

## بررسی تغییرات فشار در بستر حوضچه‌های آرامش

کامران یوسفی<sup>۱</sup>، حسین بانزاد<sup>۲</sup>، مجید حیدری<sup>۳\*</sup> و مهناز کریمی<sup>۴</sup>

۱ و ۳- به ترتیب: دانشجوی دکتری؛ و استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

۴- دانش آموخته دکتری سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۰/۴، تاریخ پذیرش: ۹۷/۳/۲۲

### چکیده

حوضچه آرامش از جمله سازه‌های مستهلک کننده انرژی است که در پایین دست سرریزها، دریچه‌ها و تنداب‌ها کاربرد فراوانی دارد. استهلاک انرژی در پرش هیدرولیکی در نتیجه گرداب‌های تلاطمی بزرگ مقیاس می‌باشد که با نوسانات شدید فشار همراه است و باید در طراحی حوضچه به آن توجه کرد. در این مطالعه، آزمایش‌ها در یک فلوم با مقطع مستطیلی به عرض ۳/۰ متر و ارتفاع دیواره‌ها ۴/۰ متر و در محدوده اعداد فرود بین ۳ تا ۱۲ اجرا شده است. تغییرات فشار در بستر فلوم با دستگاه ترانسدیوسر (مبدل) فشار و ارتفاع آب نیز با پیژومترهایی در کف فلوم ثبت شد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که شدت نوسانات فشار در پرش هیدرولیکی وابسته به عدد فرود و موقعیت نسبی از پنجه پرش است. ماکزیمم ضریب شدت نوسانات فشار  $C_p^{\max}$  در زیر پرش هیدرولیکی از ۰/۰۸ تا ۰/۲۸ متغیر است که در فاصله ۱۷ تا ۳۳ درصد از طول پرش رخ داده است. حداکثر مقدار  $C_p^+$  برابر با ۲ و حداکثر قدر مطلق ضریب ( $C_p^-$ ) برابر با ۱/۲ است که در محدوده  $X/L_j \leq 0.4$  رخ داده است. علاوه بر ضرایب بدون بعد نوسانات فشار، توزیع طولی فشار تعیین شده و مقادیر بحرانی در طول پرش به دست آمده است.

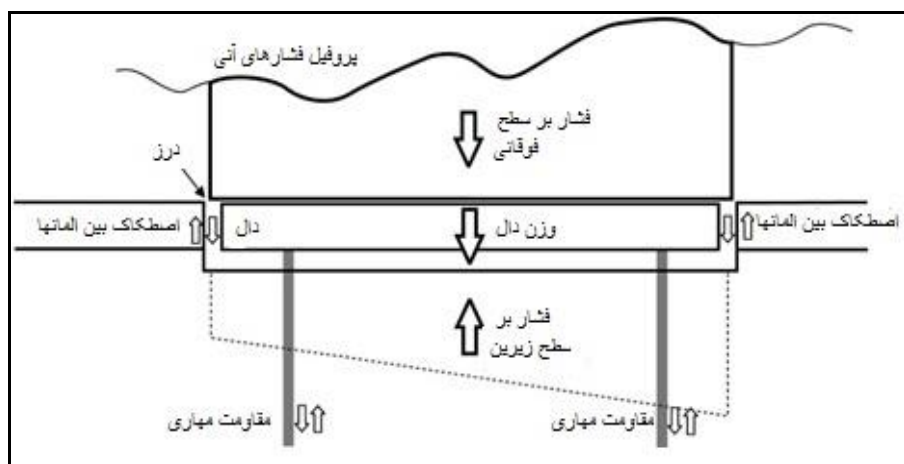
### واژه‌های کلیدی

آنالیز ابعادی، پرش هیدرولیکی، ترانسدیوسر، عدد فرود، نوسانات فشار

### مقدمه

اندازد. در طراحی حوضچه آرامش، اثر نیروهای نوسانی ناشی از تلاطم در پرش می‌تواند قابل توجه باشد و باید در طراحی حوضچه آرامش به آن توجه شود. تغییرات فشار می‌تواند ناشی از تغییرات مؤلفه قائم سرعت در بستر و همچنین تغییرات عمق آب ناشی از پرش هیدرولیکی باشد. نیروهای مؤثر ناشی از جریان روی دال کف تابع اندازه دال، موقعیت و ابعاد درزها، توزیع فشار و همچنین ویژگی‌های خاک، فونداسیون و زهکش هستند. در شکل ۱، نیروهای مؤثر بر دال نشان داده شده است.

پرش هیدرولیکی از جمله روش‌های استهلاک انرژی جنبشی آب در پایین دست سازه‌هایی چون دریچه‌ها، سرریزها و تنداب‌هاست که به منظور کنترل آن از سازه‌ای به نام حوضچه آرامش استفاده می‌شود. استهلاک انرژی و تلاطم جریان در حوضچه‌های آرامش با نوسانات شدید فشار همراه است که می‌تواند باعث ایجاد ارتعاش، فرسایش و حفره در دال کف و حتی فرسایش بیش از حد در پایین دست و بستر رودخانه شود و امنیت سازه را به خطر



شکل ۱- تصویر شماتیک نیروهای مؤثر بر دال کف حوضچه آرامش

میزان واقعی نیروهای وارد بر حوضچه آرامش و در نتیجه طراحی ایمن تر این سازه امکان پذیر نبود به طوری که بیشتر محققان با استفاده از سرعت و فشار متوسط روش‌هایی برای طراحی دال کف حوضچه ارائه کرده‌اند که در آنها به شرایط حداکثر بارگذاری کمتر توجه شده است. با پیشرفت تکنولوژی و امکان اندازه‌گیری فشارهای لحظه‌ای با دستگاه ترانسدیوسر (مبدل) فشار، این امکان برای محققان فراهم شده تا بتوانند نیروهای هیدرودینامیکی را در پرش هیدرولیکی محاسبه و آثار این نیروها را در پدیده‌هایی مانند کاویتاسیون در حوضچه آرامش و شکست دال کف و بررسی کنند.

موضوع مشخصات هیدرودینامیکی و نوسانات فشار در پرش هیدرولیکی پس از حادثه تخریب‌های ایجاد شده در حوضچه آرامش سد کارنافولی<sup>۱</sup> در بنگلادش و مالپاسو در مکزیک به شکلی بارز مشهود گردید. نوسانات فشار در این حوضچه‌ها به زیر دال‌های بتنی منتقل شده و نوساناتی در نیروی برکنش ایجاد کرده تا آنجا که به خرابی‌های عظیمی در سرریز و حوضچه‌های آرامش آنها انجامیده است (Bowers & Toso, 1987). عبدالقادر و الانگو (Abdul Lopardo & Elango, 1974)، لوپاردو و سولاری (Lopardo & Solari, 1980)، اکبری و همکاران (Akbari et al., 1982) شدت نوسانات فشار را با استفاده از ضریب بدون

جابه‌جایی دال در سراسر عمر پروژه باید برابر با صفر باشد و برای تحقق این امر لازم است معیار نسبت نیروهای مقاوم به نیروهای مخرب طوری باشد که امکان جابه‌جایی در لبه‌های دال وجود نداشته باشد. ارزیابی دقیق مقدار هر یک از نیروهای وارد بر دال اهمیت بسیاری دارد. نیروهای وارد بر دال به سه گروه تقسیم می‌شوند: الف) نیروهای مقاوم ناشی از عناصر سازه‌ای؛ وابسته به مشخصات دال و پی حوضچه، ب) نیروی ناشی از جریان (فشار وارد بر دال کف حوضچه)؛ وابسته به مشخصات هیدرولیکی جریان و ج) نیروی ناشی از انتشار فشار در زیر دال؛ وابسته به جریان روی حوضچه و برخی از مشخصات حوضچه مانند موقعیت و اندازه ترک‌ها.

در خصوص نیروهای زیرفشار، محققان بر این باورند که نیروی زیرفشار وابسته به نوسانات فشار روی دال باشد. وجود ترک یا درزهایی در بدنه دال سبب انتشار فشار و ایجاد نیرویی مخرب در جهت ناپایداری حوضچه می‌شود. احتمال اینکه نوسانات فشار از طریق سیستم زهکشی به زیر دال‌های کف حوضچه منتقل شوند در مطالعات باورز و توسو (Bowers & Toso, 1987) دیده شده است. از این رو در این تحقیق توزیع فشارهای آبی بر بستر حوضچه آرامش بررسی می‌شود. تا زمانی که امکان اندازه‌گیری نوسانات فشار برای محققان وجود نداشت، دانش کافی از

1- Karnafuli Dam

پرش روابط بدون بعد ۲ و ۳ ارائه شده است (Marques et al., 1997):

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

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

که در آنها،

$p_x$  = 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 نوسانات فشار؛ و  $H_t$  = افت فشار. پارامتر  $X/(Y_2 - Y_1)$  بیانگر موقعیت نسبی جریان از پنجه پرش است که با  $\Gamma$  نشان داده می‌شود. پارامتر  $(P_x - Y_1)/(Y_2 - Y_1)$  بیانگر توزیع فشار متوسط در طول پرش و با  $\Psi$  نشان داده می‌شود و پارامتر  $\Omega$  توزیع شدت نوسانات فشار است.

خصوصیات متوسط جریان در بستر پرش هیدرولیکی به‌طور گسترده مطالعه شده اما به خصوصیات لحظه‌ای (نوسانی) آن کمتر توجه شده است. بنابراین، هدف این تحقیق مطالعه آزمایشگاهی به‌منظور بررسی نوسانات و تعیین ضرایب تغییرات فشار در بستر حوضچه آرامش واقع در پایین‌دست یک سرریز بلند است.

### مواد و روش‌ها

#### ساختار آزمایشگاهی

در این تحقیق از یک فلوم با مقطع مستطیلی، مطابق شکل‌های ۲ و ۳ استفاده شده است. عرض فلوم ۰/۳ و ارتفاع دیواره‌های آن ۰/۴ متر است. کف فلوم از جنس پلاکسی و دیواره‌های آن از جنس شیشه و طول بخش افقی آن ۳ متر است. به‌منظور ایجاد جریان فوق بحرانی، از

بعد انحراف معیار نوسانات فشار ( $C'_p$ ) به‌صورت رابطه ۱ تعریف کردند:

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

که در آن،

$\sigma$  = انحراف معیار نوسانات فشار؛ و  $V_1$  = سرعت در شروع

تشکیل پرش. نتایج تحقیقات آنها نشان می‌دهد که حداکثر ضریب بدون بعد انحراف معیار نوسانات فشار نزدیک به محل پنجه پرش و تقریباً برابر با ۰/۰۸۵ است.

لوپاردو و سولاری (Lopardo & Solari, 1980) نوسانات

فشار را برای پرش هیدرولیکی در پایین‌دست یک دریچه

برای اعداد فرود بین ۲/۵ تا ۷/۵ اندازه‌گیری کردند و

بیشترین مقدار ضریب  $C'_p$  را برابر با ۰/۰۸۴ به‌دست

آوردند که در عدد فرود ۴/۵ و تقریباً در فاصله ۳۰ درصد

طول پرش واقع شده است. آنها به این نکته اشاره می‌کنند

که در عدد فرود ۴/۵، پرش نوع انتقالی به پرش پایدار

تبدیل می‌شود. همچنین مشخص گردید که با افزایش

عدد فرود جریان مقدار ضریب نوسانات فشار کاهش

می‌یابد و مقادیر حدی نوسانات فشار (حداکثر انحراف

فشار ماکزیمم و مینیمم از فشار میانگین) در شرایط

جریان توسعه‌یافته یا در حال توسعه اختلاف چندانی

ندارد. لوپاردو و هنینگ (Lopardo & Henning, 1985)

تأثیر شرایط ورودی پرش هیدرولیکی به حوضچه را در دو

حالت نصب دریچه و سرریز بررسی کردند و دریافتند که

بیشترین مقدار ضریب  $C'_p$  در پایین‌دست دریچه تقریباً در

عدد فرود ۴/۵ و در پایین‌دست سرریز در عدد فرود ۶/۵

رخ داده است. که این اختلاف به‌دلیل ساختار متفاوت

تشکیل پرش در پایین‌دست دریچه و سرریز است. برای

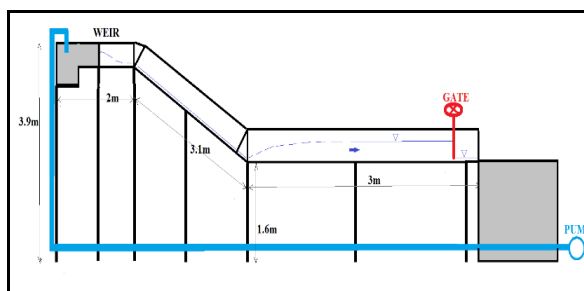
نمایش توزیع طولی فشار متوسط و نوسانات فشار در طول

شد. در کلیه آزمایش‌ها دریچه کشوی پایین‌دست همواره به گونه‌ای تنظیم می‌شد که عمق اولیه پرش در ابتدای حوضچه رخ دهد.

یک سرریز بلند با زاویه ۳۰ درجه در ابتدای فلوم استفاده شده است و برای تشکیل پرش و تثبیت موقعیت پرش نیز یک دریچه کشوی در انتهای حوضچه قرار داده



شکل ۳- نمایی از مدل آزمایشگاهی

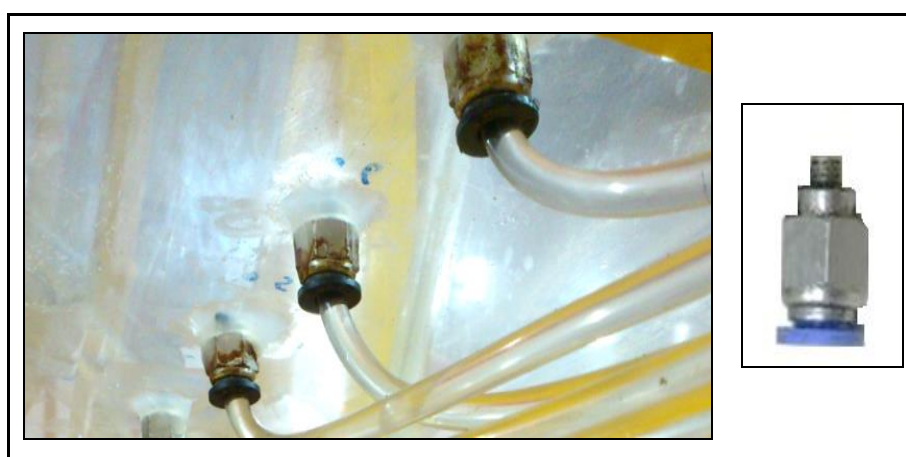


شکل ۲- تصویر شماتیک از مدل آزمایشگاهی

نظر گرفته شد. در ۱۰ نقطه اول، فاصله بین دو نقطه ۶ سانتی‌متر و در ۴ نقطه آخر از ۱۲ تا ۲۴ سانتی‌متر افزایش داده شده است. برای اندازه‌گیری ارتفاع آب، از یک تابلو پیزومتری استفاده شد؛ پیزومترهای موجود روی تابلو با شلنگ به کف حوضچه متصل شده‌اند. برای نصب شلنگ به کف حوضچه نیز از فیتینگ پنوماتیک M5-6 مطابق شکل ۴ استفاده شده است.

#### ابزار و روش اندازه‌گیری

برای اندازه‌گیری تغییرات فشار در بستر جریان، از دستگاه‌های ترانسدیوسر مدل MPXV7007 استفاده شد. به‌منظور واسنجی دستگاه‌ها، فشار ثبت شده با آنها در حالت آب راکد مد نظر قرار گرفت. از محل شروع حوضچه آرامش، به طول ۱/۲۷ متر در خط مرکزی کف فلوم، ۱۴ نقطه برای اندازه‌گیری فشار در



شکل ۴- نحوه اتصال فیتینگ M5-6 در کف فلوم

نصب شده است. شکل ۵، نحوه نصب ترانسدیوسر فشار را به کف فلوم نشان می‌دهد.

به‌منظور اندازه‌گیری تغییرات فشار در بستر و نصب ترانسدیوسرها، در کف فلوم نازل‌هایی از شلنگ نمره ۵



شکل ۵- نحوه اتصال ترانسدیوسر فشار در کف فلوم

پشت سرریز مثلثی و رابطه دبی-اشل به دست آمد و به منظور برداشت عمق ثانویه پرش علاوه بر روش عکس برداری و رقومی کردن عکس‌ها، از متر نواری نصب شده روی فلوم نیز استفاده شد. بر اساس دبی جریان و عمق ثانویه پرش، مقدار سرعت و عمق اولیه پرش در هر یک از آزمایش‌ها محاسبه شده است. محدوده متغیرهای آزمایش به طور خلاصه در جدول ۱ ارائه شده است.

از آنجا که ثابت شده است فرکانس غالب نوسانات فشار در مدل پرش هیدرولیکی کمتر از ۲۵ هرتز است (Akbari *et al.*, 1982; Toso & Bowers, 1988)، در این مطالعه از دیتالاگری با آهنگ نمونه برداری ۱۰۰ هرتز استفاده شده است. به این ترتیب نوسانات فشار در هر ۲۰۰ ثانیه با مبدل فشار اندازه گیری و ثبت گردید. پس از پایدار شدن پرش، مقدار دبی جریان با قرائت رقوم سطح جریان

جدول ۱- محدوده متغیرهای آزمایش

دبی (لیتر بر ثانیه)	عدد فرود	عدد رینولدز	عمق اولیه پرش (سانتی متر)	عمق ثانویه پرش (سانتی متر)
۲۵-۵	۳-۱۲	۸۲۰۰۰ تا ۱۷۰۰۰	۶-۲۷	۱/۴-۲/۱

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (p - \bar{p})^2 dt} \quad (5)$$

که در آنها،

$\bar{p}$  = متوسط زمانی فشار؛  $p$  = مقدار فشار در هر لحظه؛  $T$  = زمان برداشت اطلاعات؛ و  $\sigma$  = انحراف معیار نوسانات فشار در پرش هیدرولیکی. اگر انحراف معیار نوسانات فشار با ارتفاع معادل سرعت ورودی در پرش هیدرولیکی بدون بعد شود، پارامتر مهمی به نام ضریب انحراف معیار نوسانات فشار ( $C'_p$ ) مطابق با رابطه ۱ به دست می آید.

#### روابط تحلیلی و ابعادی

با توجه به اینکه فشار در کف حوضچه آرامش کاملاً دارای نوسانات تصادفی است، تجزیه و تحلیل آن عمدتاً با استفاده از روش‌های آماری خواهد بود. باید توجه داشت که پدیده تصادفی نوسانات فشار در زیر پرش هیدرولیکی پایدار از پدیده‌های تصادفی ساکن به حساب می آید (Lopardo & Henning, 1985). به این ترتیب مقدار متوسط و انحراف معیار نوسانات فشار با استفاده از روابط ۴ و ۵ محاسبه می شود.

$$\bar{p} = \frac{1}{T} \int_0^T p dt \quad (4)$$

اولین پارامتر همان ضریب بدون بعد انحراف معیار نوسانات فشار و دومین پارامتر نسبت اعماق مزدوج پرش است که خود تابعی است از عدد فرود اولیه پرش پارامتر  $X / L_j$  بیانگر موقعیت نسبی از پنجه پرش، پارامتر  $V_1 Y / \nu$  عدد رینولدز و بیانگر میزان تلاطم جریان است؛ در پرش هیدرولیکی، محدوده عدد رینولدز بسیار بالاست و از این رو می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. پارامتر  $V_1 / \sqrt{g Y_1}$  عدد بدون بعد فرود است 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 است (رابطه ۱۰).

$$C'_p = f\left(\frac{X}{L_j}, Fr\right) \quad (10)$$

### نتایج و بحث

#### تغییرات فشار در بستر پرش هیدرولیکی

شکل ۶، نوسانات لحظه‌ای فشار در بستر پرش هیدرولیکی را برای دبی ۱۷ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد. در این شکل، تغییرات فشار با فرکانس ۱۰۰ هرتز در مدت ۱۰ ثانیه در دو موقعیت مختلف با دستگاه ترانسدیوسر فشار ثبت شده است. همان‌طور که اشاره شد، مقادیر فشار در بستر پرش ماهیت تصادفی دارند و مقدار آنها در موقعیت‌های مختلف پرش در هر لحظه متفاوت است. با توجه به ماهیت تصادفی داده‌ها و احتمال خطا در اندازه‌گیری، برای تشخیص داده‌های پرت از آزمون Outlier به روش Grubbs استفاده شده است.

از دیگر پارامترهای بسیار مهم در طراحی دال حوضچه‌های آرامش، اندازه حد نهایی نوسانات فشار است. حد نهایی نوسانات فشار مشخص‌کننده انحراف مقادیر حداکثر و حداقل فشار از فشار میانگین است و مطابق روابط ۶ و ۷ به دست می‌آیند.

$$C_p^+ = (p_{\max} - \bar{p}) / \frac{V_1^2}{2g} \quad (6)$$

$$C_p^- = (p_{\min} - \bar{p}) / \frac{V_1^2}{2g} \quad (7)$$

که در آنها،

$C_p^+ =$  حداکثر انحراف فشار ماکزیمم؛ و  $C_p^- =$  حداکثر انحراف فشار مینیمم از فشار میانگین.

می‌توان استدلال کرد که فشار در بستر حوضچه آرامش تابعی از متغیرهای زیر است (رابطه ۸):

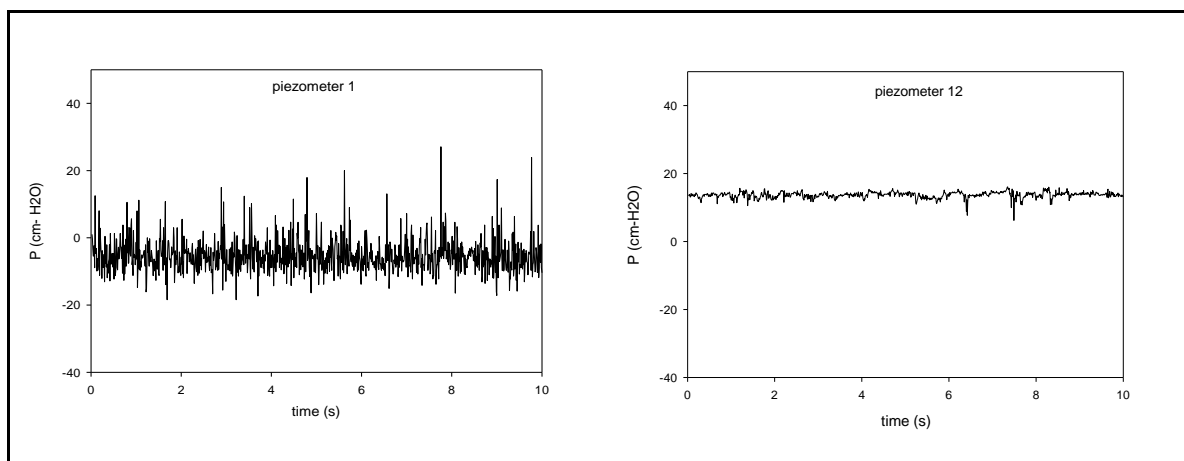
$$f(p', V_1, Y_1, Y_2, X, L_j, \rho_w, \nu, g) = 0 \quad (8)$$

که در آن،

$p' =$  جزء نوسانی فشار برابر با  $(p - \bar{p})$ ؛  $V_1 =$  سرعت اولیه پرش؛  $Y_1 =$  عمق اولیه پرش؛  $Y_2 =$  عمق مزدوج پرش؛  $L_j =$  طول پرش؛  $X =$  موقعیت پیزومترها نسبت به نقطه شروع پرش؛  $U =$  ویسکوزیته آب؛  $\rho =$  وزن مخصوص آب؛ و  $g =$  شتاب ثقل.

با استفاده از آنالیز ابعادی، پارامترهای بدون بعد به صورت زیر محاسبه شده‌اند (رابطه ۹).

$$C'_p = \frac{\sqrt{p'^2}}{V_1^2 / 2g} = f\left(\frac{Y_2}{Y_1}, \frac{X}{L_j}, \frac{V_1 Y}{\nu}, \frac{V_1}{\sqrt{g Y_1}}\right) \quad (9)$$

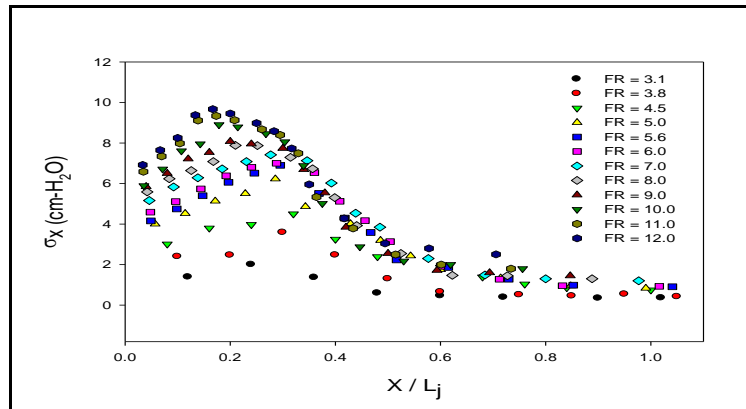


شکل ۶- تغییرات لحظه‌ای ارتفاع آب در پیزومتر شماره ۱ و ۱۲

افزایش عدد فرود جریان ورودی، پرش پایدارتری تشکیل می‌شود و شدت تلاطم در جریان افزایش می‌یابد، در نتیجه گردابه‌های قوی‌تری تشکیل می‌شود که انحراف معیار نوسانات فشار را افزایش می‌دهد. همچنین، مقدار انحراف معیار نوسانات فشار در زیر پرش وابسته به فاصله از پنجه پرش است، به طوری که در ابتدای پرش هیدرولیکی مقدار آن افزایش می‌یابد تا اینکه به یک مقدار ماکزیمم می‌رسد، پس از آن سیر نزولی دارد و در انتهای پرش مقدار آن تقریباً ثابت می‌ماند. 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 تغییرات تلاطم در جریان تقریباً ثابت می‌شود.

تغییرات آبی در شدت نوسانات فشار می‌تواند سبب تشکیل اختلاف پتانسیل لحظه‌ای در بستر جریان شود و این اختلاف پتانسیل می‌تواند سبب تغییر نیروی برخاست، ایجاد خستگی در مصالح و تخریب بتن گردد.

با توجه به حجم زیاد اطلاعات جمع‌آوری شده نوسانات فشار، بررسی مستقیم داده‌ها امکان‌پذیر نبود و به همین دلیل انحراف معیار نوسانات فشار برای اعداد فرود مختلف مطابق با رابطه ۵ محاسبه و در شکل ۷ رسم شده است. انحراف معیار، ملاک مناسبی برای تعریف شدت نوسانات فشار است. در شکل ۷ نشان داده شده که با افزایش عدد فرود جریان ورودی، مقدار انحراف معیار نوسانات فشار افزایش یافته است. با توجه به اینکه استهلاك انرژی در حوضچه آرامش به دلیل تشکیل گردابه‌های تلاطمی در پرش است، می‌توان این گردابه‌ها را علت اصلی ایجاد نوسانات شدید در مقادیر فشار دانست. در حقیقت با

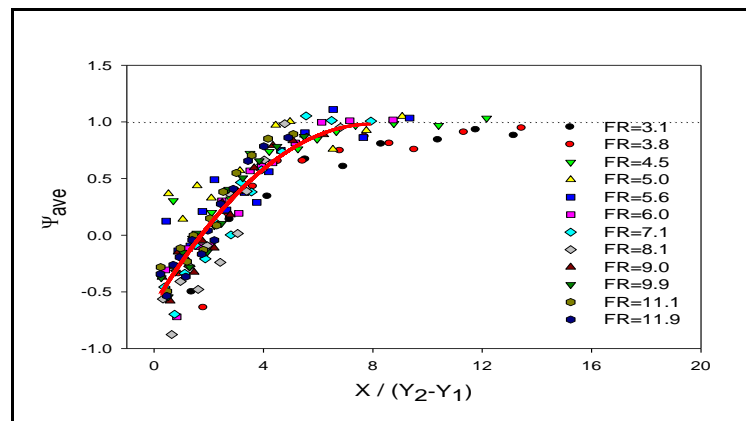


شکل ۷- انحراف معیار نوسانات فشار

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 اعداد فرود مختلف محاسبه و در شکل ۸ رسم شده است. در این شکل، محور افقی و عمودی به ترتیب بیانگر موقعیت نسبی جریان از پنجه پرش و پارامتر بدون بعد فشار متوسط ( $\Psi_{ave}$ ) هستند.

### توزیع طولی مقادیر فشار ( $\Psi$ )

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، مارکز و همکاران (Marques *et al.*, 1997) رابطه ۲ را ارائه دادند. بسیاری از محققان بر این باورند که



شکل ۸- توزیع طولی نوسانات فشار متوسط

استفاده از روش روابط خطی درجه ۲، رابطه ۱۱ بر توزیع فشار متوسط برازش شده است:

$$\Psi_{ave} = -0.0249\Gamma^2 + 0.3986\Gamma - 0.6119, \Gamma \leq 8.0$$

$$Rsqr = 0.8295$$

(۱۱)

همان‌طور که مشاهده می‌شود، توزیع فشار متوسط در پرش هیدرولیکی، در موقعیت نسبی  $X/(Y_2 - Y_1) = 8$  تقریباً ثابت و برابر با یک و بدین معناست که در فاصله  $X = 8(Y_2 - Y_1)$  پرش به پایان رسیده است. همچنین، با

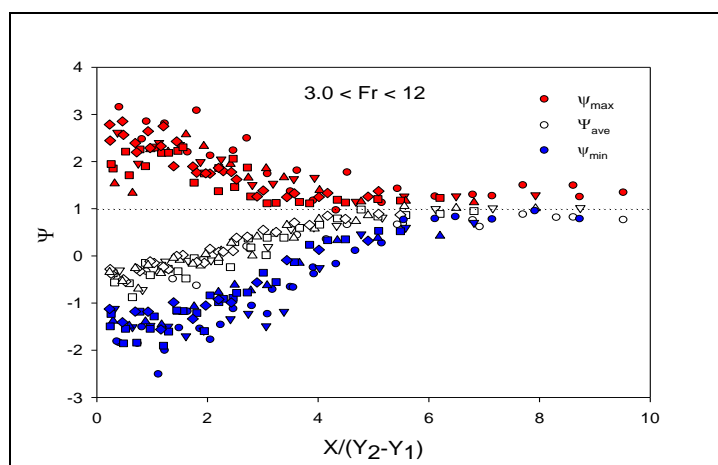


$$\Psi_{\min} = \frac{P_{\min} - Y_1}{(Y_2 - Y_1)} = f\left(\frac{X}{Y_2 - Y_1}\right) \quad (13)$$

در شکل ۹ مشاهده می‌شود که ضریب توزیع فشارهای مینیمم در کف حوضچه آرامش در محدوده  $X \leq 4(Y_2 - Y_1)$  منفی است و بررسی نیروهای برکنش در این بازه اهمیت بیشتری دارد. همچنین، توزیع فشارهای ماکزیمم بیانگر این موضوع است که  $(Y_2 - Y_1) \leq P_{\max} - Y_1 \leq 3(Y_2 - Y_1)$  است.

به‌منظور درک بهتر از تغییرات فشار در زیر پرش هیدرولیکی، 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 ۱۲ و ۱۳ محاسبه و در شکل ۹ رسم شده است.

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



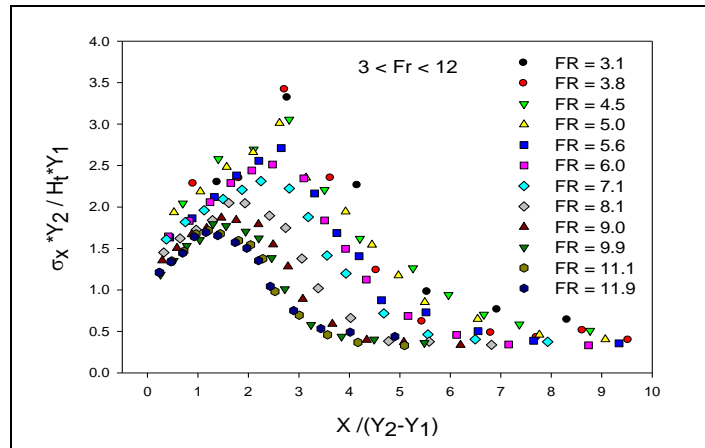
شکل ۹- توزیع طولی فشار متوسط، ماکزیمم و مینیمم در پرش

رفتار کلی تغییرات ضریب  $\Omega$  را می‌توان به این‌صورت توصیف کرد که در ابتدا مقدار آن شروع به افزایش می‌کند و به مقدار حداکثر خود می‌رسد. پس از آن منحنی سیر نزولی دارد تا اینکه به مقداری ثابت نزدیک می‌شود. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد توزیع نوسانات فشار در فاصله بدون بعد  $1.2 \leq X/(Y_2 - Y_1) \leq 2.7$  حداکثر است. 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 این فاصله حداکثر می‌شود و با استهلاك انرژی در انتهای پرش شدت آن کاهش می‌یابد.

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

تغییرات نوسانات فشار در زیر پرش هیدرولیکی با افت فشار مرتبط است. به‌منظور بررسی توزیع طولی نوسانات فشار، رابطه بدون بعد ۳ ارائه شده توسط مارکز و همکاران (Marques *et al.*, 1997) به کار رفته است.

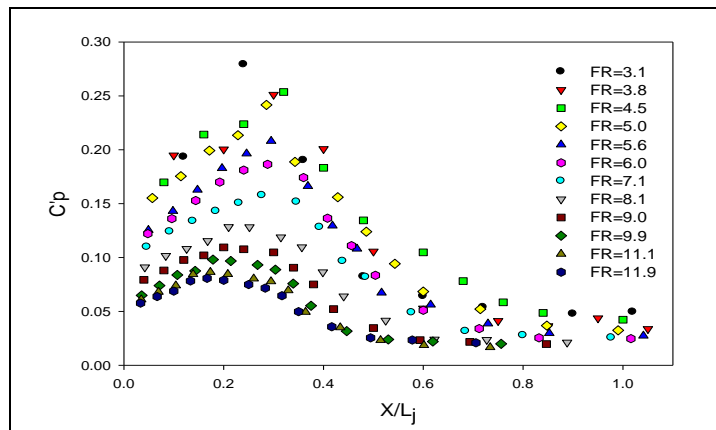
در این رابطه، پارامتر  $\sigma_x/H$  نشان‌دهنده میزان افت نسبی انرژی موضعی و  $(Y_2 - Y_1)$  نسبت اعماق مزدوج است که بر اساس رابطه بلانگر تابعی است از عدد فرود اولیه پرش به این ترتیب تغییرات نوسانات فشار در طول پرش بر اساس رابطه ۳ محاسبه و در شکل ۱۰ رسم شده است.



شکل ۱۰- توزیع طولی نوسانات فشار

نوسانات فشار و محور افقی نشان‌دهنده فاصله نسبی از پنجه پرش است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد با افزایش عدد فرود جریان، ضریب ( $C'_p$ ) کاهش می‌یابد و البته به این معنا نیست که با افزایش عدد فرود نوسانات فشار نیز کاهش می‌یابد. کاهش مقدار  $C'_p$  با افزایش عدد فرود مشخص‌کننده این حقیقت است که با افزایش دبی، رشد انرژی سرعتی ( $v^2/2g$ ) بیشتر از رشد شدت نوسانات فشار ( $\sigma_x$ ) است.

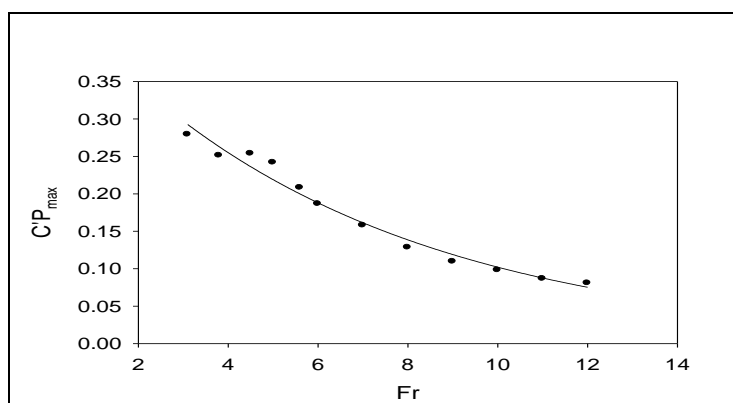
ضرایب بدون بعد  $C_p^+$  و  $C_p^-$  و  $C'_p$  طراحی ضخامت دال کف حوضچه مستلزم تعیین ضرایب بدون بعد  $C_p^+$  و  $C_p^-$  برای شرایط هیدرولیکی و هندسه حوضچه است. به این ترتیب تغییرات ضریب بدون بعد انحراف معیار نوسانات فشار  $C'_p$  بر اساس رابطه ۱ به‌ازای اعداد فرود مختلف جریان محاسبه و در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در این شکل، محور عمودی نشان‌دهنده ضریب بدون بعد انحراف معیار



شکل ۱۱- تغییرات طولی ضریب  $C'_p$

که مشاهده می‌شود، همواره با افزایش عدد فرود ضریب  $C'_{p_{\max}}$  کاهش می‌یابد. این نتیجه را محققان دیگر از جمله باورز و توسو (Bowers & Toso, 1987) و لوپاردو و سولاری (Lopardo & Solari, 1980) نیز تأیید کرده‌اند.

در طراحی حوضچه آرامش، حداکثر ضریب انحراف معیار نوسانات فشار ( $C'_{p_{\max}}$ ) با اهمیت است و از این‌رو ضرورت دارد تغییرات آن نسبت به عدد فرود بررسی شود. به این ترتیب در شکل ۱۲ تغییرات ضریب ( $C'_{p_{\max}}$ ) نسبت به عدد فرود اولیه پرش رسم شده است. همان‌طور



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

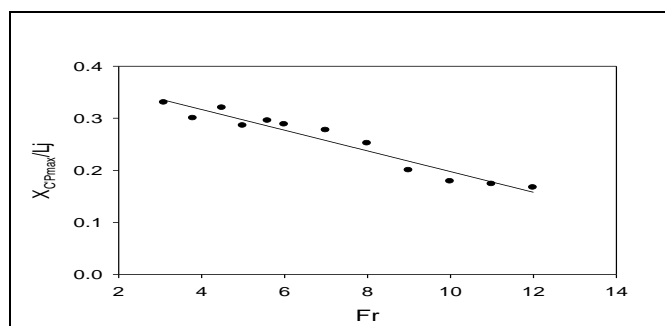
به منظور تخمین ضریب  $C'p_{max}$  در پرش هیدرولیکی در پایین دست سرریز، با استفاده از آنالیز رگرسیون غیر خطی نمایی رابطه ۱۴ پیشنهاد شده است:

شکل ۱۳ موقعیت نسبی وقوع حداکثر ضریب بدون بعد نوسانات فشار را نسبت به عدد فرود نشان می‌دهد. دیده می‌شود که موقعیت نسبی حداکثر نوسانات فشار وابسته به عدد فرود اولیه پرش است و با افزایش عدد فرود مقدار آن کاهش می‌یابد. حداکثر ضریب نوسانات فشار ( $C'p_{max}$ ) برای اعداد فرود بین ۳ تا ۱۲ تقریباً نزدیک به محل پنجه پرش و در محدوده  $16 < X / L_r < 33$  رخ می‌دهد.

در طراحی حوضچه آرامش، علاوه بر مقدار ضریب

$$C'p_{max} = 0.4697e^{-0.1526Fr} \quad (14)$$

$$Rsqr = 0.9747$$

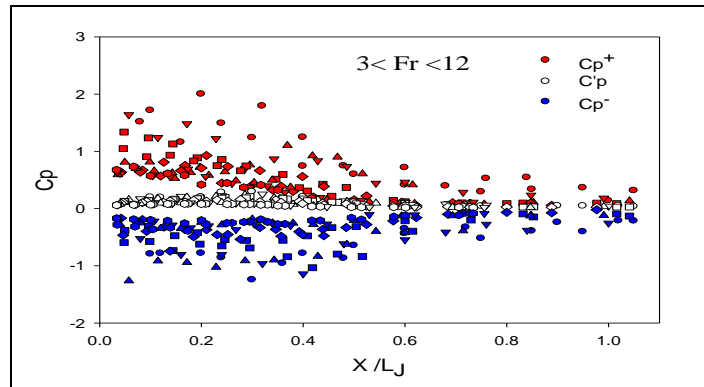


شکل ۱۳- موقعیت وقوع حداکثر ضریب نوسانات فشار نسبت به عدد فرود اولیه

در شکل ۱۴، ضریب بدون بعد فشارهای حدی ماکزیمم و مینیمم ( $C_p^-$  و  $C_p^+$ ) و انحراف معیار نوسانات فشار ( $C'_p$ ) بر اساس رابطه‌های ۶ و ۷ رسم شده است. ضریب  $C_p^+$  بیان‌کننده اختلاف فشارهای حداکثر از فشار متوسط است. این ضریب میزان آثار ضربات ناشی از نوسان‌های فشار را بر کف حوضچه آرامش بیان می‌کند. ضریب ( $C_p^-$ ) بیان‌کننده اختلاف فشارهای منفی نسبت به فشار متوسط

و یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی آثار نیروهای برکنش در زیر دال است و به‌ویژه در خصوص میزان تمایل به ایجاد کاویتاسیون ناشی از نوسانات فشار، بسیار مورد توجه است. در این تحقیق، برای پرش در پایین دست سرریز حداکثر مقدار  $C_p^+$  برابر با ۲ و حداکثر قدر مطلق ضریب ( $C_p^-$ ) برابر با ۱/۲ است که در محدوده  $X/L_r \leq 0.4$  رخ داده است.

در شکل ۱۴، ضریب بدون بعد فشارهای حدی ماکزیمم و مینیمم ( $C_p^-$  و  $C_p^+$ ) و انحراف معیار نوسانات فشار ( $C'_p$ ) بر اساس رابطه‌های ۶ و ۷ رسم شده است. ضریب  $C_p^+$  بیان‌کننده اختلاف فشارهای حداکثر از فشار متوسط است. این ضریب میزان آثار ضربات ناشی از نوسان‌های فشار را بر کف حوضچه آرامش بیان می‌کند. ضریب ( $C_p^-$ ) بیان‌کننده اختلاف فشارهای منفی نسبت به فشار متوسط



شکل ۱۴- ضریب‌های بدون بعد  $C_p^+$ ،  $C_p^-$  و  $C_p$

### نتیجه‌گیری

سرریز در کف حوضچه آرامش، نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که ضریب بی‌بعد فشار ماکزیمم، در محدوده  $1 \leq \Psi_{\max} \leq 3$  است.

- توزیع فشارهای مینیمم در پایین‌دست سرریز در کف حوضچه آرامش بیانگر این موضوع است که در محدوده  $X \leq 4(Y_2 - Y_1)$ ، مقادیر ضریب بدون بعد فشار مینیمم همواره منفی است.

- توزیع طولی نوسانات فشار ( $\Omega$ ) در فاصله بدون بعد  $1.2 \leq X / (Y_2 - Y_1) \leq 2.7$  حداکثر است که نشان‌دهنده موقعیت وقوع حداکثر اتلاف انرژی در طول پرش است.

- حداکثر ضریب انحراف معیار نوسانات فشار ( $C'_{p_{\max}}$ ) تابعی از عدد فرود جریان است و با افزایش عدد فرود همواره کاهش می‌یابد و برای اعداد فرود بین ۳ تا ۱۲ تقریباً نزدیک به محل پنجه پرش و در محدوده  $16 < X / L_j < 33$  رخ می‌دهد.

- در خصوص ضرایب بدون بعد فشارهای حدی ماکزیمم و مینیمم ( $C_p^+$  و  $C_p^-$ ) نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد حداکثر مقدار  $C_p^+$  برابر با ۲ و حداکثر قدر مطلق ضریب ( $C_p^-$ ) برابر با ۱/۲ است که در محدوده  $X / L_j \leq 0.4$  رخ می‌دهد.

در این تحقیق ویژگی‌های فشار زیر پرش هیدرولیکی پایین‌دست یک سرریز بلند در محدوده اعداد فرود بین ۳ تا ۱۲ بررسی و نتایج زیر از آن حاصل شد:

- شدت نوسانات فشار در زیر پرش هیدرولیکی تابعی از عدد فرود و فاصله نسبی از پنجه پرش است.

- با افزایش عدد فرود جریان ورودی به دلیل تشکیل پرش قوی و پایدارتر شدت تلاطم در جریان افزایش و در نتیجه تشکیل گردابه‌های قوی‌تر، انحراف معیار نوسانات فشار افزایش می‌یابد.

- مقدار انحراف معیار نوسانات فشار در زیر پرش وابسته به فاصله از پنجه پرش است به طوری که در ابتدای پرش هیدرولیکی مقدار آن افزایش می‌یابد تا اینکه به یک مقدار ماکزیمم می‌رسد، پس از آن سیر نزولی دارد و در انتهای پرش مقدار آن تقریباً ثابت می‌شود.

- توزیع فشار متوسط در پرش هیدرولیکی در پایین‌دست سرریز بلند، در موقعیت نسبی  $X / (Y_2 - Y_1) = 8$  تقریباً ثابت و برابر با یک و بدین معناست که طول پرش هیدرولیکی حداکثر  $8(Y_2 - Y_1)$  است.

- بر اساس نحوه توزیع فشارهای حداکثر پایین‌دست

## مراجع

- Abdul Khader, M. H. and Elango, K. 1974. Turbulent pressure field beneath a hydraulic jump. J. Hydraul. Res. 12(4): 469-489.
- Akbari, M. E., Mittal, M. K. and Pande, P. K. 1982. Pressure fluctuations on the floor of free and forced hydraulic jumps. Proceedings of the Conference on the Hydraulic Modeling of Civil Engineering Structures. Sep. 22-24. Coventry, England.
- Bowers, C. E. and Toso. J. W. 1987. Karnafuli project, model studies of spillway damage. J. Hydraul. Eng. 114(5): 469-483.
- Lopardo, R. A. and Henning, R. E. 1985. Experimental advances on pressure fluctuations beneath hydraulic jumps. Proceedings of the 21<sup>st</sup> IAHR Congress. Aug. 13-18. Melbourne, Australia.
- Lopardo, R. A. and Solari, H. G. 1980. Pressure fluctuations beneath free hydraulic jump. Proceedings of the 9<sup>th</sup> Congress of the Latin American Hydraulica. International Association of Hydraulic Research.
- Marques, M. G., Drapeau, J. and Verrette, J. L. 1997. Flutuação de pressão em um ressalto hidráulico. Revista Brasileira de Recursos Hídricos Porto Alegre. 2(2): 45-52.
- Toso, J. and Bowers, E. C. 1988. Extreme pressure in hydraulic jump stilling basin. J. Hydraul. Eng. 114, 829-843 .

## Investigation on Pressure Variations at Stilling Basin Bed

**K. Yousefi, H. Banezhad, M. Heydari\* and M. Karimi**

\*Corresponding Author: Assistant Professor, Water Engineering Department, Agriculture Faculty, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. Email: mheydari\_ir@yahoo.com

Received: 25 December 2017, Accepted: 12 June 2018

### **Abstract**

Stilling basin is one of the energy dissipater structures that are used frequently in downstream of hydraulic structures, such as spillways, sluice gates and chutes. The energy dissipation, due to macro-scale turbulence, makes intensive pressure fluctuations so it must be carefully considered when structures are designed. The experiments were carried out in a rectangular flume, 0.3m by 0.4m; and Froude numbers from 3 to 12. The pressure variations data at flume bed and the water level data were recorded by electronic pressure transducer and by piezometers, respectively. The results showed that the intensity of pressure fluctuations in hydraulic jump was related to the Froude number and relative situation from the jump toe. The maximum pressure fluctuation intensity coefficient  $C'_{pmax}$  varied from 0.08 to 0.28 at the distance of 17 to 33 percent of the jump length. The maximum value of  $C^+_p$  was equal to 2 and maximum absolute of coefficient  $C^-_p$  was equal to 1.2 occurred at  $X/L_j \leq 0.4$ . Longitude distribution of pressure and its fluctuation and critical values in the length of hydraulic jump also were obtained.

**Keywords:** Dimensional Analyze, Froude Number, Hydraulic Jump, Pressure Fluctuation, Transducer