

مقاله پژوهشی

تأثیر استغراق پرش هیدرولیکی بر نوسانات فشار کف حوضچه آرامش تیپ دو USBR

سید نصراله موسوی*^۱، داود فرسادی‌زاده^۲، فرزین سلماسی^۳، علی حسین زاد دلیر^۲

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۹/۲۹

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۷/۲۱

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۲- استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۳- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: s.n.mousavi@tabrizu.ac.ir

چکیده

در تحقیق حاضر، نوسانات فشار جریان در کف حوضچه آرامش تیپ دو USBR در پایین‌دست سرریز اوجی با استفاده از ترانسدیوسرهای فشار اندازه‌گیری گردید. آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی در شرایط مختلف جریان انجام گرفت. بعلاوه، میدان فشار در پرش هیدرولیکی مستغرق، به منظور کمک به درک بهتر فرآیند استهلاک انرژی و طراحی بهینه حوضچه‌های آرامش مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از پارامترهای بی‌بعد، تأثیر استغراق بر روی توزیع طولی فشار متوسط و شدت نوسانات فشار ارزیابی گردید. برداشت داده‌های فشار برای اعداد فرود اولیه مختلف (Fr_1) در محدوده $6/4$ تا $8/3$ ، و فاکتور استغراق (S) در محدوده 1 تا $1/4$ انجام گردید. بر اساس تحلیل ابعادی، مقادیر ضریب شدت نوسانات فشار (C'_p) تابعی از پارامترهای S ، Fr_1 و فاصله نسبی از ابتدای حوضچه (X/Y_1) می‌باشد. نتایج نشان داد که مقادیر حداکثر ضریب C'_p در حوضچه تیپ دو نسبت به حوضچه‌های صاف، حدود ۳۰ درصد کاهش می‌یابد. در ناحیه پایین‌دست حوضچه آرامش ($X/Y_1 > 10$)، متوسط مقادیر C'_p در پرش‌های مستغرق نسبت به پرش آزاد، حدود ۲۵ درصد کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: پرش هیدرولیکی مستغرق، ترانسدیوسر فشار، حوضچه آرامش، ضریب C'_p ، فاکتور استغراق

The Submergence Effect of Hydraulic Jumps on the Bed Pressure Fluctuations of the USBR Type II Stilling Basin

SN Mousavi^{1*}, D Farsadizadeh², F Salmasi³, A Hosseinzadeh Dalir²

Received: December 10, 2017 Accepted: April 17, 2019

^{1*} Ph.D. Student of Water Sruc., Dept. of Water Engin., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran

² Prof., Dept. of Water Engin., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran

³ Assoc. Prof., Dept. of Water Engin., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran

*Corresponding Author, Email: s.n.mousavi@tabrizu.ac.ir

Abstract

In the present study, the flow pressure fluctuations have been measured on the bed of the USBR Type II stilling basin downstream of an Ogee spillway using pressure transducers. The experiments were carried out in a laboratory flume under different flow conditions. In addition, the pressure field in submerged hydraulic jumps was investigated to help better understanding the energy dissipation process and optimum designing the stilling basins. Using the dimensionless parameters, the submergence effect on the longitudinal distribution of the mean pressure and the pressure fluctuations intensity were evaluated. Pressure data acquisition was conducted for different incident Froude numbers (Fr_1), ranged from 6.4 to 8.3, and submergence factors (S) in the range of 1 to 1.4. Based on the dimensional analysis, the values of the intensity coefficient of pressure fluctuations (C'_p) were a function of parameters of Fr_1 , S and the relative distance from the beginning of the basin (X/Y_1). The results showed that the maximum values of C'_p coefficient for the Type II stilling basin decreased around 30% compared to the smooth basins. The mean values of C'_p in submerged jumps decreased around 25% compared to the free jumps at the downstream zone of the stilling basin ($X/Y_1 > 10$).

Keywords: C'_p coefficient, Pressure transducer, stilling basin, Submerged hydraulic jump, Submergence factor

مقدمه

چنانچه پرش مستغرق به عنوان مستهلک کننده انرژی مورد استفاده قرار گیرد، نیاز به حوضچه آرامش طولانی تر می باشد. پرش مستغرق به تغییرات عمق پایاب، دارای حساسیت کمتری بوده، که از مزایای آن در مقایسه با پرش های آزاد می باشد. حوضچه های آرامش در پایین دست سرریزهای دارای بار آبی نسبتاً پایین، اغلب در شرایط پرش مستغرق بهره برداری می گردند. بنابراین، پرش مستغرق اغلب در حوضچه های طراحی شده برای پرش های آزاد، اتفاق می افتد (حبیبزاده و همکاران ۲۰۱۱).

نوسانات شدید فشار در سه حالت مختلف، حوضچه های آرامش را تحت تأثیر قرار می دهد. ایجاد

پدیده پرش هیدرولیکی به منظور استهلاک انرژی جریان در پایین دست سازه های هیدرولیکی نظیر سرریزها، تندآب ها و دریچه ها دارای کاربردهای وسیعی می باشد (عباسپور و همکاران ۲۰۰۹). استهلاک انرژی در پرش هیدرولیکی همواره با نوسانات شدید فشار همراه بوده که بر کف حوضچه آرامش وارد می گردد. چنانچه عمق پایاب بیشتر از عمق ثانویه پرش هیدرولیکی باشد، پرش مستغرق تشکیل خواهد شد. با افزایش استغراق در پرش هیدرولیکی، اختلاط جت و استهلاک انرژی نسبت به پرش های آزاد، کاهش یافته که به عنوان یک ویژگی نامطلوب برای این نوع پرش هیدرولیکی محسوب می گردد.

افزایش عدد فرود اولیه (Fr_1)، ضریب C'_p کاهش می‌یابد.

نتایج پین هیرو (۱۹۹۵) نشان داد که وقوع فشارهای منفی ممکن است تا ۷۰ درصد طول پرش هیدرولیکی هم ادامه داشته و مقادیر حداکثر آنها، در ناحیه با بیشترین انحراف استاندارد مشاهده می‌گردد. مارکز و همکاران (۱۹۹۷)، روابط بی‌بعد را برای پارامترهای فشار ارائه نمودند. مارکز و همکاران (۱۹۹۹) برای ضریب فشار متوسط بی‌بعد (Ψ) در پرش هیدرولیکی مستغرق، روابط ۲ و ۳ را پیشنهاد نمودند.

$$\Psi = f(X^*) \quad [2]$$

$$\Psi = \frac{P_m - Y_1}{Y_2 - Y_1} \cdot \frac{1}{S} \quad X^* = \frac{X}{Y_2 - Y_1} \quad [3]$$

که در آن، P_m فشار متوسط در هر نقطه، Y_1 عمق اولیه پرش، Y_2 عمق ثانویه، X فاصله هر نقطه از پنجه پرش، X^* فاصله بی‌بعد هر نقطه و S فاکتور استغراق پرش هیدرولیکی طبق رابطه Y_1/Y_2 بوده که در آن Y_1 عمق پایاب می‌باشد.

نتایج لوپاردو و همکاران (۲۰۰۴) نشان داد که در محدوده $X/Y_1 > 30$ ، افزایش ضریب C'_p نسبت مستقیم با عدد فرود دارد. در محدوده $X/Y_1 > 12$ ، مقدار C'_p در پرش آزاد به اندازه نصف یا کمتر از آن در شرایط استغراق حداکثر می‌گردد. فرهودی و همکاران (۲۰۱۰) نشان دادند که مقادیر C'_p در اطراف بلوک‌های پای تندآب حوضچه آرامش SAF با افزایش فاکتور استغراق، کاهش می‌یابند. مطابق تحقیق نصیری و همکاران (۲۰۱۲)، با افزایش فاصله از پنجه پرش در امتداد حوضچه آرامش تیپ سه USBR، پارامتر RMS نوسانات فشار دارای روند کاهشی می‌باشد.

کاظمی و همکاران (۲۰۱۶) نوسانات فشار را در کف حوضچه آرامش تیپ دو USBR بررسی نمودند. بر اساس تحقیق کریمی و همکاران (۲۰۱۷)، ضریب C'_p در

نیروی بالابرنده^۱ در زیر دال کف حوضچه، ایجاد پدیده خستگی^۲ در مصالح و وقوع پدیده کاویتاسیون از اثرات نوسانات فشار می‌باشند (کریمی و همکاران ۲۰۱۷). بررسی پدیده نوسانات فشار با استفاده از روش‌های آماری امکان‌پذیر می‌باشد. یکی از مهمترین پارامترهای آماری، ضریب بی‌بعد شدت نوسانات فشار^۳ (C'_p) می‌باشد. ضریب C'_p به عنوان تابعی از انرژی جنبشی ورودی، طبق رابطه ۱ محاسبه می‌گردد (توسو و باورز ۱۹۸۸).

$$C'_p = \frac{RMS}{\alpha \cdot \frac{V_1^2}{2g}} = \frac{\sqrt{P'^2}}{\alpha \cdot \frac{V_1^2}{2g}} \quad [1]$$

که در آن، $P' = P - P_m$ جزء نوسانی فشار بر حسب سانتی‌متر ستون آب، P فشار کل، P_m فشار متوسط زمانی و RMS انحراف استاندارد نوسانات فشار^۴ بوده که با σ_x هم نمایش داده می‌شود. در این رابطه، α ضریب پروفیل سرعت که معمولاً معادل با یک فرض می‌شود. V_1 سرعت ورودی در ابتدای پرش هیدرولیکی و g شتاب ثقل می‌باشند.

مطابق تحقیق توسو و باورز (۱۹۸۸)، مقدار پیک ضریب C'_p تابع موقعیت پرش، شیب شوت سرریز، عدد فرود اولیه، توسعه لایه مرزی جریان در ابتدای پرش و مدت زمان اجرای آزمایش می‌باشد. نتایج نشان داد که در حوضچه‌های آرامش USBR نوع II و III، استهلاک انرژی سریع‌تر از حوضچه‌های صاف اتفاق می‌افتد. بر طبق نتایج اندرس (۱۹۹۰)، اختلاف مقادیر ضریب C'_p مربوط به درجه توسعه لایه مرزی جریان می‌باشد.

فیورتو و رینالدو (۱۹۹۲a) با بررسی نوسانات فشار بالابر، معیاری برای طراحی پوشش حوضچه‌های آرامش ارائه نمودند. فیورتو و رینالدو (۱۹۹۲b) ساختار آماری نوسانات فشار را در پرش هیدرولیکی واقع در حوضچه آرامش پایین‌دست دریچه کشویی بررسی نمودند. با توجه به رابطه ۱، در پایین‌دست دریچه‌ها با

3-The intensity coefficient of pressure fluctuations
1- Root mean square error

1- Uplift force
2- Fatigue

آستانه انتهایی دنداندار، در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب واقع در مرکز تحصیلات تکمیلی دانشکده کشاورزی دانشگاه تیریز انجام یافته است.

مطابق شکل ۱، فلوم آزمایشگاهی دارای مقطع مستطیلی با کف فلزی و دیواره‌های از جنس پلکسی گلاس به طول ۱۰ متر و عرض ۵۰ سانتی‌متر می‌باشد. با توجه به ارتفاع سرریز اوجی (P) برابر با ۷۰ سانتی‌متر، جهت تأمین بار آبی مورد نیاز، ارتفاع دیواره‌های فلوم در طول حدود ۱/۵ متر از ابتدای آن تا محل سرریز اوجی، از ۵۰ به ۱۰۰ سانتی‌متر افزایش داده شده است. در انتهای فلوم، یک سرریز لولایی جهت ایجاد و تثبیت موقعیت پرش هیدرولیکی تعبیه شده است. سرریز اوجی شکل و حوضچه آرامش تیپ دو، بر اساس معیارهای USBR طراحی شده‌اند (بی‌نام ۱۹۸۷، چانسون و کاروالهو ۲۰۱۵). بر این اساس، طول و عرض سرریز اوجی شکل به ترتیب برابر با ۶۱ و ۵۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. معادله منحنی سرریز به صورت $Y = 2.6802.X^{1.8671}$ می‌باشد. طول حوضچه آرامش تیپ دو USBR (L_{bi}) برابر با ۱۲۵ سانتی‌متر می‌باشد.

در جدول ۱ مقادیر پارامترهای آزمایشگاهی به صورت خلاصه ارائه شده است. برای اندازه‌گیری عمق جریان مورد نظر، از یک سنسور اولتراسونیک در بازه اندازه‌گیری ۱۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متر با دقت اسمی حداقل یک میلی‌متر استفاده شده است. با توجه به بروز مشکلات مختلف از جمله وجود حباب هوا در محل عمق اولیه پرش هیدرولیکی آزاد (Y_1) و حساسیت بالای این مقادیر برای محاسبه اعداد فرود اولیه (Fr_1)، اندازه‌گیری پارامتر Y_1 در عمل با خطای قابل توجه همراه بوده است. بر این اساس، مقادیر پارامتر Y_1 با استفاده از رابطه بلانگر برای پرش هیدرولیکی کلاسیک محاسبه شده است. برای اندازه‌گیری عمق ثانویه پرش هیدرولیکی

نسبت‌های مختلف بازشدگی ناگهانی دیواره‌های حوضچه در مقایسه با پرش کلاسیک کاهش می‌یابد. وجود زبری در بستر حوضچه، باعث کاهش شدت نوسانات فشار می‌گردد. در تحقیق نوکوسکی و همکاران (۲۰۱۷)، نوسانات فشار بر روی سرریز اوجی پله‌ای^۱ در پرش آزاد ($S=1$) بررسی شده است. نتایج نشان داد که با استفاده از توزیع طولی ضرایب چولگی و کشیدگی می‌توان نقاط مشخصه پرش هیدرولیکی شامل نقطه جداشدگی جریان، نقطه انتهای غلتاب و نیز نقطه انتهای تأثیر پرش هیدرولیکی بر روی جریان را مشخص نمود.

پارسامهر و همکاران (۲۰۱۸) نشان دادند که در محدوده $X/Y_1 < 20$ ، با توجه به برخورد مستقیم جت آب ورودی، نوسانات فشار در بستر حوضچه افزایش می‌یابد. حسن‌پور (۲۰۱۸) نوسانات فشار در حوضچه‌های آرامش با واگرایی تدریجی را بررسی نمود. یوسفی و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند که با افزایش فاکتور استغراق، مقدار C'_{Pmax} کاهش می‌یابد.

نوسانات فشار در کف حوضچه‌های آرامش صاف در پایین‌دست دریچه کشویی و سرریز به طور گسترده، در منابع علمی مورد توجه قرار گرفته است. در خصوص اثر توأم بلوک‌های پای تندآب و آستانه انتهایی دنداندار حوضچه آرامش بر نوسانات فشار پرش هیدرولیکی مستغرق در پایین‌دست سرریز اوجی، مطالعه چندانی صورت نگرفته است. در این تحقیق، به شناخت بهتر مکانیزم پرش هیدرولیکی مستغرق در حوضچه آرامش تیپ دو USBR پرداخته و نوسانات فشار در کف این نوع حوضچه آرامش مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

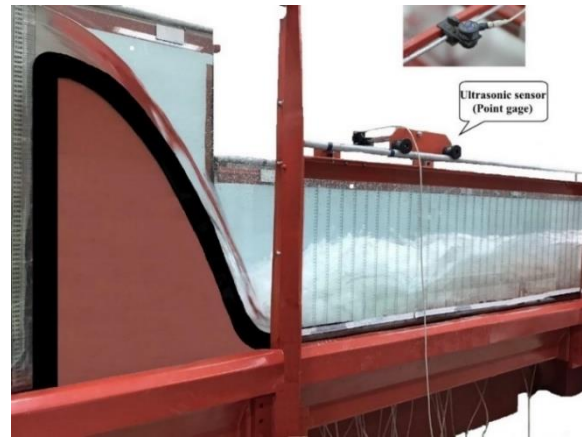
بررسی نوسانات فشار بر روی کف حوضچه آرامش تیپ دو USBR شامل بلوک‌های پای تندآب و

گرفته است. اندازه‌گیری دبی جریان با استفاده از دبی‌سنج اولتراسونیک انجام یافته است.

آزاد (Y_2) برای مقادیر مختلف دبی جریان (Q)، آزمایش‌های مورد نیاز در حوضچه آرامش صاف انجام



(ب) نمای داخلی حوضچه آرامش



(الف) نمای بیرونی فلوم آزمایشگاهی

شکل ۱ - تجهیزات آزمایشگاهی شامل فلوم، سرریز اوجی و حوضچه آرامش.

جدول ۱ - مقادیر پارامترهای آزمایشگاهی مورد استفاده در تحقیق حاضر.

مقادیر	نماد	پارامتر
۸/۲۹ تا ۶/۱۴	Fr_1	عدد فرود اولیه در شرایط جریان آزاد
۶۰/۴ تا ۳۳	Q	دبی جریان (لیتر بر ثانیه)
۱/۴ تا ۱	S	فاکتور استغراق
۳/۳۶ تا ۱/۸۴	Y_1	عمق اولیه پرش آزاد
۲۶/۶۰ تا ۱۹/۶۹	Y_2	عمق ثانویه پرش آزاد
۳۷/۲۳ تا ۲۰/۷۸	Y_r	عمق ثانویه پرش مستغرق
۳	H_{cb}	ارتفاع بلوک‌های پای تندآب
۳/۲	W_{cb}	عرض بلوک‌ها
۷/۹۴	L_{cb}	طول بلوک‌ها
۳/۲	S_{cb}	فاصله بین بلوک‌ها
۱/۵	S_{cbw}	فاصله بین بلوک‌ها و دیواره‌های انتهایی حوضچه
۶	H_{1es}	ارتفاع آستانه انتهایی دندان‌دار در بالادست
۳/۱۵	H_{1es}	ارتفاع آستانه انتهایی دندان‌دار در پایین‌دست
۴/۶	S_{es}	فاصله بین دندان‌های آستانه انتهایی
۴/۶	W_{es}	عرض دندان‌های آستانه انتهایی
۱۲/۶	L_{1es}	طول کف آستانه انتهایی
۰/۶	L_{2es}	طول لبه بالایی آستانه انتهایی

- ابعاد پارامترهای طولی بر حسب سانتی‌متر می‌باشد.

هیدرودینامیکی بوده و تابعی از عمق و سرعت آب می‌باشد. برای اندازه‌گیری نوسانات فشار از دستگاه

نوسانات فشار

توزیع فشار در پرش هیدرولیکی از نوع

اندازه‌گیری فشار کف یا پیزومترها (X) از ۲/۵ تا ۱۸۹ سانتی‌متر می‌باشد. سنسورهای فشارسنج مورد استفاده در تحقیق حاضر، برای محدوده فشار ۱۰۰- تا ۱۰۰+ میلی‌بار کالیبره شده و دقت اسمی اندازه‌گیری آنها $\pm 0.5\%$ درصد می‌باشد.

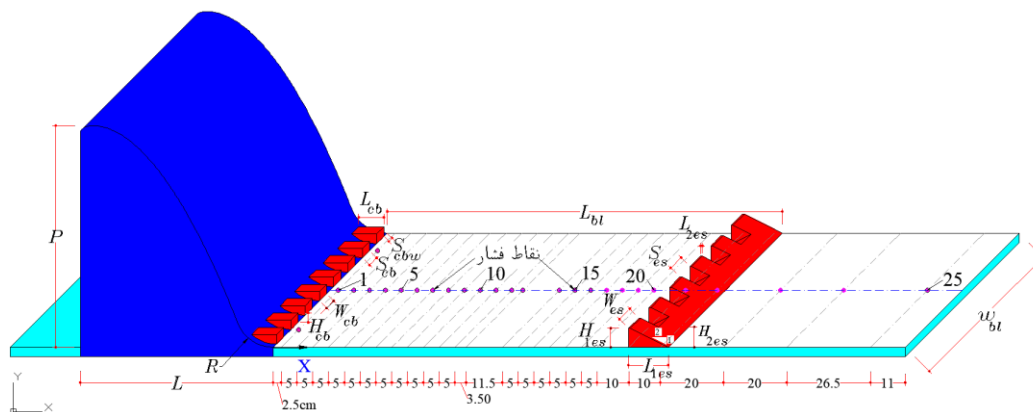
فرکانس ۲۰ هرتز برای داده‌برداری سنسورهای فشارسنج و مدت زمان ۹۰ ثانیه جهت ثبت ۱۸۰۰ داده فشار برای هر نقطه فشار در هر آزمایش در نظر گرفته شده است. به منظور واسنجی سنسورهای فشارسنج، میانگین فشارهای ثبت شده توسط سیستم برداشت داده‌ها^۲ در یک جریان آرام، با فشارهای استاتیکی مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در تحقیق حاضر، حداکثر طول شیلنگ‌های شفاف از محل سوراخ کف کاذب حوضچه آرامش تا سنسورهای فشار، در حدود ۲۰۰ سانتی‌متر، با قطر داخلی سه میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

ترانسدیوسر^۱ شش کاناله استفاده شده است که دارای قابلیت ثبت مقادیر فشار لحظه‌ای در زمان‌های مختلف بوده و سری زمانی فشار را در موقعیت‌های مورد نظر ارائه می‌دهد. فشارهای لحظه‌ای مربوط به پیزومترهای نصب شده در کف حوضچه، توسط دستگاه ترانسدیوسر به سیگنال‌های الکتریکی تبدیل می‌گردند. این سیگنال‌ها از ترانسدیوسر به یک سیستم پردازشگر منتقل گردیده که از طریق رایانه، قابل مشاهده می‌باشد (شکل ۲).

در تحقیق حاضر، شش عدد سنسور فشارسنج جهت اندازه‌گیری فشارهای لحظه‌ای در نقاط مورد نظر، مورد استفاده قرار گرفت. در شکل ۳ به صورت شماتیک، آرایش نقاط فشار در کف حوضچه آرامش نشان داده شده است. نقاط فشار شماره ۲۳، ۲۴ و ۲۵ جهت اندازه‌گیری فشار در خارج از محدوده حوضچه پیش‌بینی شده‌اند. مطابق شکل ۳، موقعیت نقاط



شکل ۲- سنسورهای فشارسنج به همراه سیستم برداشت داده‌ها مربوطه جهت اندازه‌گیری فشار.



شکل ۳- آرایش نقاط فشار اندازه‌گیری شده در کف حوضچه آرامش تیپ دو USBR.

² Data acquisition system (DAQ)

¹ Transducer

تحلیل ابعادی

با توجه به اینکه هدف از این تحقیق، بررسی نوسانات فشار در حوضچه آرامش می‌باشد، لذا با استفاده از قضیه باکینگهام، ضریب شدت نوسانات فشار در پرش هیدرولیکی مستغرق به عنوان تابعی از سایر پارامترهای بی‌بعد به صورت زیر بیان می‌گردد.

$$C'_p = f\left(\frac{V_1}{\sqrt{g.Y_1}}, \frac{X}{Y_1}, \frac{Y_t}{Y_2}\right) = f(\text{Fr}_1, \frac{X}{Y_1}, S) \quad [4]$$

که در آن، پارامتر $V_1/(g.Y_1)^{0.5}$ بیانگر عدد فرود بوده که برای جریان با سطح آزاد برقرار می‌باشد. پارامتر Y_t/Y_2 به عنوان فاکتور استغراق (S) در تحقیق حاضر مورد استفاده قرار گرفته است. پارامتر X/Y_1 نشان‌دهنده فاصله بی‌بعد نقاط فشار از ابتدای حوضچه می‌باشد.

مطابق جدول ۱، X فاصله طولی هر نقطه از پنجه پرش و Y_t عمق پایاب (عمق ثانویه پرش هیدرولیکی مستغرق) می‌باشند. بر اساس تحلیل ابعادی، مقادیر ضریب C'_p تابعی از Fr_1 ، X/Y_1 و S می‌باشند. در نمودارهای مربوط به تغییرات طولی ضریب فشار متوسط (Ψ)، از پارامتر $X/(Y_2 - Y_1)$ برای فواصل بی‌بعد استفاده شده که با علامت X^* مشخص شده است.

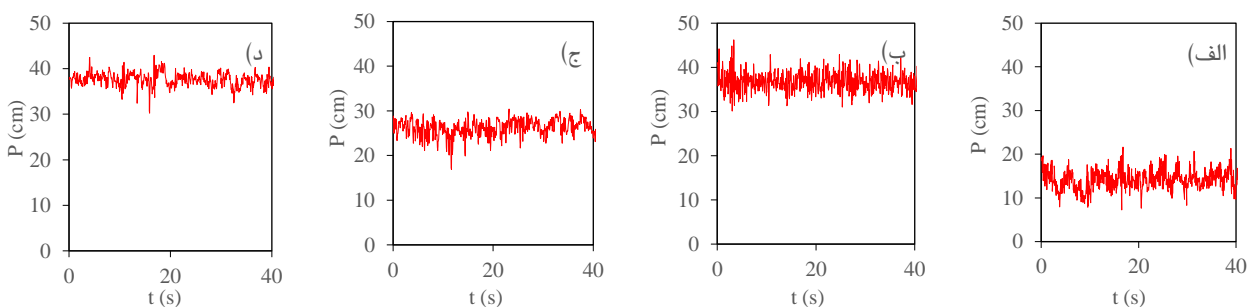
نتایج و بحث

نوسانات فشار لحظه‌ای

در شکل ۴، نمودارهای مربوط به نوسانات فشار لحظه‌ای ثبت شده در مدت زمان ۴۰ ثانیه برای شرایط پرش هیدرولیکی آزاد ($S=1$) و پرش هیدرولیکی با

استغراق $1/4$ برای عدد فرود اولیه $6/14$ در نقاط فشار شماره ۳ و ۲۰ نشان داده شده است. این نقاط به ترتیب در فواصل طولی $12/5$ و $102/5$ سانتی‌متر از ابتدای حوضچه آرامش واقع شده‌اند. محور افقی نمودارها، زمان بر حسب ثانیه و محور قائم، پارامتر بار فشار کل لحظه‌ای بر حسب سانتی‌متر ستون آب را نشان می‌دهد.

شکل ۴ نشان می‌دهد که نوسانات فشار لحظه‌ای در نقاط واقع در ابتدای حوضچه آرامش، متفاوت از نقاط انتهایی می‌باشد. به نحوی که نقطه فشار شماره ۲۰، دارای حداقل تغییرات نوسانی فشار می‌باشد. با افزایش فاصله نقاط فشار از ابتدای حوضچه، مقادیر فشار لحظه‌ای در امتداد پرش هیدرولیکی، افزایش می‌یابند. بنابراین مقادیر فشار لحظه‌ای و نوسانات آن، در نقاط مختلف حوضچه آرامش، تابع موقعیت پرش هیدرولیکی می‌باشد. با توجه به اینکه در پرش مستغرق، عمق پایاب بیشتر از عمق ثانویه پرش آزاد می‌باشد، لذا در هر نقطه مشخص در داخل حوضچه، مقادیر فشار لحظه‌ای در پرش مستغرق، بیشتر از پرش آزاد می‌باشند. در شرایط پرش مستغرق، روند تغییرات نوسانات فشار در نقاط مختلف حوضچه آرامش، متفاوت می‌باشد. نقطه فشار شماره ۳ که در بالادست پرش واقع شده است، در حالت مستغرق نسبت به آزاد، دارای نوسانات فشار بیشتری می‌باشد. در حالی که، نقطه فشار شماره ۲۰ که در پایین‌دست پرش واقع شده است، در حالت مستغرق نسبت به آزاد، دارای نوسانات فشار کمتری می‌باشد.



شکل ۴ - نوسانات فشار لحظه‌ای برای عدد فرود $6/14$:

(الف) نقطه شماره ۳ ($S=1$)، (ب) نقطه شماره ۳ ($S=1.4$)، (ج) نقطه شماره ۲۰ ($S=1$) و (د) نقطه شماره ۲۰ ($S=1.4$).

ضریب فشار متوسط

در تحقیق حاضر، مقادیر ضریب فشار متوسط (Ψ) از رابطه ۳ استخراج شده است. در شکل ۵، نمودارهای مربوط به تغییرات ضریب Ψ در طول حوضچه آرامش با استغراق‌های مختلف، به ترتیب برای اعداد فرود ۶/۱۴، ۶/۵۲، ۶/۷۲، ۷/۱۴، ۷/۴۸ و ۸/۲۹ (دبی جریان ۶۰/۴، ۵۵، ۵۲/۷، ۴۷/۵، ۴۳ و ۳۳ لیتر بر ثانیه) ترسیم شده است. محور افقی نمودارهای شکل ۵، موقعیت نسبی نقطه فشار را از ابتدای حوضچه (X^*)، طبق رابطه $X/(Y_2 - Y_1)$ نشان می‌دهند.

مطابق نمودارهای ارائه شده در شکل ۵، مشاهده می‌گردد که متوسط فشارهای لحظه‌ای همواره دارای تغییرات نوسانی می‌باشد. ضریب Ψ در محدوده بالادست حوضچه، ابتدا دارای روند کاهشی بوده و پس از طی مسیر کوتاه، افزایش یافته و در محدوده انتهای پرش هیدرولیکی، تقریباً برابر با یک می‌گردد. در این نمودارها، داده‌های اندرس (۱۹۹۰)، پین هیرو (۱۹۹۵) و مارکز و همکاران (۱۹۹۷) که مربوط به حوضچه‌های آرامش صاف (بدون بلوک و آستانه انتهایی) می‌باشند، ارائه شده‌اند.

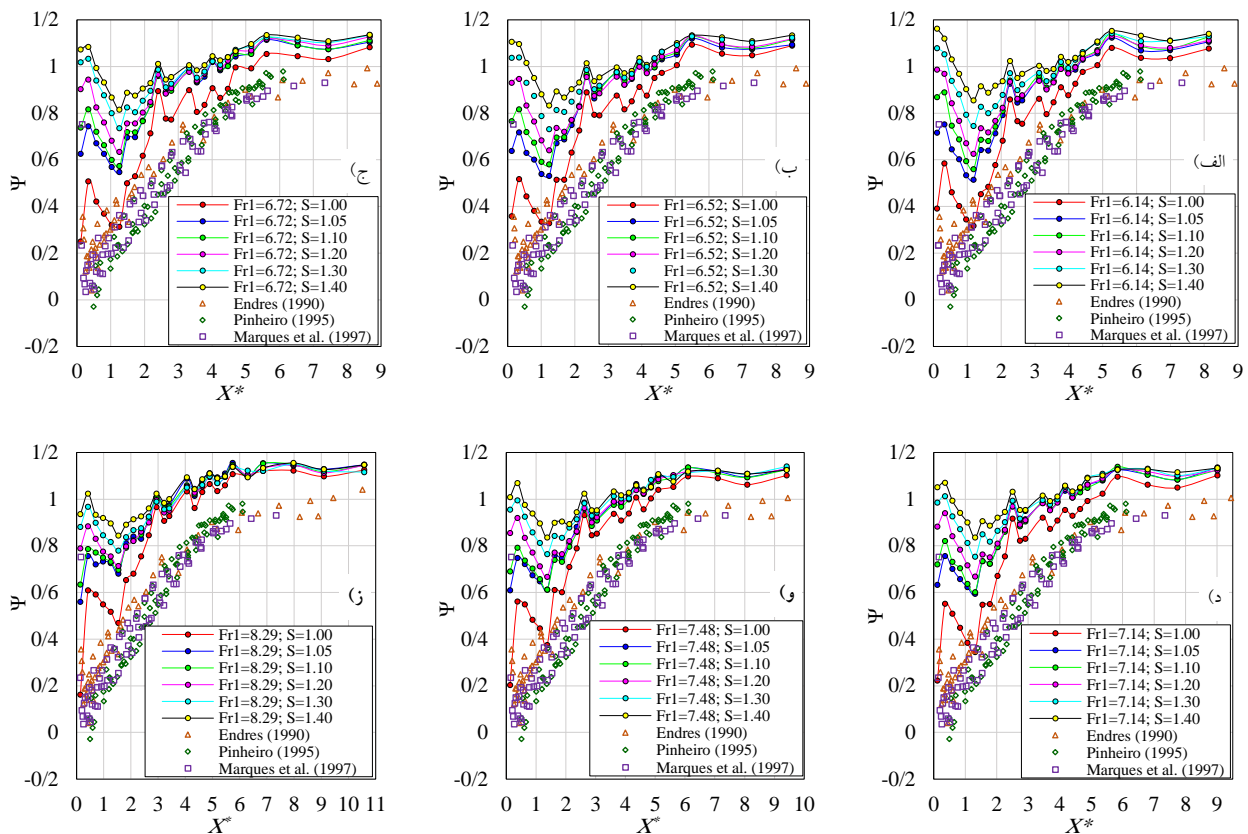
با توجه به کاهش مقادیر عمق ثانویه پرش آزاد (Y_2) در حوضچه آرامش تیپ دو USBR در مقایسه با حوضچه صاف، مقادیر ضریب Ψ در تحقیق حاضر برای پرش آزاد در محدوده $X^* \geq 1$ ، بیشتر از مقادیر حوضچه‌های صاف می‌باشند. روند تغییرات ضریب Ψ به نحوی است که در پایین‌دست در محدوده $X^* \approx 7$ تقریباً ثابت می‌گردد.

بررسی نمودارهای فشار متوسط نشان می‌دهد که در حوضچه به کار رفته در تحقیق حاضر (USBR)

تیپ دو)، عمده تغییرات فشار، به خاطر عدم وجود انحنای قائم در پنجه سرریز (تعبیه بلوک‌های پای تندآب)، در ناحیه تأثیر جت در حوضچه آرامش رخ می‌دهد. در محدوده $X^* \leq 1$ ، روند تغییرات ضریب Ψ در مقایسه با تحقیق سایرین، دارای اختلاف قابل توجه می‌باشد. مقادیر فشار برای نزدیکترین نقاط فشار به پنجه سرریز، که در آن، جت آب در حوضچه آرامش تیپ دو USBR تشکیل می‌گردد، بیشتر از داده‌های سایرین در حوضچه‌های آرامش صاف می‌باشند. در حوضچه‌های صاف، به خاطر وجود انحنا بین حوضچه آرامش و سرریز اوجی، مقادیر فشار در ابتدای حوضچه، تا حدودی کاهش می‌یابند.

در حوضچه آرامش تیپ دو USBR، به خاطر وجود بلوک‌های پای تندآب، یک کاهش ناگهانی در مقادیر فشار تا موقعیت تقریبی $X^* \approx 1$ رخ می‌دهد. از این نقطه به بعد، مقادیر فشار متوسط اندازه‌گیری شده، دارای الگوی مشابه با تحقیق سایرین بوده و با شیب تقریباً یکنواخت، تا موقعیت $X^* \approx 4$ افزایش می‌یابد. سپس، روند افزایشی مقادیر فشار متوسط تا موقعیت تقریبی $X^* \approx 7$ با شیب ملایم‌تر ادامه یافته که انتهای تأثیر پرش هیدرولیکی را نشان می‌دهد.

نتایج نواکوسکی و همکاران (۲۰۱۷)، نشان داد که مشابه شرایط تحقیق حاضر، مقادیر فشار در ابتدای حوضچه ($X^* \leq 1$)، بیشتر از مقادیر متناظر در حوضچه‌های صاف بوده و دارای روند کاهشی می‌باشند. با توجه به تعداد زیاد پله‌های به کار رفته در سرریز پله‌ای تحقیق مذکور، نزدیکترین نقاط به سرریز اوجی دارای مقادیر بیشتری در مقایسه با تحقیق حاضر می‌باشند.



شکل ۵ - تغییرات طولی ضریب Ψ به ازای استغراق‌های مختلف و اعداد فرود اولیه متفاوت:

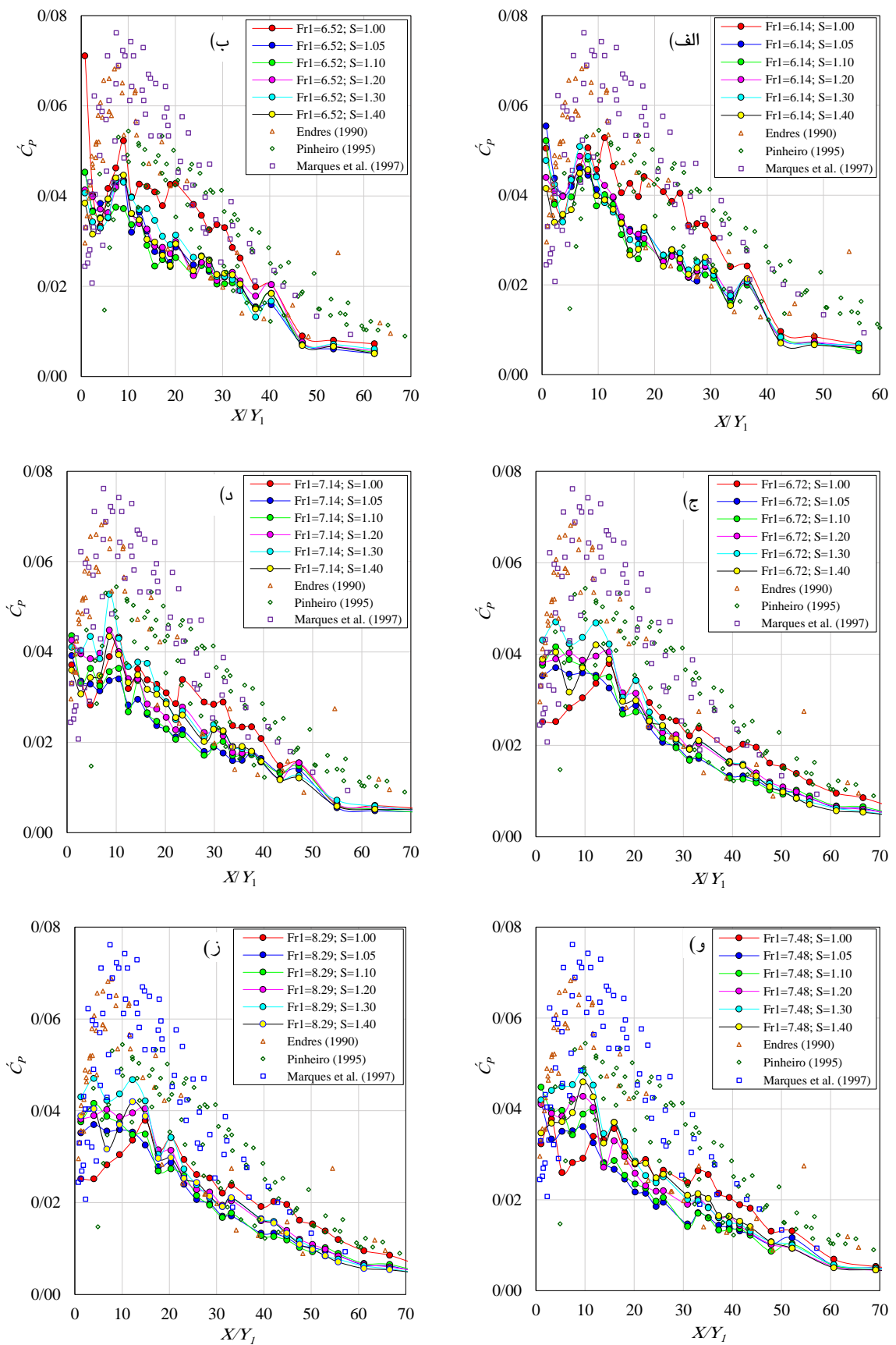
(الف) $Fr_1=6.14$ ، (ب) $Fr_1=6.52$ ، (ج) $Fr_1=6.72$ ، (د) $Fr_1=7.14$ ، (و) $Fr_1=7.48$ و (ز) $Fr_1=8.29$.

ضریب شدت نوسانات فشار

نمودار تغییرات ضریب بی بعد C'_P در امتداد پرش هیدرولیکی، که از رابطه ۱ استخراج شده است، با استغراق‌های مختلف، برای اعداد فرود مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. محور افقی نمودارها، موقعیت نسبی نقاط فشار از ابتدای حوضچه را به صورت X/Y_1 نشان می‌دهند. با افزایش دبی جریان، انرژی جنبشی و جزء نوسانی فشار ($P' = P - P_m$) که معرف شدت تلاطم جریان می‌باشد، افزایش می‌یابد. در حوضچه آرامش به کار رفته در تحقیق حاضر، به خاطر وجود بلوک‌های پای تندآب در داخل حوضچه، برخی از نقاط کف به طور مستقیم با جت ناشی از پرش، برخورد نداشته و در نتیجه، مقادیر ضریب C'_P در این نقاط، کاهش می‌یابند. به عبارت دیگر، بلوک‌های تعبیه شده در کف حوضچه تیپ دو USBR، سبب پخشیدگی جت ناشی از

پرش هیدرولیکی می‌گردد.

در پایین‌دست سرریزها (متفاوت از شرایط درجه‌های کشویی)، مطابق رابطه عدد فرود اولیه جریان ($Fr_1 = V_1 / (g \cdot Y_1)^{0.5}$)، با افزایش دبی جریان و نرخ رشد عمق اولیه پرش هیدرولیکی (Y_1) بیشتر از نرخ رشد سرعت جریان اولیه (V_1) می‌باشد. لذا با افزایش دبی جریان، به خاطر ناچیز بودن تأثیر تغییرات سرعت جریان در مقایسه با عمق اولیه، عدد فرود اولیه پرش کاهش می‌یابد. در نتیجه، در پایین‌دست سرریزها، با افزایش عدد فرود در محل عمق اولیه (کاهش دبی جریان ورودی)، نرخ کاهش شدت نوسانات فشار بیشتر از نرخ کاهش انرژی جنبشی می‌باشد. لذا با افزایش عدد فرود اولیه، ضریب C'_P کاهش می‌یابد. این موضوع در نتایج مارکز و همکاران (۱۹۹۷)، نوکوسکی و همکاران (۲۰۱۷)، پادولانو و همکاران (۲۰۱۷) تأیید شده است.



شکل ۶ - تغییرات طولی ضریب C'_p به ازای استخرهای مختلف و اعداد فرود اولیه متفاوت:

(الف) $Fr_1=6.14$, (ب) $Fr_1=6.52$, (ج) $Fr_1=6.72$, (د) $Fr_1=7.14$, (و) $Fr_1=7.48$ و (ز) $Fr_1=8.29$.

نتایج نشان می‌دهد که مقادیر ضریب C'_p در بالادست پرش هیدرولیکی، در ابتدا دارای روند افزایشی می‌باشد. پس از رسیدن به مقدار حداکثر، ضریب C'_p سیر نزولی داشته و با افزایش فاصله از پنجه پرش در پایین دست پرش، به مقدار تقریباً ثابت می‌رسد. در طول پرش هیدرولیکی، ضریب C'_p دارای تغییرات نوسانی می‌باشد. مشاهده می‌شود که مقدار حداکثر ضریب C'_p در محدوده ابتدایی حوضچه آرامش ($10 \leq X/Y_1 \leq 20$) رخ می‌دهد. به نظر می‌رسد که تغییرات نوسانی ضریب C'_p در کف حوضچه آرامش، تابع عوامل متعددی از قبیل میزان تلاطم جریان، تشکیل گردابه‌ها^۱ و حرکت آنها در طول پرش و غیره می‌باشد. به نحوی که در برخی از نقاط، برخورد مستقیم گردابه‌ها با کف حوضچه، افزایش شدید و ناگهانی فشار وارده بر کف و در نتیجه، ضریب C'_p را به دنبال دارد. مطابق نمودارهای ارائه شده در شکل ۶، با توجه به برخورد مستقیم جت آب ورودی از طریق تندآب سرریز به قسمت ابتدایی کف حوضچه، نوسانات فشار کف در محدوده $X/Y_1 \leq 20$ افزایش می‌یابند. در تحقیق توسو و باورز (۱۹۸۸)، موقعیت مقدار پیک ضریب C'_p تقریباً در فاصله ده برابر عمق اولیه پرش هیدرولیکی گزارش شده است.

اندازه‌گیری فشار تحت تأثیر شرایط آزمایشگاهی شامل عدد رینولدز، دقت اندازه‌گیری و روش نصب ترانسیدوسرها، طول شیلنگ‌های مورد استفاده، قطر نقاط فشار و سایر موارد می‌باشد. پارامترهای مورد استفاده در تحقیق حاضر، بی‌بعد می‌باشند. با این حال، این موضوع کافی نبوده و نشان دهنده خطای بالقوه در مقیاس فشارها می‌باشد. آزمایش‌های تکمیلی در فلوم‌های با ابعاد مختلف به منظور بررسی اثرات مقیاس پیشنهاد می‌گردد. مطابق شکل ۶، تغییرات ضریب C'_p در شرایط پرش مستغرق و آزاد نسبت به هم، در دو محدوده بالادست ($X/Y_1 \leq 10$) و محدوده پایین دست

در شرایط پرش مستغرق ($S > 1$)، روند تغییرات ضریب C'_p با کاهش عدد فرود اولیه (افزایش دبی جریان ورودی) به نحوی است که در محدوده $X/Y_1 \leq 10$ از یک روند خاصی تبعیت نمی‌نماید. برای محدوده $X/Y_1 > 10$ بسته به میزان استغراق پرش، متوسط تغییرات ضریب C'_p در دبی‌های مختلف، از ۱۷/۰ تا ۸۷/۵ درصد، متغیر می‌باشد. در جدول ۲، درصد تغییرات متوسط مقادیر ضریب C'_p در دو محدوده حوضچه آرامش، در شرایط پرش مستغرق نسبت به پرش آزاد ارائه شده است. در جدول ۲، علامت منفی به منزله کاهش مقادیر ضریب C'_p در پرش مستغرق در مقایسه با پرش آزاد می‌باشد. روند تغییرات ضریب C'_p در محدوده $X/Y_1 \leq 10$ ، رفتار مشخصی را نشان نمی‌دهد. در تطابق با نتایج لوپاردو و همکاران (۲۰۰۴)، در محدوده بالادست ($X/Y_1 \leq 10$)، با کاهش عدد فرود اولیه، ضریب C'_p افزایش می‌یابد. اگر چه، این رفتار، برای تمام فاکتورهای استغراق، مورد تأیید نمی‌باشد. در این ناحیه، مقادیر ضریب C'_p مربوط به مقادیر دبی جریان کمتر (اعداد فرود بیشتر)، در پرش مستغرق بیشتر از پرش آزاد می‌باشد. به نظر می‌رسد که در این ناحیه، شدت تلاطم پرش مستغرق، بیشتر از پرش آزاد می‌باشد. داده‌های لانگ و همکاران (۱۹۹۰) نشان می‌دهند که پرش مستغرق، دارای میدان سرعت سه‌بعدی با گردابه‌های قائم در پایین دست درجه کثویی می‌باشد. این موضوع احتمالاً در افزایش شدت تلاطم بزرگ مقیاس، تأثیر دارد.

جدول ۲ - درصد تغییرات متوسط مقادیر ضریب $C'P$ در پرش مستغرق نسبت به پرش آزاد.

Fr_1						S	X^*
۸/۲۹	۷/۴۸	۷/۱۴	۶/۷۲	۶/۵۲	۶/۱۴		
+۲۷/۲	+۲۰/۱	+۰/۶	-۱۵/۹	-۱۰/۰	+۶/۸	۱/۰۵	
+۳۵/۶	+۲۸/۰	+۶/۹	+۰/۴	-۱۴/۹	-۰/۵	۱/۱۰	
+۳۳/۴	+۳۲/۱	+۲۰/۸	+۱/۶	-۱۱/۷	+۲/۸	۱/۲۰	$X/Y_1 \leq 10$
+۵۰/۳	+۴۶/۷	+۲۷/۳	+۱۷/۱	-۱۶/۱	+۲/۶	۱/۳۰	
+۳۴/۷	+۲۸/۵	+۵/۳	-۰/۶	-۱۴/۶	-۹/۱	۱/۴۰	
-۲۵/۴	-۲۶/۷	-۲۷/۰	-۳۵/۹	-۲۸/۴	-۲۵/۴	۱/۰۵	
-۲۵/۵	-۲۷/۱	-۲۵/۵	-۳۶/۰	-۳۱/۸	-۳۰/۳	۱/۱۰	
-۱۸/۱	-۱۸/۲	-۱۷/۵	-۳۰/۹	-۲۶/۸	-۲۴/۳	۱/۲۰	$X/Y_1 > 10$
-۱۹/۱	-۱۲/۴	-۱۱/۲	-۲۸/۳	-۲۲/۰	-۲۴/۰	۱/۳۰	
-۱۹/۶	-۹/۶	-۱۴/۷	-۲۷/۷	-۲۷/۰	-۲۷/۳	۱/۴۰	

دو USBR، در تطابق با حوضچه‌های صاف می‌باشد. با توجه به کاهش شدت نوسانات فشار در پرش مستغرق نسبت به آزاد (برای یک دبی معین)، انرژی جریان در داخل حوضچه آرامش بصورت کامل مستهلک نگردیده و به پایین‌دست منتقل می‌گردد. البته تلاش برای کاهش ضریب $C'P$ ، در شرایط جریان آزاد (استفاده از موانع) به منظور استهلاک بیشتر انرژی می‌باشد. با استغراق جریان، جلوی استهلاک بیشتر انرژی گرفته شده و شدت نوسانات فشاری که در همان دبی جریان مشخص اتفاق می‌افتاد، کاهش می‌یابد. لذا نوسانات فشار باقیمانده در بیرون از حوضچه، خودش را نشان می‌دهد. وجود موانع، باعث کاهش مقادیر ضریب $C'P$ در پرش هیدرولیکی می‌گردند. در محدوده $X/Y_1 > 10$ ، مقادیر ضریب $C'P$ در پرش مستغرق نسبت به آزاد، کاهش یافته است. با افزایش عدد فرود اولیه، اختلاف مقادیر $C'P$ در شرایط مستغرق و آزاد نسبت به هم، کاهش می‌یابد. برای اعداد فرود حداقل، اختلاف مقادیر ضریب مذکور در دو حالت پرش آزاد و مستغرق، قابل توجه می‌باشد. در جدول ۳، مقادیر ضریب $C'P_{max}$ در شرایط مختلف جریان ارائه شده است.

برای محدوده $X/Y_1 > 10$ ، توزیع کلی داده‌ها نشان می‌دهد که در پرش مستغرق، مقادیر ضریب $C'P$ ، با افزایش استغراق، دارای روند افزایش می‌باشد. به بیان دیگر، درصد کاهش مقادیر جدول ۲ برای استغراق‌های بالاتر، کمتر از استغراق‌های پایین‌تر می‌باشد. در پرش مستغرق، حداکثر میزان کاهش مقادیر $C'P$ در محدوده $X/Y_1 > 10$ در مقایسه با پرش آزاد، در حدود ۳۶ درصد بوده که مربوط به عدد فرود $6/72$ و فاکتور استغراق $1/1$ می‌باشد. حداقل میزان کاهش مقادیر $C'P$ در محدوده $X/Y_1 > 10$ در پرش مستغرق نسبت به پرش آزاد، در حدود $9/6$ درصد بوده که مربوط به عدد فرود $7/48$ و فاکتور استغراق $1/4$ می‌باشد. مطابق نتایج لوپاردو و همکاران (۲۰۰۴)، در محدوده $X/Y_1 > 12$ ، افزایش استغراق باعث افزایش ضریب $C'P$ می‌گردد. به نحوی که، مقدار $C'P$ در پرش آزاد به اندازه نصف یا کمتر از آن در استغراق حداکثر می‌گردد. البته تحقیق مذکور مربوط به پرش مستغرق در پایین‌دست دریچه کشویی بوده و در تحقیق حاضر، پرش مستغرق در پایین‌دست سرریز، بررسی شده است. در محدوده پایین‌دست حوضچه، نتایج ضریب $C'P$ در پرش آزاد در داخل حوضچه تپ

جدول ۳ - مقادیر اندازه‌گیری شده ضریب C'_{Pmax} در شرایط مختلف جریان.

Fr ₁						S
۸/۲۹	۷/۴۸	۷/۱۴	۶/۷۲	۶/۵۲	۶/۱۴	
۰/۰۳۸	۰/۰۳۸	۰/۰۴۳	۰/۰۵۰	۰/۰۵۲	۰/۰۵۳	۱/۰۰
۰/۰۳۷	۰/۰۴۱	۰/۰۳۹	۰/۰۴۲	۰/۰۴۵	۰/۰۵۵	۱/۰۵
۰/۰۴۲	۰/۰۴۵	۰/۰۴۴	۰/۰۴۴	۰/۰۴۵	۰/۰۵۲	۱/۱۰
۰/۰۴۰	۰/۰۴۳	۰/۰۴۵	۰/۰۴۳	۰/۰۴۳	۰/۰۴۹	۱/۲۰
۰/۰۴۷	۰/۰۴۸	۰/۰۵۳	۰/۰۴۸	۰/۰۴۳	۰/۰۵۱	۱/۳۰
۰/۰۴۲	۰/۰۴۶	۰/۰۴۳	۰/۰۴۳	۰/۰۴۵	۰/۰۴۶	۱/۴۰

- به خاطر وجود بلوک‌های پای تندآب، نقاط ابتدای حوضچه ($X^* \leq 1$) در پرش مستغرق نسبت به پرش آزاد، دارای مقادیر فشار بیشتری در مقایسه با حوضچه‌های صاف می‌باشد. با توجه به کاهش عمق ثانویه در پرش آزاد، مقادیر ضریب Ψ در محدوده $X^* \geq 1$ ، بیشتر از مقادیر حوضچه‌های صاف می‌باشند. مقادیر ضریب Ψ در محدوده $X^* \approx 7$ تقریباً ثابت و برابر با یک می‌گردند.

- مقادیر ضریب C'_P در ابتدا دارای روند افزایشی بوده و پس از رسیدن به مقدار حداکثر، سیر نزولی داشته و در پایین‌دست به مقدار نسبتاً ثابتی می‌رسند. مقادیر حداکثر ضریب C'_P در محدوده $10 \leq X/Y_1 \leq 20$ رخ می‌دهند. در محدوده $X/Y_1 \leq 10$ ، برای اعداد فرود بزرگتر، مقادیر ضریب C'_P در پرش مستغرق بیشتر از پرش آزاد می‌باشد. برای $X/Y_1 > 10$ ، مقادیر ضریب C'_P در پرش مستغرق نسبت به پرش آزاد، کاهش می‌یابد. در پرش مستغرق، متوسط مقدار کاهش مقادیر C'_P در محدوده $X/Y_1 > 10$ نسبت به پرش آزاد، حدود ۲۵ درصد می‌باشد.

- وجود موانع در کف حوضچه، باعث می‌گردد که مقادیر ضریب C'_{Pmax} در پرش آزاد، در حدود ۳۰ درصد کاهش یابد. با افزایش عدد فرود اولیه، مقادیر ضریب C'_{Pmax} کاهش می‌یابد.

- به منظور بررسی اثرات مقیاس، آزمایش‌های تکمیلی در فلوم‌های آزمایشگاهی با ابعاد مختلف و اعداد فرود اولیه متفاوت در محدوده ۴/۵ تا ۹ پیشنهاد می‌گردد.

مقدار حداکثر ضریب C'_P در پرش آزاد، مربوط به $Fr_1=6.14$ بوده که برابر با ۰/۰۵۳ می‌باشد. مقادیر ضریب C'_{Pmax} داده‌های آندرس (۱۹۹۰)، پین هیرو (۱۹۹۵) و مارکز و همکاران (۱۹۹۷)، به ترتیب برابر با ۰/۰۶۹، ۰/۰۵۴ و ۰/۰۷۶ می‌باشند. درصد کاهش ضریب C'_{Pmax} در مقایسه با داده‌های محققین فوق‌الذکر، به ترتیب ۲۳/۲، ۳/۱ و ۳۰/۸ درصد می‌باشند. مطابق جدول ۳، با افزایش Fr_1 ، مقادیر ضریب C'_{Pmax} در پرش آزاد و مستغرق، کاهش می‌یابد. نرخ کاهش این مقادیر در پرش آزاد، بیشتر از پرش با حداکثر استغراق می‌باشد. با افزایش استغراق، تغییرات C'_{Pmax} در اعداد فرود مختلف، کاهش می‌یابد. در اعداد فرود حداقل، ضریب C'_{Pmax} در پرش آزاد نسبت به مستغرق، دارای مقادیر بیشتری می‌باشند. با کاهش شدت نوسانات فشار در دبی جریان‌های کم، اختلاف بین مقادیر ضریب C'_{Pmax} در دو حالت آزاد و مستغرق، به حداقل می‌رسد. تغییرات ضریب C'_{Pmax} نسبت به فاکتور استغراق برای مقادیر مختلف Fr_1 ، از یک روند معینی تبعیت نمی‌نماید. برای مقادیر عدد فرود حداقل، با افزایش استغراق، مقادیر ضریب C'_{Pmax} ، دارای روند کاهشی می‌باشد و بالعکس.

نتیجه‌گیری کلی

در تحقیق حاضر، نوسانات فشار در پرش هیدرولیکی مستغرق و آزاد در کف حوضچه آرامش تیپ دو USBR مورد بررسی قرار گرفته و به طور خلاصه، نتایج زیر حاصل گردید:

منابع مورد استفاده

- Abbaspour A, Farsadizadeh D, Hosseinzadeh Dalir A and Sadraddini AA, 2009. Numerical simulation of hydraulic jump on corrugated bed using FLUENT model. *Water and Soil Science- University of Tabriz*, 20(2): 83-96. [In Farsi]
- Anonymous, 1987. Spillway, Pp. 339-434. In United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, USBR, Design of small dams. A Water Resources Technical Publication, 3rd ed., Washington: US Government Printing Office.
- Chanson H and Carvalho RF, 2015. Hydraulic jumps and stilling basins, Pp. 65-104. In Chanson H, (ed.), Energy Dissipation in Hydraulic Structures; CRC Press: Leiden, The Netherlands.
- Endres LAM, 1990. Contribution to development a system for acquisition and processing of instantaneous pressure data in laboratory. Master Thesis, Institute for Hydraulic Research. Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre. [In Portuguese]
- Farhoudi F, Sadat-Helbar, SM and Aziz N, 2010. Pressure fluctuation around chute blocks of SAF stilling basins. *Journal of Agricultural Science and Technology* 12: 203-212.
- Fiorotto V and Rinaldo A, 1992a. Turbulent pressure fluctuations under hydraulic jumps. *Journal of Hydraulic Research* 30(4): 499-520.
- Fiorotto V and Rinaldo A, 1992b. Fluctuating uplift and lining design in spillway stilling basins. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 118(4) 578-597.
- Habibzadeh A, Wu S, Ade F, Rajaratnam N and Loewen, MR, 2011. Exploratory study on submerged hydraulic jumps with blocks. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 137(6): 706-710.
- Hasanpour N, 2018. Effect of artificial roughness on the characteristics and pressure fluctuations of hydraulic jump in stilling basins with gradual expansion and horizontal bed. PhD Thesis in water Engineering. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz. [In Farsi]
- Karimi M, Musavi Jahromi SH and Shafai-Bajestan M, 2017. Pressure fluctuations in hydraulic jump investigation of stilling basin at sudden expansion. *Amirkabir Journal of Civil Engineering* 49(2): 79-81.
- Kazemi F, Khodashenas SR and Sarkardeh H, 2016. Experimental study of pressure fluctuation in stilling basins. *International Journal of Civil Engineering* 14(1):13-21.
- Long D, Steffler PM and Rajaratnam N, 1990. LDA study of flow structure in submerged hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Research* 28(4): 437-460.
- Lopardo RA, Fattor CA, Lopardo MC and Casado JM, 2004. Instantaneous Pressure Field on a Submerged Jump Stilling Basin. *Hydraulics of Dams and River Structures*. London: AA Balkema.
- Marques MG, Drapeau J and Verrette JL, 1997. Pressure fluctuation coefficient in a hydraulic jump. *Brazilian Journal of Water Resources, RBRH* 2 (2): 45-52. [In Portuguese]
- Marques MG, Almeida FM and Endres LAM, 1999. Non-dimensioning of mean pressures in hydraulic jump dissipation basins. In: Xiii Brazilian Symposium on Water Resources. [In Portuguese]
- Nasiri K, Kavianpour MR and Haghghi S, 2012. The baffle blocks effects of pressure characteristics on USBR III basin floor. *Applied Mechanics and Materials* 212-213: 821-825.
- Novakoski CK, Conterato E, Marques M, Teixeira ED, Lima GA and Alves AAM, 2017. Macro-turbulent characteristics of pressures in hydraulic jump formed downstream of a stepped spillway. *Brazilian Journal of Water Resources, RBRH* 22(22): 1-8.
- Padulano R, Fecarotta O, Giudice GD and Carravetta A, 2017. Hydraulic design of a USBR type II stilling basin. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE* 143(5): 1-9.
- Parsamehr P, Farsadizadeh D, Hosseinzadeh Dalir A, Nasr Esfahani MJ and Abbaspour A, 2018. Investigation of pressure fluctuations of hydraulic jump on rough bed. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering (JISE)*, 41(2): 197-210. [In Farsi]
- Pinheiro AAN, 1995. Hydrodynamic actions in thresholds for energy dissipation basin by hydraulic jumps. Submitted for the Doctor of Civil Engineering degree, Technical University of Lisbon, Portugal. [In Portuguese]
- Toso JW and Bowers CE, 1988. Extreme pressure in hydraulic jump stilling basin. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 114(8): 829-843.
- Yousefi K, Heydari M, Banejad H and Karimi M, 2019. Pressure fluctuations on the bed of submerged hydraulic jump. *Journal of Water and Wastewater* 30(4): 51-66. (In Farsi)