در داخل پرش رخ می‌دهد موثر باشد. در این مطالعه علاوه بر توزیع فشار متوسط، توزیع فشارهای ماکزیمم و مینیمم نیز مورد توجه قرار گرفته است. به این ترتیب ضریب بدون بعد فشار ماکزیمم و مینیمم در طول پرش مطابق روابط زیر محاسبه و در شکل ۷ ترسیم شده است.

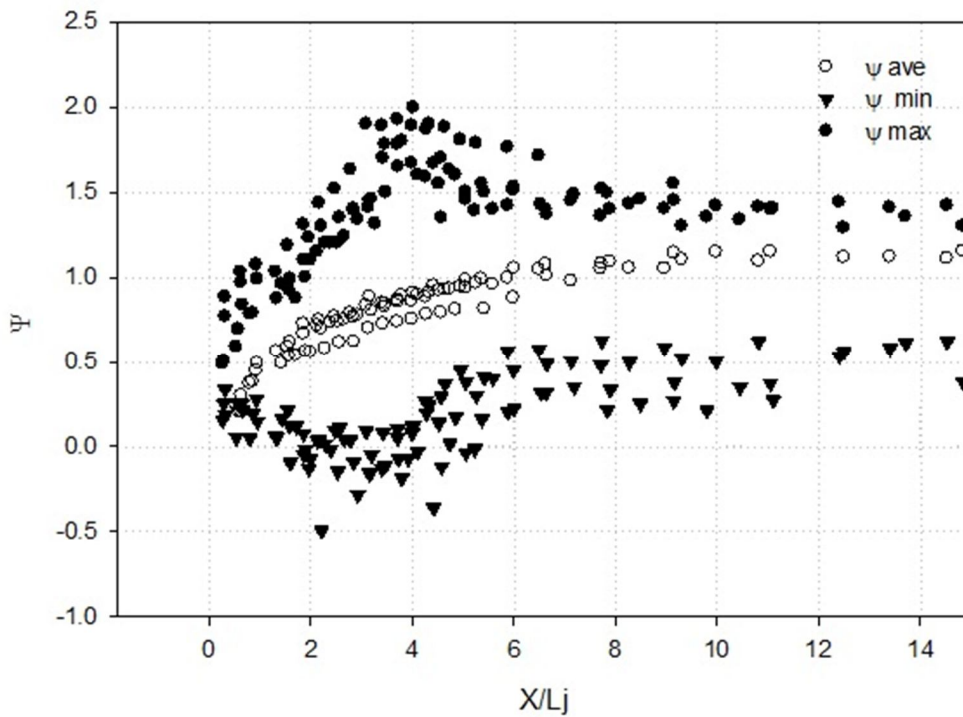
$$\Psi_{\max} = \frac{P_{\max} - Y_1}{(Y_2 - Y_1)} = f\left(\frac{X}{Y_2 - Y_1}\right) \quad (12)$$

$$\Psi_{\min} = \frac{P_{\min} - Y_1}{(Y_2 - Y_1)} = f\left(\frac{X}{Y_2 - Y_1}\right) \quad (13)$$

در شکل ۶ علاوه بر توزیع طولی نوسانات فشار متوسط برای پرش در مقطع واگرایی زبر، نتایج Teixeira (۲۰۰۳) برای پرش هیدرولیکی کلاسیک نیز ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در مقطع واگرایی زبر تغییرات فشار هیدرودینامیکی متوسط در پرش هیدرولیکی، در موقعیت نسبی  $X / (Y_2 - Y_1) = 10$  تقریباً ثابت شده است. Marques و همکاران (۱۹۷۷) و Teixeira (۲۰۰۳) در مطالعات خود برای پرش کلاسیک، نشان دادند که موقعیت نسبی نوسانات فشار در فاصله  $X / (Y_2 - Y_1) = 8$  ثابت می‌گردد. همچنین ضریب بدون بعد ( $\Psi$ ) در پرش واگرایی زبر نسبت به پرش کلاسیک افزایش یافته است. دلیل این افزایش را می‌توان به علت کاهش عمق ثانویه پرش در مقطع واگرایی زبر بیان کرد. بر اساس مطالعات شفافی بجستان و نیسی (۲۰۱۴) در پرش واگرایی ناگهانی زبر عمق مزدوج پرش حدود ۵۳ درصد نسبت به پرش کلاسیک کاهش می‌یابد. به همین دلیل با کاهش مقدار اختلاف بین اعماق مزدوج مقدار



شکل ۷. توزیع طولی فشار متوسط، ماکزیمم و مینیمم در پرش واگرای ناگهانی با بستر زبر به ازای عدد فرود بین ۴/۶ تا ۹/۲

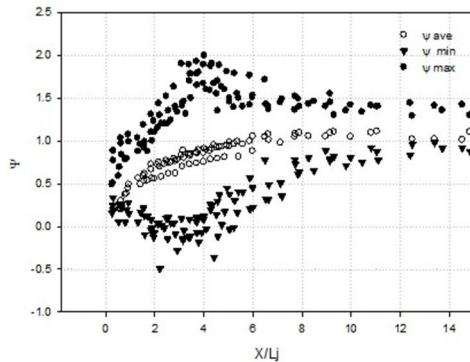


شکل ۸. توزیع طولی فشار متوسط، ماکزیمم و مینیمم در پرش واگرای ناگهانی با بستر صاف به ازای عدد فرود بین ۴/۰ تا ۸/۵

از اهمیت زیادی برخوردار است. با توجه به شکل (۷) و (۸) مشاهده می‌شود که در یک بستر زبر واگرا مقادیر فشار

تعیین مقادیر حدی فشارهای هیدرودینامیکی در پرش هیدرولیکی، به منظور بهینه‌سازی طراحی حوضچه آرامش

با استهلاك انرژی در انتهای پرش شدت آن کاهش می‌یابد.



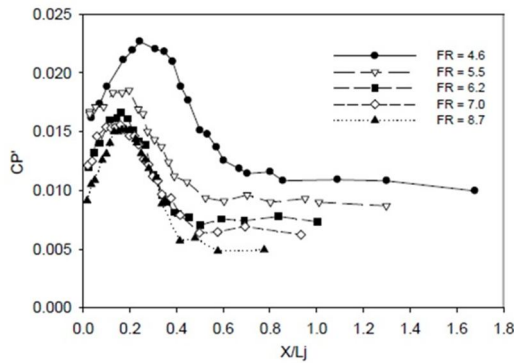
شکل ۹. توزیع طول ضریب بدون بعد نوسانات فشار در مقطع واگرایی زبر

به منظور تعیین اثرات زبری در بستر پرش هیدرولیکی در میزان کاهش ضریب بدون بعد  $\Omega$ ، نتایج حاصل از پرش واگرایی صاف و نتیجه مطالعات Teixeira (۲۰۰۳) در شکل ۱۰ ترسیم شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد وجود زبری در زیر پرش به میزان قابل ملاحظه ای مقدار این ضریب را کاهش داده است. به طوری که مقدار حداکثر آن ( $\Omega_{max}$ ) برای پرش واگرایی زبر برابر با ۰/۱۲ و در پرش واگرایی صاف برابر با ۰/۶۲ می‌باشد. همچنین مطابق مطالعات Teixeira (۲۰۰۳) حداکثر مقدار این ضریب ( $\Omega_{max}$ ) در پرش کلاسیک برابر با ۰/۷ که در فاصله  $X/(Y_2 - Y_1) = 1.8$  رخ داده است. وجود زبری‌ها در پرش واگرا سبب شده تا ضریب بدون بعد ( $\Omega_{max}$ ) تقریباً ۸۱ درصد نسبت به پرش واگرایی صاف و ۸۳ درصد نسبت به پرش کلاسیک کاهش یابد.

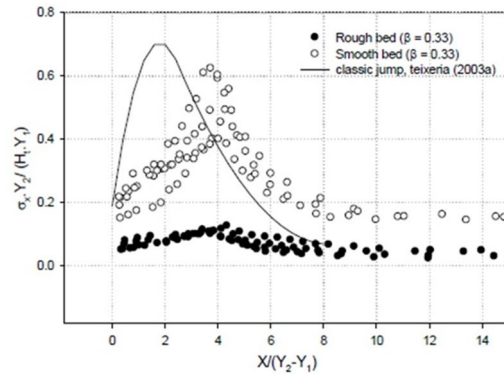
ماکزیمم می‌تواند تا حدود ۲ برابر بیشتر از مقدار فشار میانگین گردد. در بستر صاف نیز نتیجه مشابه مشاهده شده است. علاوه بر این مشاهده می‌شود که ضریب  $\Psi_{min}$  در کف حوضچه آرامش در محدوده  $1.7 \leq X/(Y_2 - Y_1) \leq 3.7$  منفی شده است. در حالی که در بستر واگرایی صاف این ضریب در طول بیشتری کسترش یافته و در محدوده  $1.6 \leq X/(Y_2 - Y_1) \leq 5.2$  منفی است. و در صورتی که جریان دارای شدت و مدت زمان کافی باشد ممکن است سبب ایجاد پدیده کاویتاسیون و تخریب دال گردد.

### توزیع طولی ضریب بدون بعد ( $\Omega$ )

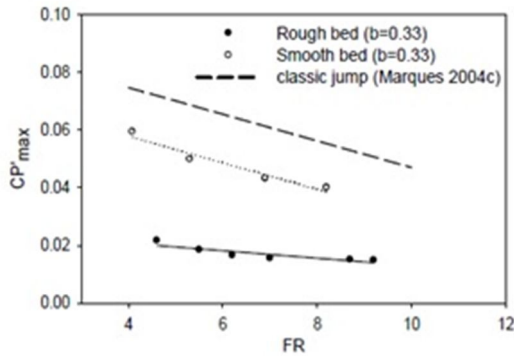
تغییرات نوسانات فشار در زیر پرش هیدرولیکی با افت فشار مرتبط می‌باشد. به منظور بررسی توزیع طولی نوسانات فشار رابطه بدون بعد ۳ که توسط Marques و همکاران (۱۹۹۷) ارائه شده، به کار رفته است. در این رابطه پارامتر  $\sigma_x / H_f$  نشان دهنده میزان افت نسبی انرژی موضعی و همچنین نسبت اعماق مزدوج ( $Y_2 / Y_1$ ) بر اساس رابطه بلانگر تابعی از عدد فرود ( $Fr_1$ ) جریان می‌باشد. به این ترتیب تغییرات نوسانات فشار در طول پرش واگرایی زبر بر اساس رابطه ۳ محاسبه و در شکل ۹ ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود رفتار کلی تغییرات ضریب  $\Omega$  به این صورت است که در ابتدا مقدار آن شروع به افزایش نموده تا اینکه در فاصله  $X/(Y_2 - Y_1) = 3.8$  به مقدار حداکثر خود می‌رسد. سپس منحنی سیر نزولی داشته تا اینکه به مقدار ثابتی نزدیک می‌شود. بر اساس مطالعات Marques و همکاران (۱۹۹۷) حداکثر نوسانات فشار در پرش کلاسیک در فاصله بدون بعد  $X/(Y_2 - Y_1) = 1.75$  رخ می‌دهد. علت روند این تغییرات را می‌توان در مکانیزم تشکیل گردابه‌های متلاطم و استهلاك آن در طول پرش دانست. در واقع شدت نوسانات ناشی از گردابه‌های تلاطمی در فاصله  $X/(Y_2 - Y_1) = 3.8$  حداکثر شده و



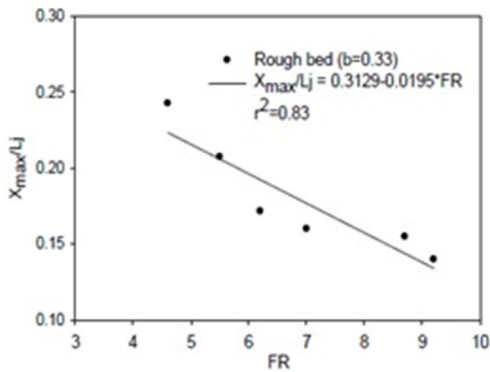
شکل ۱۱. تغییرات طولی ضریب  $C_p'$  برای بستر زبر با نسبت واگرایی  $\beta = 0.33$



شکل ۱۰. ضریب بدون بعد نوسانات فشار در پرش واگرایی زبر، پرش واگرایی صاف و پرش آزاد صاف



شکل ۱۲. تغییرات حداکثر ضریب انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار نسبت به عدد فرود اولیه



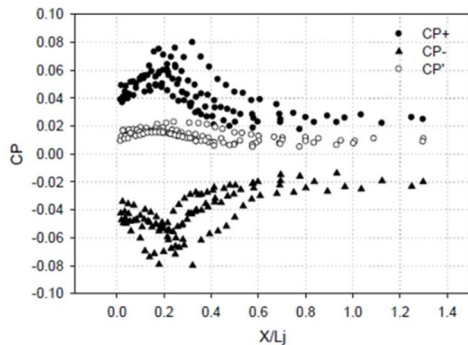
شکل ۱۳. موقعیت وقوع حداکثر ضریب نوسانات فشار نسبت به عدد فرود اولیه

با توجه به اینکه در طراحی حوضچه آرامش حداکثر ضریب انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار ( $C'p_{max}$ ) مورد توجه می‌باشد لازم است تغییرات آن نسبت به عدد فرود مورد بررسی قرار گیرد. به این ترتیب در شکل (۱۲) تغییرات ضریب ( $C'p_{max}$ ) نسبت به عدد فرود اولیه برای بستر زبر و صاف با نسبت واگرایی  $0.33$  ترسیم شده

ضرایب بدون بعد  $C_p^+$ ،  $C_p^-$  و  $C_p'$

به منظور طراحی ضخامت دال کف حوضچه تعیین ضرایب بدون بعد  $C_p^+$ ،  $C_p^-$  و  $C_p'$  برای شرایط هیدرولیکی و هندسه حوضچه ضروری می‌باشد. به این ترتیب تغییرات ضریب بدون بعد انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار ( $C_p'$ ) بر اساس رابطه ۱ به ازای اعداد فرود مختلف جریان برای پرش واگرایی زبر محاسبه و در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در این شکل محور عمودی نشان دهنده ضریب بدون بعد انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار در مقطع واگرایی زبر و محور افقی نسبت فاصله محل اندازه گیری فشار از موقعیت شروع مقطع واگرا به طول پرش می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین مقدار ( $C_p'$ ) در پایین دست درجه برابر با  $0.23$  می‌باشد که در عدد فرود نزدیک به  $4/5$  رخ داده است و با افزایش عدد فرود جریان ضریب ( $C_p'$ ) کاهش می‌یابد. البته این به این معنا نیست که با افزایش عدد فرود نوسانات فشار کاهش می‌یابد. بلکه کاهش مقدار  $C_p'$  با افزایش عدد فرود مشخص کننده این حقیقت است که در پرش واگرایی زبر با افزایش دبی رشد انرژی سرعتی ( $v^2/2g$ ) بیشتر از رشد شدت نوسانات فشار ( $\sigma_x$ ) است.

می‌باشد که در محدوده  $0.15 \leq X/L_j \leq 0.3$  رخ داده است.



شکل ۱۴. ضرایب بدون بعد  $C_p^+$ ،  $C_p^-$  و  $C_p^*$  در بستر واگرایی زبر

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق ویژگی‌های هیدرودینامیکی پرش هیدرولیکی در بستر زبر در مقطع واگرایی ناگهانی با نسبت واگرایی ۰/۳۳ مورد مطالعه قرار گرفت که نتایج زیر از آن حاصل شد. ماکزیمم انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار ( $\sigma_{\max}$ ) در بستر زبر واگرا حدود ۶۰ درصد نسبت به بستر صاف واگرا کاهش یافته است. بر اساس پارمترهای بدون بعد تعریف شده توسط Marques و همکاران (۱۹۹۷) موقعیت نقاط مهم در طول پرش قابل پیش بینی می‌باشد. به طوری که طول حداکثر نوسانات فشار ( $L_{\sigma_{\max}}$ ) در فاصله  $X/(Y_2 - Y_1) \approx 3.8$  و طول پرش ( $L_j$ ) در فاصله  $X/(Y_2 - Y_1) \approx 10$  رخ می‌دهد. در یک بستر زبر واگرا ضریب بدون بعد فشار ماکزیمم ( $\Psi_{\max}$ ) می‌تواند تا حدود ۲ برابر بیشتر از ضریب بدون بعد فشار میانگین ( $\Psi_{ave}$ ) گردد. و امکان وقوع پدیده کاویتاسیون در محدوده  $1.7 \leq X/(Y_2 - Y_1) \leq 3.7$  وجود دارد. حداکثر ضریب بدون بعد نوسانات فشار ( $\Omega_{\max}$ ) برای پرش واگرایی زبر برابر با ۰/۱۲ و در پرش واگرایی صاف برابر با ۰/۶۲ می‌باشد. حضور زبری‌ها در پرش واگرا سبب شده تا ضریب بدون بعد ( $\Omega_{\max}$ ) تقریباً ۸۱ درصد نسبت به پرش واگرایی صاف و ۸۳ درصد نسبت به پرش کلاسیک کاهش یابد. بیشترین مقدار ( $C_p$ ) در پایین دست دریاچه برابر با ۰/۰۲۳ می‌باشد که در ابتدای پرش

است. همچنین در این شکل نتایج حاصل از تحقیقات Marques و همکاران (۲۰۰۴) برای پرش هیدرولیکی کلاسیک نیز ترسیم شده است. همانطور که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود همواره با افزایش عدد فرود اولیه ضریب  $C_p^{\max}$  کاهش می‌یابد. این نتیجه توسط محققین مختلف تایید شده است. این امر به این معنا نیست که با افزایش عدد فرود اولیه پرش از شدت نوسانات فشار ( $\sigma$ ) کاسته می‌شود، بلکه به این دلیل است که با افزایش عدد فرود، رشد انرژی جنبشی ( $V_1^2/2g$ ) بیشتر از رشد شدت نوسانات فشار می‌باشد. همچنین ملاحظه می‌گردد که ایجاد زبری و واگرایی در بستر حوضچه سبب کاهش ضریب ( $C_p^{\max}$ ) نسبت به پرش کلاسیک می‌شود. به طوری که حضور زبری در مقطع واگرایی ناگهانی، ضریب  $C_p^{\max}$  را تقریباً ۵۳ درصد نسبت به پرش واگرایی صاف و ۷۰ درصد نسبت به پرش کلاسیک کاهش می‌دهد.

شکل ۱۳ موقعیت وقوع مقدار حداکثر ضریب بدون بعد نوسانات فشار را نسبت به عدد فرود نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد حداکثر نوسانات فشار در ابتدای پرش و در محدوده ۲۵ درصد از طول پرش رخ می‌دهد.

در شکل ۱۴ ضریب بدون بعد فشارهای حدی ماکزیمم و مینیمم ( $C_p^+$  و  $C_p^-$ ) و انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار ( $C_p'$ ) برای بستر زبر با واگرایی برابر با ۰/۳۳ بر اساس روابط ۹ و ۱۰ ترسیم شده است. ضریب  $C_p^+$  بیان کننده اختلاف فشارهای حداکثر از فشار متوسط می‌باشد. این ضریب بیان کننده میزان اثرات ضربات ناشی از نوسانات فشار بر کف حوضچه آرامش می‌باشد. ضریب ( $C_p^-$ ) بیان کننده اختلاف فشارهای منفی نسبت به فشار متوسط است و یکی از پارمترهای مهم در ارزیابی اثرات نیروهای برگشت در زیر دال می‌باشد. به ویژه در خصوص میزان تمایل به ایجاد کاویتاسیون ناشی از نوسانات فشار، بسیار مورد توجه می‌باشد. در این تحقیق برای پرش واگرایی زبر حداکثر مقدار  $C_p^+$  برابر با ۰/۰۷۹۸ و حداکثر قدر مطلق ضریب ( $C_p^-$ ) برابر با ۰/۰۸

- Modeling of Civil Eng. Struc. Englang: 87-96.
- Armenio, V., et al. (2000). On the Effect of a Negative Step in Pressure Fluctuations at the Bottom of a Hydraulic Jump. *Journal of Hydraulic Research* 38(5): 610-619.
- Alhamid, A.A. (1882). S-jump characteristics on sloping basins. *Journal of Hydraulic research*.
- Bowers, C. E. and J. W. Toso (1987). Karnafuli project, model studies of spillway damage. *Journal of Hydraulic Engineering*. 114(5): 469-483.
- Bremen, R. and W. H. Hager (1993). T-jump in abruptly expanding channel. *Journal of Hydraulic Research*. 31(1): 61-78.
- Carolo F.G., Ferro, V. and Pam Palone, V. (2007). Hydraulic jumps on rough beds. *J. of Hydraulic Engineering ASCE*. 133(9): 989-999.
- Farhodi, J. and S. M. Sadat-Helbar (2010). " Pressure Fluctuation around Chute Blocks of SAF Stilling Basins." *Journal of Agricultural Science and Technology* 12: 203-212.
- Fiorotto, V. and A. Rinaldo (1992a). Fluctuation uplift and lining design in spilway stilling basins *Journal of Hydraulic Engineering*. 118(4): 578-596.
- Fiorotto, V. and A. Rinaldo (1992b). Turbulent pressure fluctuations under hydraulic jumps. *Jornal of hydraulic research*. 30(4): 499-520.
- LOPARDO, R. A. and R. E. HENNING (1985). Experimental advances on pressure fluctuations beneath hydraulic jumps. *Proceedings of the 21st IAHR Congress, Melbourne, Australia*. 3: 633-638.
- Lopardo, R. A. and H. G. Solari (1980). Pressure fluctuations beneath free hydraulic jump. *Proc. 9th Congress of the Latin American Hydraulica, International Association of Hydraulic Research*. 1: 77-89.
- MARQUES, M. G., et al. (2004a). Análise da macroturbulência em estruturas de dissipação de energia através do estudo de variação de pressões e níveis. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre*. 9: 127-153.
- MARQUES, M. G., et al. (1997). " Flutuação de Pressão em um Ressonância Hidráulico." *Revista Brasileira de Recursos Hídricos Porto Alegre* 2(2): 45-52.
- در فاصله ۲۵ درصد از طول پرش و در عدد فرود نزدیک به  $4/5$  رخ داده است و حضور زبری در مقطع واگرایی ناگهانی، ضریب  $(C'p_{max})$  را تقریباً ۵۳ درصد نسبت به پرش واگرایی صاف و ۷۰ درصد نسبت به پرش کلاسیک کاهش داده است. حداکثر ضرایب بدون بعد  $Cp^+$ ،  $C'p$  و  $|Cp^-|$  در یک مقطع واگرایی زبر به ترتیب برابر با  $0/۰۲۳$ ،  $0/۰۷۹۸$  و  $0/۰۸$  می‌باشد. که در ابتدای پرش و در محدوده  $0.15 \leq X/L_j \leq 0.3$  رخ می‌دهد.
- ### فهرست منابع
- آریان فر، ع.، شفافی بجستان، م.، خسروجرودی، ا. و بابازاده، ح. ۱۳۹۲. بررسی آزمایشگاهی تأثیر ذرات رسوبی و هندسی ورودی و خروجی بر راندمان حوضچه‌های تله اندازی رسوب. حفاظت منابع آب و خاک، ۳(۱): ۱-۱۷.
- الله دادی، ک. کاظمیان زاده، ا. و شفافی بجستان، م. ۱۳۸۷. بررسی آزمایشگاهی تأثیر ارتفاع زبری بر نسبت اعماق مزدوج و طول غلطابی پرش هیدرولیکی در حوضچه های آرامش. سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه تبریز، ایران
- کاظمیان زاده، ا. و شفافی بجستان، م. ۱۳۸۷. بررسی آزمایشگاهی نحوه آرایش زبری‌ها بر مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش. پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد سازه‌های آبی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات خوزستان. ۱۹۶ص.
- شفافی بجستان، م. و نیسی، ک. ۱۳۸۷. تأثیر شکل زبری بستر بر طول پرش هیدرولیکی در کانال‌های مستطیلی. مجله هیدرولیک، انجمن هیدرولیک ایران، ۳(۳): ۴۰-۲۹.
- Abdul Khader, M. H. and K. Elango (1974). Turbulent pressure field beneath a hydraulic jump. *Journal of hydraulic research*. 12(4): 469-489.
- AKBARI, M. E., et al. (1982). Pressure fluctuations on the floor of free and forced hydraulic jumps. *Conf. On the Hydraulic*

Toso, J. and E. C. Bowers (1988). Extreme pressure in hydraulic jump stilling basin. *Journal of Hydraulic Engineering*. 114: 829-843.

Vasiliev, O. F. and V. I. Bukreyev (1967). "Statistical characteristics of pressures fluctuations in the region of hydraulic jump." *proc., 12th Congr. Int. Assoc. of Hydro. Res., Fort Collins, Colo* 2: 1-8.

Nasr Esfahani, M. J. and M. Shafai Bejestan (2012). Design of Stilling Basins using Artificial Roughness. *Journal of Civil Engineering and Urbanism*. 2: 159-163.

Nasr Esfahani, M.J and Shafai Bajestan, M. (2012), Hydraulic jump characteristics at an abrupt drop under influence of artificial roughness. *Journal of Water and Soil*. 26(4).

Peterka, A.J. (1978). Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators. USBR. *Engineering Monograph No.13*.



## The effect of roughness in pressure fluctuations in the stilling basin with sudden expansion

Mahnaz Karimi<sup>1</sup>, Seyed Habib Musavi Jahromi<sup>2\*</sup> and Mahmood Shafai-Bajestan<sup>3</sup>

1) Ph.D Student, Faculty of Water Science Engineering, Shahid Chamran University, Iran

2\*) Professor, Faculty of Water Science Engineering, Shahid Chamran University, Iran

\*Corresponding author email: [dr\\_hmusavi@yahoo.com](mailto:dr_hmusavi@yahoo.com)

3) Professor, Faculty of Water Science Engineering, Shahid Chamran University, Iran

Received: 21-06-2013

Accepted: 02-07-2014

### Abstract

Stilling basins with sudden expansions are one of the energy dissipater structures. This structure has many applications downstream of hydraulic structures, such as spillways, sluice gates and chutes. In the jump, the pressure fluctuations resulting from intense macro-scale turbulence must be carefully considered during the design of the structure. Roughness can also cause changes in the behavior of stream line and vortices. So far its effects on the hydrodynamic characteristics of the jump have not been studied. In this study many tests are conducted in a relatively large flume size of 0.8 meter wide and 12 meter length. Channel expansions ratio ( $B1/B2$ ) was 0.33 and data are presented for Froude numbers from 4-9.2. Measurements were conducted in the bed of flume by means of pressure transducers systems. The final results of this study show that roughness decreases Intensity of fluctuating pressure in sudden expansion stilling basin. Test results were compared with those of smooth sudden expansion jump and classical jump which indicates that the peak values of RMS dimensionless pressure fluctuations ( $C_p'$ ), are 53% lower than smooth sudden expansion jump and are reduced 70% compared with classical jump. Intensity of fluctuating pressure at the position of about  $(0.15-0.3) L_j$ , can reach the maximal value. Peak values of RMS dimensionless pressure fluctuations  $C_{p\max}'$  up to 0.023 and maximum positive (negative) deviation  $C_{p+}$  and  $C_{p-}$  values up to 0.08 were obtained. In addition to dimensionless coefficients of pressure fluctuations, the longitudinal distribution of pressures and determined pressure fluctuations and extreme values occurring during flow are obtained.

**Keywords:** fluctuating pressure; hydraulic jump; rough bed; stilling basin; sudden expansion