

Pressure Fluctuations on the Bed of Submerged Hydraulic Jump

K. Yousefi¹, M. Heydari², H. Banejad³, M. Karimi⁴

1. PhD Student of Water Structures, Dept. of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
2. Assist. Prof., Dept. of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
3. Assoc. Prof., Dept. of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University, Mashhad, Iran
(Corresponding Author) banejad@um.ac.ir
4. Assist. Prof., Dept. of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Payame-Nur University, Anzali, Iran

(Received June 28, 2018 Accepted Sep. 30, 2018)

To cite this article :

Yousefi, K., Heydari, M., Banejad, H., Karimi, M., 2019, "Pressure fluctuations on the bed of submerged hydraulic jump." Journal of Water and Wastewater, 30(4), 51-66. Doi: 10.22093/wwj.2018.137901.2707. (In Persian)

Abstract

The hydraulic jump has many usages in transport and treatment of water and wastewater. It may be considered macroscopically as a rapidly varied flow with strong vortices which generate macro turbulent fluctuations. The pressure fluctuation due to turbulence must be carefully considered in designation of hydraulic structures. In addition, cavitation, abrasion, and vibration due to the intense turbulence and pressure fluctuation may also contribute significantly to damage of a stilling basin. This paper discusses the characteristics of pressure fluctuation in submerged hydraulic jump downstream of spillways and also the effects of submergence ratio on the pressure fluctuation. The experiments were carried out in a rectangular conduit (constituted from a 30° spillway, 1.8m in height and a horizontal flume with 0.3m width and 3m length), for the Froude number of 7.07 and also different ratios of submergence. Pressure data were recorded by pressure transducers having sampling rate of 100 Hz. Experiments show that intensity of pressure fluctuation on the hydraulic jump bed is a function of Froude number a relative distance from basin's beginning and submergence ratio. Increasing submergence ratio decreases the coefficients of pressure fluctuation (C_p^- , C_p^+ , C_p'), so that increasing the s. r. from 1 to 2, the $C_{p_{max}}'$ decreases 89%. Also, the coefficient of standard deviation C_p' and the extreme coefficients of pressure fluctuation C_p^- and C_p^+ decrease by increasing the s. r., and maximum value of C_p^- and C_p^+ occurs in the range of $X/Y_1 \leq 20$. Therefore, this range has more importance from the structural designation view and the higher ratio of submergence supports the higher confidence for designation.

Keywords: Submerged Hydraulic Jump, Submergence Ratio, Pressure Fluctuation Rate, Transducer.

مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۰، شماره ۴، صفحه: ۶۶-۵۱

بررسی نوسانات فشار در بستر پرش هیدرولیکی مستغرق

کامران یوسفی^۱، مجید حیدری^۲، حسین بانژاد^۳، مهناز کریمی^۴

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

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

(نویسنده مسئول) banejad@um.ac.ir

۴- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه پیام نور، انزلی، ایران

پذیرش ۹۷/۷/۸

(دریافت ۹۷/۴/۷)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:

یوسفی، ک.، حیدری، م.، بانژاد، ح.، کریمی، م.، ۱۳۹۸، "بررسی نوسانات فشار در بستر پرش هیدرولیکی مستغرق"

مجله آب و فاضلاب، ۳۰(۴)، ۶۶-۵۱. Doi: 10.22093/wwj.2018.137901.2707

چکیده

پرش هیدرولیکی دارای کاربردهای فراوانی در انتقال و تصفیه آب و فاضلاب است. این پدیده از دیدگاه ماکروسکوپی، یک جریان متغیر ناگهانی است که با گرداب‌های قوی همراه است و نوسانات تلاطمی بزرگی را ایجاد می‌کند. اثر فشارهای نوسانی ناشی از تلاطم در پرش با اهمیت است و باید در طراحی سازه مورد توجه قرار گیرد. نوسانات فشار می‌تواند با فرسایش و لرزش موجب آسیب در حوضچه آرامش شود. در این پژوهش به مشخصات تلاطمی پرش هیدرولیکی مستغرق در پایین دست یک سرریز بلند و بررسی اثرات درجه استغراق پرش در میزان ضرایب نوسانات فشار پرداخته شد. به این منظور آزمایش‌ها در یک مجرای مستطیلی شامل سرریزی با زاویه ۳۰ درجه و ارتفاع ۱/۸ متر و کانال افقی به عرض ۳/۰ و طول ۳ متر، برای عدد فرود ۷/۰۷ با درجات مختلف استغراق انجام شد. داده‌های فشار با استفاده از مبدل فشار با فرکانس نمونه‌برداری ۱۰۰ هرتز ثبت شد. آزمایش‌ها نشان داد شدت نوسانات فشار در بستر پرش هیدرولیکی مستغرق تابعی از عدد فرود، فاصله نسبی از ابتدای حوضچه و درجه استغراق است. با افزایش درجه استغراق، ضرایب نوسانات فشار (C_p^+ ، C_p^- و C_p') کاهش می‌یابد به طوری که با افزایش درجه استغراق از ۱ تا ۲، حداکثر ضریب انحراف معیار (C_{pmax}') ۸۹ درصد کاهش یافت. همچنین حداکثر ضرایب C_p^+ و C_p^- در کف حوضچه آرامش در فاصله کمتر از ۲۰ برابر عمق اولیه پرش ($X/Y1 \leq 20$) از محل شروع حوضچه رخ داد. بنابراین فاصله مذکور به لحاظ طراحی سازه‌ای حوضچه حساسیت بیشتری دارد و درجه استغراق بیشتر در جهت اطمینان طراحی است.

واژه‌های کلیدی: پرش هیدرولیکی مستغرق، درجه استغراق، شدت نوسانات فشار، مبدل فشار

۱- مقدمه

موقعیت پنجه پرش و ایجاد گرداب‌های بزرگ به صورت شبه تناوبی قابل مشاهده است. آشفتگی و تلاطم در پرش هیدرولیکی موجب استهلاک انرژی جریان فوق بحرانی می‌شود، لذا از این پدیده به‌عنوان مستهلک کننده انرژی در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی نظیر سرریزها، دریچه‌ها، تندآبها و غیره استفاده می‌شود (Wang et al., 2014).

پرش هیدرولیکی تغییر ناگهانی جریان از حالت فوق بحرانی به زیر بحرانی است که همراه محدوده وسیعی از گرداب‌ها با مقیاس بزرگ و کوچک است. ناحیه غلتابی پرش بلافاصله پایین دست پنجه پرش با وجود گرداب‌هایی در مقیاس بزرگ و جریان‌های چرخشی تشکیل می‌شود. طبیعت نوسانی جریان به صورت نوسان طولی

برخاستن و کنده شدن دال‌های کف حوضچه آرامش می‌شود. اثر دیگر نوسانات، ایجاد خستگی^۲ در مصالح به‌کار رفته و اعمال فشار دینامیکی زیاد ناشی از بارگذاری و باربرداری متناوب و کاهش مقاومت سازه و در نتیجه تخریب آن می‌شود. وقوع پدیده کاویتاسیون نیز یکی از اثرات دیگر نوسانات فشار بوده و باعث جدایش جریان از سازه و تخریب موضعی ناشی از فشارهای منفی همراه با نوسانات شدید سازه می‌شود.

خصوصیات متوسط پرش هیدرولیکی در سطح گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته است در حالی که در زمینه خصوصیات تلاطمی پرش، مطالعات نسبتاً محدودی انجام پذیرفته است. توسو و باورز در سال ۱۹۸۸ اطلاعاتی را در مورد تخریب صورت گرفته در پروژه برقایی کارنافولی^۳ ارائه نمودند و علت آن را به نوسانات فشار در پرش هیدرولیکی نسبت دادند (Toso and Bowers, 1988).

اکبری و همکاران در سال ۱۹۸۲ مقالاتی در زمینه نحوه اندازه‌گیری فشارهای هیدرودینامیکی و تعیین مقادیر حداکثر و حداقل این فشارها و محل تشکیل آنها منتشر کردند. همچنین پژوهش‌هایی را در رابطه با زمان برداشت نوسان‌های فشار انجام دادند و نشان دادند که از ۶۰ ثانیه به بعد برداشت نوسان‌های فشار مستقل از زمان می‌شوند (Akbari et al., 1982).

فیوروتو و رینالدو در سال ۱۹۹۲ تأثیر شکاف‌های اطراف دال در کف حوضچه‌های آرامش و نفوذ آب در زیر این دال بر نوسانات فشار هیدرودینامیکی را مورد بررسی قرار داده و معیارهایی برای طراحی دال بتنی به‌صورت تئوری ارائه نمودند (Fiorotto and Rinaldo, 1992).

باخماتف در سال ۱۹۶۲ یک رابطه ریاضی ساده را برای تخمین مقدار نوسانات فشار در یک حوضچه آرامش یا کانال روباز به‌کار برد و شدت نسبی تلاطم را به‌صورت σ/V تعریف نمود. او در پژوهش خود نشان داد که شدت نسبی تلاطم می‌تواند مقداری بین ۰/۵ تا ۰/۷۵ باشد (Bakhmateff, 1962).

الدر در سال ۱۹۶۱ اطلاعاتی در مورد ارتباط مدل و نمونه اصلی، کفایت قانون تشابه فرودی به‌عنوان پایه‌ای برای مقیاس‌گذاری در محدوده فرکانس پایین در پرش هیدرولیکی ارائه

این پدیده همراه با آشفستگی جریان است که در نتیجه آن مقادیری هوا وارد سیال می‌شود. پرش هیدرولیکی دارای کاربردهای فراوانی است که اهم آنها عبارت‌اند از: استهلاك انرژی جریان و نهایتاً محافظت پایین‌دست، اختلاط سریع مواد شیمیایی لازم برای تصفیه آب یا فاضلاب، هوادهی جریان و کلرزدایی فاضلاب (Abrishami and Hoseyni, 2017, Chaudhry, 2008).

هوادهی عبارت است از قرار دادن آب در معرض هوا برای خروج برخی ترکیبات فرار از آب و حل شدن برخی گازهای مفید در آب. هدف از هوادهی در تصفیه آب حذف طعم و بو، حل کردن برخی گازها، اکسید کردن آهن و منگنز و غیر محلول کردن آنها و حذف موادی است که در صورت وجود در مراحل بعد ایجاد مشکل می‌کنند. در تصفیه‌خانه‌های آب برای هوادهی از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود که روش ثقلی - آبشاری مبتنی بر تشکیل پرش هیدرولیکی از ساده‌ترین و اقتصادی‌ترین آنها است (IPBO, 2008).

همچنین فرایند انعقاد و لخته‌سازی در تصفیه شامل به هم زدن آب است که طی آن ذرات کلوئیدی معلق برای تماس و چسبیدن و نهایتاً ته‌نشینی به سمت یکدیگر رانده می‌شوند. این فرایند نیازمند افزودن و توزیع یکنواخت و سریع افزودنی‌های شیمیایی (اختلاط سریع) است. برای این کار روش‌های مختلفی اعم از مکانیکی یا استاتیکی هست. روش‌های مکانیکی نیازمند مصرف انرژی برق و مشمول استهلاك تجهیزات مکانیکی می‌باشند. در حالی که یک روش استاتیکی مبتنی بر پرش هیدرولیکی بی‌نیاز از مصرف انرژی و تجهیزات مکانیکی است و ضمن بهره‌برداری و نگهداری آسان، کم هزینه‌تر و مطمئن‌تر است (IPBO, 2008).

در مطالعه ساختار تلاطمی پرش هیدرولیکی شناخت اصول مکانیسم نیروهای مخرب از جمله نیروی زیرفشار، کاویتاسیون و سایر اشکال نیروهای هیدرودینامیکی از اهمیت زیادی برخوردار است. استهلاك انرژی و تلاطم جریان در حوضچه‌های آرامش با نوسانات شدید فشار همراه است. این نوسانات شدید به سه صورت حوضچه آرامش را تحت تأثیر قرار می‌دهند. یکی از این اثرات باعث ایجاد نیروی برخاست^۱ قابل توجهی در زیر سازه شده و باعث

² Fatigue³ Karnaphuli¹ Uplift

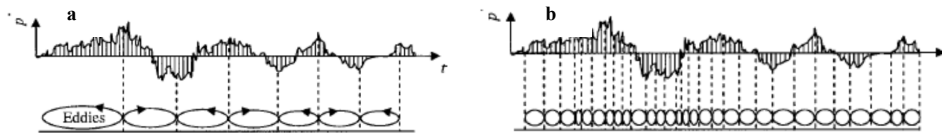


Fig. 1. a) Eddies in large scale and low frequency b) in small scale and high frequency
 شکل ۱- a) گرداب‌ها در مقیاس بزرگ و فرکانس کم و b) در مقیاس کوچک و فرکانس بالا

کردند و نشان دادند که توزیع طولی نوسانات فشار همگن نیست و بستگی به موقعیت x دارد در حالی که توزیع عرضی نوسانات فشار، همبستگی داشته و همگن است (Fiorotto and Rinaldo, 1992). فیوروتو و رینالدو در سال ۱۹۹۲ تأثیر شکاف‌های اطراف دال در کف حوضچه آرامش و نفوذ آب در زیر دال بر نوسانات فشار هیدرودینامیکی را مورد مطالعه قرار دادند (Fiorotto and Rinaldo, 1992)

همچنین آنها نشان دادند که نوسانات فشار باعث تخریب درزهای انبساطی بین دال‌ها می‌شود. 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 و سبب تخریب دال شود. ایشان معیار زیر را برای طراحی دال بتنی ارائه نمودند

$$\frac{s}{V_1^2/2g} > \Omega_2 \left(\frac{L_B}{Y_1}, \frac{L_B}{I_x} \right) (C_p^+ + C_p^-) \frac{\gamma}{\gamma_c - \gamma} \quad (2)$$

که در آن

s ضخامت معادل پوشش، Ω_2 ضریب بدون بعد تعدیل نیرو، L_B طول دال حوضچه استهلاک انرژی، Y_1 عمق اولیه پرش هیدرولیکی، I_x مقیاس طولی نوسانات فشار، C_p^+ حداکثر اختلاف فشار مثبت (بیشینه) از مقدار متوسط، C_p^- حداکثر اختلاف فشار منفی (کمینه) از مقدار متوسط، γ وزن مخصوص آب، γ_c وزن مخصوص بتن است.

مارکز و همکاران در سال ۱۹۹۷ برای نمایش توزیع طولی فشار متوسط و نوسانات فشار در طول پرش معادلات بدون بعد زیر را ارائه نمودند (Marques et al., 1997)

$$\Psi = \frac{P_x - Y_1}{(Y_2 - Y_1)} = f\left(\frac{X}{Y_2 - Y_1}\right) \quad (3)$$

نمود (Elder, 1961). همچنین نشان داد که تلاطم با فرکانس کم عمدتاً در نتیجه گرداب‌های بزرگ مقیاس و اختلالات سطحی پرش ناشی از غلبه نیروهای ثقل و نیروهای اینرسی هستند، در حالی که نوسانات با فرکانس بالا در نتیجه بخشی از تلاطمی است که در اثر نیروی لزجت می‌باشد (Liu and Li, 2007). شکل ۱- a و b تفاوت این نوسانات را نشان می‌دهد. عبدالقادر و الانگو در سال ۱۹۷۴، لوپاردو و سولاری در سال ۱۹۸۰، اکبری و همکاران در سال ۱۹۸۲، ضریب نوسانات فشار (C_p) را به عنوان تابعی از انرژی جنبشی ورودی به صورت زیر تعریف نموده‌اند (Abdulkhader and Elango, 1974, Lopardo and Solari, 1980, Akbari et al., 1982)

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

که σ_x انحراف معیار نوسانات فشار و V_1 سرعت در شروع تشکیل پرش می‌باشد.

عبدالقادر و الانگو در سال ۱۹۷۴ توزیع ضریب نوسانات فشار را در طول پرش هیدرولیکی برای اعداد فرود مختلف بین ۴/۷ تا ۶/۶ ارائه داده‌اند (Abdulkhader and Elango, 1974). همچنین آنها نتیجه گرفتند که حداکثر ضریب نوسانات فشار تقریباً نزدیک به محل پنجه پرش و تقریباً برابر با ۰/۰۸۵ است. لوپاردو و سولاری در سال ۱۹۸۰ نوسانات فشار را برای پرش هیدرولیکی در پایین دست یک دریچه برای اعداد فرود بین ۲/۵ تا ۷/۵ اندازه‌گیری نمودند و بیشترین مقدار ضریب نوسانات فشار را برابر با ۰/۰۸۴ به دست آوردند که در عدد فرود ۴/۵ و تقریباً در فاصله ۳۰ درصد طول پرش واقع شده است (Lopardo and Solari, 1980)

فیوروتو و رینالدو در سال ۱۹۹۲ با انجام یک مدل آزمایشگاهی از پرش هیدرولیکی در محدوده اعداد فرود بین ۷ تا ۹/۵، ساختار آماری نوسانات فشار را در حوضچه آرامش بررسی

پژوهش اثرات استغراق در میزان ضرایب نوسانات فشار مورد توجه قرار گرفت.

برای پرش هیدرولیکی مستغرق بر اساس طبقه بندی کیندس و اتر در سال ۱۹۴۴ بسته به اینکه موقعیت شروع پرش در سطح تنداب و نیز موقعیت انتهای طول غلتابی نسبت به محل تقاطع سطح شیبدار و کف حوضچه کجا باشد، انواع مختلف پرش نوع A، B و C، D تشکیل می‌شود (شکل ۲) (Kindsvater, 1944). اگر پرش در انتهای مقطع شیبدار واقع شود و عمق آب در پایین دست با عمق ثانویه پرش برابر باشد، پرش نوع A تشکیل می‌شود. اگر شروع پرش روی سطح شیبدار و انتهای طول غلتابی روی حوضچه باشد و عمق پایاب بیشتر از عمق مزدوج باشد، پرش نوع B، اگر ابتدا و انتهای پرش بر روی تنداب و انتهای طول غلتابی در ابتدای حوضچه واقع شود، پرش نوع C و اگر پرش به‌طور کامل روی تنداب اتفاق بیافتد، پرش از نوع D است.

همچنین قاسمی و همکاران در یک فلوم آزمایشگاهی مشخصات پرش هیدرولیکی مستغرق را مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که در یک عدد فرود معین، طول پرش هیدرولیکی مستغرق و افت انرژی نسبتی پرش مستغرق به ترتیب بیشتر و کمتر از این مشخصات برای پرش هیدرولیکی آزاد است. به علاوه برای پرش مستغرق، در یک عدد فرود معین با افزایش نسبت استغراق، طول پرش و عمق استغراق افزایش و افت انرژی نسبتی آن کاهش می‌یابد. آنها با انجام تحلیل حساسیت روابط توسعه یافته، میزان تأثیر پارامترهای حاکم بر تغییرات عمق استغراق روی دریچه و افت انرژی نسبتی را تعیین کردند (Qasemi et al., 2017).

$$\Omega = \frac{\sigma_x Y_2}{H_1 Y_1} = f\left(\frac{X}{Y_2 - Y_1}\right) \quad (4)$$

که در این معادلات

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، σ_x انحراف معیار نوسانات فشار و H_1 افت فشار است. پارامتر $X/(Y_2 - Y_1)$ بیانگر موقعیت نسبی جریان از پنجه پرش است که با علامت Γ نشان داده می‌شود. پارامتر $(P_x - Y_1)/(Y_2 - Y_1)$ توزیع فشار متوسط در طول پرش است و با علامت Ψ و پارامتر $\sigma_x Y_2 / (H_1 Y_1)$ نیز بیانگر توزیع طولی نوسانات فشار است که با علامت Ω تعریف می‌شود.

ایشان نشان دادند که بر اساس پارامترهای بدون بعد تعریف شده در معادلات ۳ و ۴، موقعیت نقاط مهم در طول پرش قابل پیش‌بینی است. به‌طوری که حداکثر نوسانات فشار (L_{max}) در فاصله $X/(Y_2 - Y_1) \approx 1.75$ ، طول غلتاب‌ها (L_R) در فاصله $X/(Y_2 - Y_1) \approx 6$ و در نهایت طول پرش (L_I) در فاصله $X/(Y_2 - Y_1) \approx 8$ رخ می‌دهد.

فروودی و همکاران در سال ۲۰۱۰ نوسانات فشار در اطراف بلوک‌های حوضچه نوع SAF را مدلسازی و میزان ضرایب فشار را اندازه‌گیری نمودند (Farhoudi and Sadaf-Helbar, 2010).

در بیشتر پژوهش‌ها به بررسی اثر نوسانات فشار در پرش هیدرولیکی کلاسیک پرداخته شده است. با توجه به اینکه یکی از انواع پرش در پایین دست سرریزها پرش مستغرق می‌باشد، در این

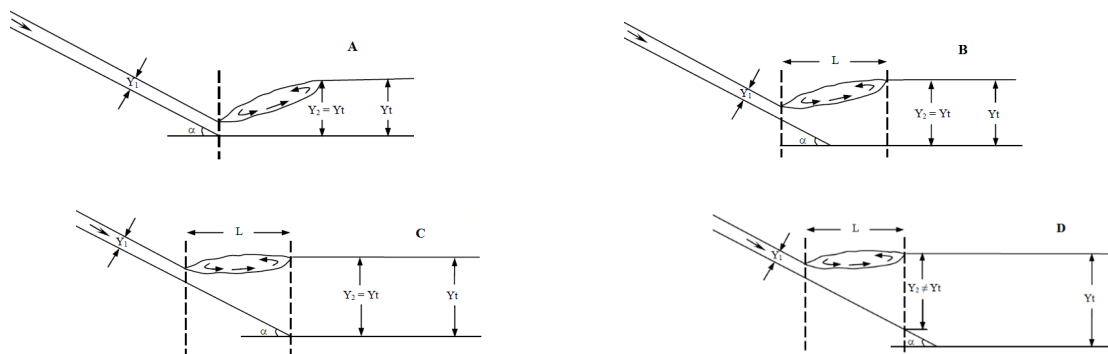


Fig. 2. Types of submerged jump related with chute

شکل ۲- انواع پرش مستغرق نسبت به تنداب

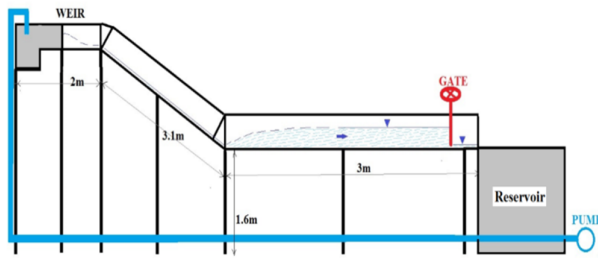


Fig. 3. The laboratory model scheme
شکل ۳- تصویر شماتیک از مدل آزمایشگاهی

۲-۲- ابزار و روش اندازه‌گیری

برای اندازه‌گیری فشارهای هیدرودینامیکی از دستگاه مبدل فشار مدل MPXV7007 استفاده شد. برای نصب مبدل فشار در کف فلوم از شلنگ نمره ۵ به عنوان نازل استفاده شد. همچنین برای واسنجی دستگاه از میانگین فشار ثبت شده توسط دستگاه در یک جریان راکد استفاده شد.

برای اندازه‌گیری فشارهای هیدرواستاتیک نیز از یک تابلو پیزومتری استفاده شد و پیزومترهای موجود بر روی تابلو توسط شلنگ به کف حوضچه متصل شد. برای نصب شلنگ‌ها به کف حوضچه نیز از فیتینگ پنوماتیک M5-6 استفاده شد. در شکل ۴ نحوه اتصال مبدل فشار و فیتینگ پنوماتیک در کف فلوم نشان داده شده است.

آرایش نقاط اندازه‌گیری فشار در امتدادی به طول ۱۲۷ سانتی‌متر بر روی حوضچه و ۳۰ سانتی‌متر بر روی تنداب در خط مرکزی فلوم در نظر گرفته شد. ۱۴ نقطه به منظور اندازه‌گیری فشارها در کف حوضچه و ۴ نقطه بر روی سرریز واقع شد. حداقل فاصله نقاط برابر با ۶ سانتی‌متر بود. در شکل ۵ پلان و پروفیل آرایش نقاط اندازه‌گیری فشار نشان داده شده است.

از آنجا که ثابت شده است که فرکانس غالب نوسانات فشار در مدل پرش هیدرولیکی کمتر از ۲۵ هرتز است (Toso and Bowers, 1988, Akbari et al., 1982)، از دیتالاگری با نرخ نمونه‌برداری ۱۰۰ هرتز در این پژوهش استفاده شد. به این ترتیب نوسانات فشار در هر ۲۰۰ ثانیه توسط مبدل فشار اندازه‌گیری و ثبت شد.

پس از پایداری پرش مقدار دبی جریان به وسیله هد جریان در پشت سرریز مثلی قرائت شد و به منظور برداشت عمق ثانویه

پژوهشگران دیگر (Fecarotta et al., 2016) با مدل فیزیکی حوضچه آرامش تیپ دو USBR و بررسی پارامترهای C_p^+ , C_p^- , C_p^+ و همچنین (Wüthrich et al., 2018) با مدل‌سازی ترکیبی فیزیکی و ریاضی و بررسی پارامترهای C_p^+ , C_p^- , C_p^+ و C_p^- نوسانات فشار هیدرودینامیکی را از مهم‌ترین عوامل تخریب بستر حوضچه‌های آرامش دانستند. امروزه با پیشرفت تکنولوژی و امکان اندازه‌گیری فشارهای لحظه‌ای توسط دستگاه مبدل فشار، این امکان برای پژوهشگران فراهم شده تا بتوانند فشارهای هیدرودینامیکی را در پرش هیدرولیکی محاسبه نمایند. در پژوهش‌های پیشین شدت نوسانات فشار در پرش هیدرولیکی آزاد مورد توجه بوده است. لیکن مشخصات فشارهای نوسانی در پرش مستغرق مورد توجه دقیق نبوده است. در نتیجه هدف اصلی این پژوهش تعیین اثرات درجه استغراق بر شدت نوسانات لحظه‌ای فشار در زیر پرش مستغرق می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- ساختار آزمایشگاهی

در این پژوهش فلوم آزمایشگاهی شامل دو بخش سرریز و حوضچه ساخته شد. ابعاد فلوم شامل عرض کف و ارتفاع دیواره به ترتیب $0.3/0.4$ متر، ارتفاع سرریز $1/8$ متر و زاویه آن برابر با 30° درجه و طول حوضچه نیز برابر با ۳ متر، کف فلوم از جنس پلاکسی گلاس و دیواره‌های آن از جنس شیشه در نظر گرفته شد. جریان بر روی سرریز فوق بحرانی بوده و برای تشکیل پرش و تثبیت موقعیت پرش از یک دریچه کشویی در انتهای حوضچه استفاده شد. در کلیه آزمایش‌ها، دریچه کشویی پایین دست همواره به گونه‌ای تنظیم می‌شد که پنجه پرش در ابتدای حوضچه رخ دهد. در شکل ۳ شماتیک مدل آزمایشگاه نشان داده شده است.

پس از تشکیل پرش آزاد و اندازه‌گیری مشخصات هیدرولیکی جریان و فشارهای وارد بر کف حوضچه، با کاهش میزان بازشدگی دریچه پایین دست فلوم، عمق آب در پایاب Y_1 نسبت به عمق ثانویه پرش Y_2 افزایش یافته و همین امر سبب ایجاد استغراق در پرش می‌شد. به این ترتیب به ازای هر پرش آزاد با کاهش‌های مختلف در میزان بازشدگی دریچه پایین دست، پرش‌های مستغرق با درجه استغراق متفاوت تشکیل گردید.

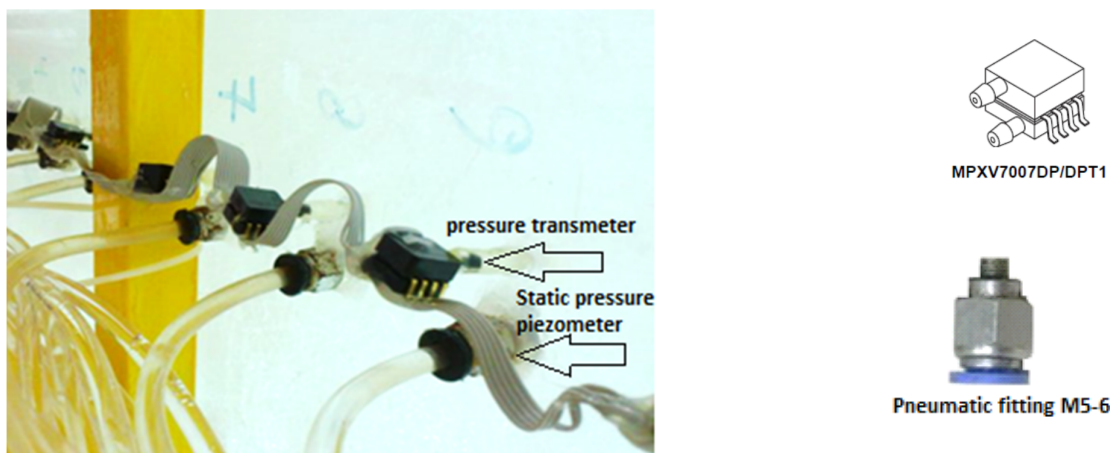


Fig. 4. Manner of fitting pressure transducer and piezometer to the flume bed
 شکل ۴- نحوه اتصال مبدل فشار و پیزومتر در کف فلوم

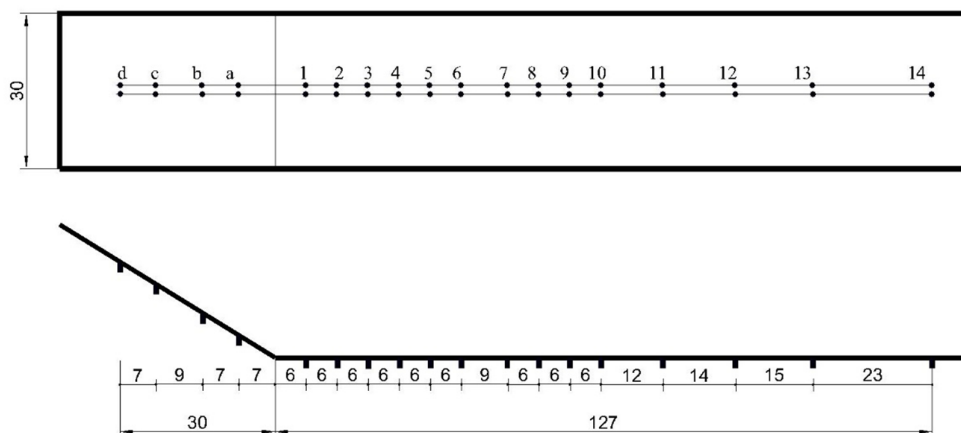


Fig. 5. Situation of piezometers and transducers (by cm)
 شکل ۵- موقعیت قرارگیری پیزومترها و مبدل‌ها (ابعاد بر حسب سانتی‌متر)

جدول ۱- محدوده متغیرهای آزمایش

Table 1. Range of laboratory variables

S= (Y ₁ /Y ₂)	Fr ₁	Q (l/s.m)
1		
1.21		
1.32		
1.40	7.07	57.2
1.53		
1.60		
1.72		

باکینگهام، معادلات کلی شامل پارامترهای بدون بعد استخراج شدند. پارامترهای مؤثر بر ضرایب فشارهای هیدرودینامیکی در کف حوضچه آرامش به شرح زیر است

پرش علاوه بر روش عکس‌برداری و دیجیت کردن عکس‌ها از سانتی‌متر نصب شده کنار فلوم نیز استفاده شد. بر اساس دبی جریان و عمق ثانویه پرش، مقدار سرعت و عمق اولیه پرش در هر یک از آزمایش‌ها محاسبه شد. محدوده متغیرهای آزمایش به‌طور خلاصه در جدول ۱ ارائه شده است.

۳-۲- آنالیز ابعادی

با توجه به اینکه تحلیل ابعادی یک روش مؤثر برای کاهش تعداد و پیچیدگی متغیرهای مؤثر بر یک پدیده است، در این قسمت با تشریح پارامترهای مختلف مؤثر بر ضرایب فشارهای

شکل ۶ یک نمونه از نتایج ثبت شده توسط دستگاه مبدل فشار را نشان می‌دهد. در این شکل معادلات زیر برقرار است

$$\bar{p} = \frac{1}{T} \int_0^T p dt \quad (۸)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (p - \bar{p})^2 dt} \quad (۹)$$

که در این معادلات

\bar{p} متوسط زمانی فشار، p مقدار فشار در هر لحظه، T زمان برداشت اطلاعات و σ انحراف معیار نوسانات فشار در پرش هیدرولیکی است.

در صورتی که انحراف معیار نوسانات فشار به وسیله ارتفاع معادل سرعت ورودی در پرش هیدرولیکی بدون بعد شود، پارامتر مهمی به نام ضریب انحراف معیار نوسانات فشار (C_p^+) به دست می‌آید.

بر اساس انحراف فشارهای بیشینه و کمینه از فشار میانگین نیز معادلات زیر به دست می‌آیند

$$C_p^+ = \frac{(p_{\max} - \bar{p})}{\frac{V_1^2}{2g}} \quad (۱۰)$$

$$C_p^- = \frac{(p_{\min} - \bar{p})}{\frac{V_1^2}{2g}} \quad (۱۱)$$

که در این معادلات

C_p^+ حداکثر انحراف فشار بیشینه و C_p^- حداکثر انحراف فشار کمینه از فشار میانگین نامیده می‌شود.

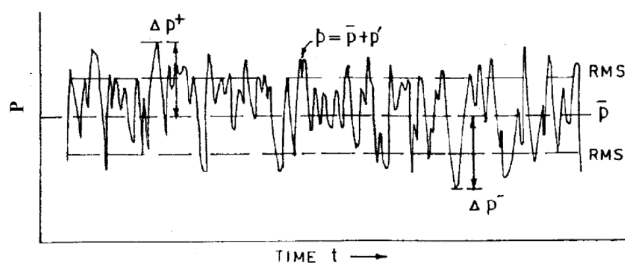


Fig. 6. Typical scheme of data recorded by pressure transducer

شکل ۶- نمونه‌ای از داده‌های ثبت شده توسط مبدل فشار

$$f(p', V_1, Y_1, Y_2, Y_t, X, L_j, \rho_w, v, g) = 0 \quad (۵)$$

که در این معادله

p' جزء نوسانی فشار و برابر با $(P - \bar{P})$ ، V_1 سرعت اولیه پرش، Y_1 عمق اولیه پرش، Y_2 عمق مزدوج پرش، L_j طول پرش، Y_t عمق پایاب، X موقعیت پیژومترها نسبت به نقطه شروع حوضچه، ρ وزن مخصوص آب، v ویسکوزیته آب و g شتاب ثقل می‌باشد.

با استفاده از آنالیز ابعادی پارامترهای بدون بعد به صورت زیر محاسبه شد

$$f\left(\frac{\sqrt{p'^2}}{V_1^2/2g}, \frac{Y_2}{Y_1}, \frac{Y_t}{Y_2}, \frac{X}{Y_1}, \frac{X}{L_j}, \frac{V_1 Y}{v}, \frac{Y}{\sqrt{g Y_1}}\right) = 0 \quad (۶)$$

ضریب بدون بعد $\frac{\sqrt{p'^2}}{V_1^2/2g}$ ضریب بدون بعد انحراف معیار نوسانات فشار، $\frac{Y_2}{Y_1}$

نسبت اعماق مزدوج پرش و تابعی از عدد فرود اولیه پرش، $\frac{Y_t}{Y_2}$

درجه استغراق پرش، $\frac{X}{L_j}$ و $\frac{X}{Y_1}$ بیانگر موقعیت نسبی در پرش،

$V_1 Y / v$ عدد رینولدز و بیانگر میزان تلاطم جریان و $\frac{Y}{\sqrt{g Y_1}}$

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 مستغرق وابسته به

عدد فرود، درجه استغراق و فاصله نسبی در پرش است

$$C_p^+ = \frac{\sqrt{p'^2}}{V_1^2/2g} = f_1\left(\frac{Y_t}{Y_2}, \frac{X}{Y_1}, \frac{X}{L_j}, Fr\right) \quad (۷)$$

با توجه به اینکه فشار در کف حوضچه آرامش کاملاً دارای

نوسانات تصادفی است، تجزیه و تحلیل آن شامل روش‌های آماری

نیز می‌باشد. باید توجه داشت که پدیده تصادفی نوسانات فشار در

زیر پرش هیدرولیکی پایدار جزء پدیده‌های تصادفی ساکن به

حساب می‌آید (Lopardo and Henning, 1985). بررسی

مختصری از پارامترهای مؤثر در این پدیده در ادامه ارائه شده است.

۳- نتایج و بحث

۱-۳- تغییرات لحظه‌ای فشار در بستر پرش هیدرولیکی

هرتز توسط دستگاه مبدل فشار اندازه‌گیری شد. در شکل ۸ تغییرات مقادیر لحظه‌ای فشار در زیر پرش هیدرولیکی مستغرق و در شکل ۹ نیز تغییرات لحظه‌ای فشار در زیر پرش هیدرولیکی آزاد در مدت ۱۰ ثانیه در پیزومترهای شماره C، ۲ و ۱۲ ترسیم شده است.

شکل ۷ نمونه‌ای از پرش مستغرق را برای دبی در واحد عرض ۵۷/۲ لیتر بر ثانیه بر متر و درجه استغراق ۱/۷ نشان می‌دهد. مقادیر لحظه‌ای فشار در زیر پرش هیدرولیکی با فرکانس ۱۰۰

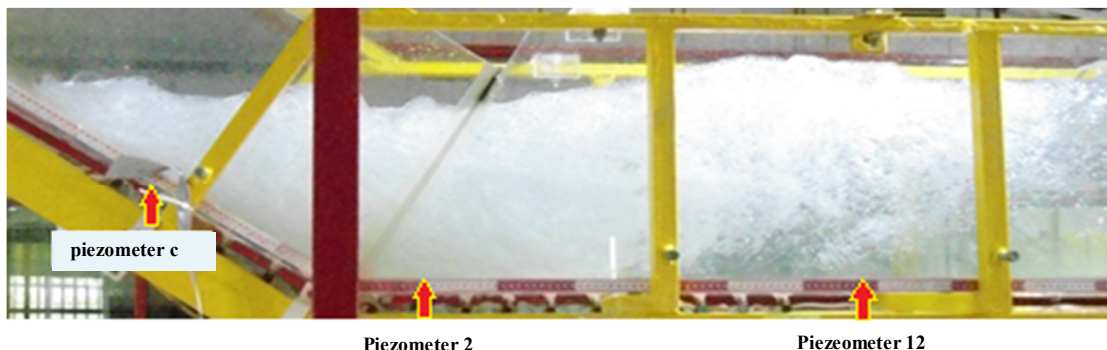


Fig. 7. Submerged jump for unit discharge 57.2 l/s.m and submergence ratio 1.7

شکل ۷- پرش مستغرق برای دبی در واحد عرض ۵۷/۲ l/s.m و درجه استغراق ۱/۷

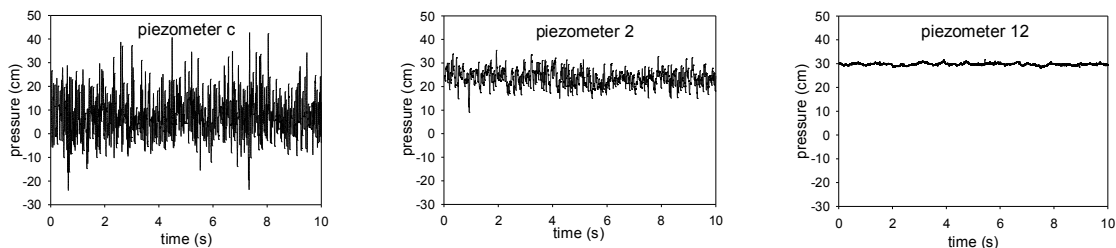


Fig. 8. Instant variation of pressure for submerged jump with unit discharge 57.2 l/s.m and submergence ratio 1.7

شکل ۸- تغییرات لحظه‌ای فشار برای پرش مستغرق با دبی در واحد عرض ۵۷/۲ l/s.m و درجه استغراق ۱/۷

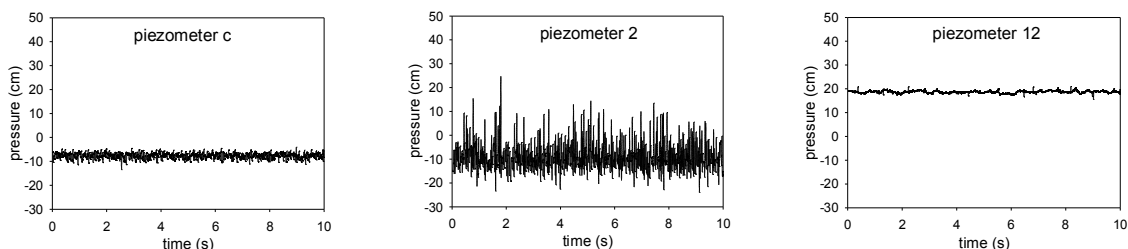


Fig. 9. Instant variation of pressure for submerged jump with unit discharge 57.2 l/s.m

شکل ۹- تغییرات لحظه‌ای فشار برای پرش هیدرولیکی آزاد با دبی در واحد عرض ۵۷/۲ l/s.m

در این پژوهش مقادیر فشار در کف حوضچه آرامش به دو صورت استاتیکی و فشارهای لحظه‌ای اندازه‌گیری شد. فشار هیدرواستاتیکی با استفاده از لوله‌های پیزومتر و قرائت ارتفاع آب در داخل هر یک از لوله‌های پیزومتری نصب شده بر روی تابلو فشار استاتیک، اندازه‌گیری شد و فشارهای لحظه‌ای با استفاده از دستگاه ترانسدیوسر فشار با فرکانس ۱۰۰ هرتز در مدت ۲۰۰ ثانیه ثبت شد.

به منظور بررسی تغییرات فشار هیدرواستاتیک در طول حوضچه برای پرش آزاد پنجه پرش در حوضچه آرامش قرار دارد، معادله زیر را پیشنهاد نمود (Marques, 1997)

$$\Phi_s = \frac{Z_x - Y_1}{Y_2 - Y_1} / S = f\left(\frac{X}{Y_2 - Y_1}\right) \quad (12)$$

$$S = \frac{Y_1}{Y_2} \quad (13)$$

که در این معادله

Φ_s توزیع فشار هیدرواستاتیک در پرش مستغرق، Z_x فشار هیدرواستاتیک، Y_1 عمق اولیه پرش، Y_2 عمق ثانویه پرش، Y_1 عمق استغراق و S درجه استغراق پرش می‌باشد. در شکل ۱۰ تغییرات فشار هیدرواستاتیک در حوضچه آرامش برای عدد فرود ۷/۰۷ با درجات مختلف استغراق ترسیم شده است. شکل ۱۱ نیز تغییرات متوسط فشارهای لحظه‌ای اندازه‌گیری شده توسط دستگاه مبدل را نشان می‌دهد.

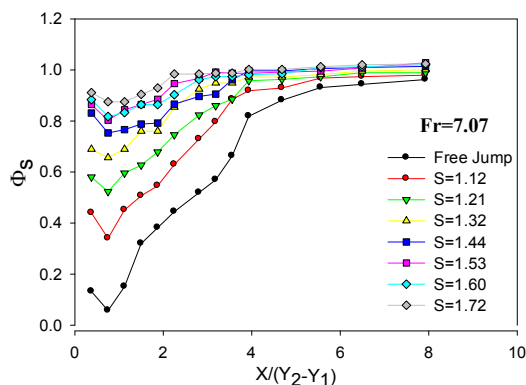


Fig. 10. Hydrostatic pressure variation in basin
شکل ۱۰ - تغییرات فشارهای هیدرواستاتیک در حوضچه

همانگونه که ملاحظه می‌شود شدت نوسانات فشار در موقعیت‌های مختلف پرش متفاوت است. به طوری که در پرش هیدرولیکی مستغرق مقدار نوسانات و تغییرات آنی فشار در پیزومتر شماره C واقع بر روی سرریز بیشتر از پیزومتر شماره ۲ واقع بر روی حوضچه است. همچنین در پیزومتر شماره ۱۲ که تقریباً انتهای پرش است، مقدار تغییرات لحظه‌ای فشار حداقل شده است.

شکل ۹ نیز مربوط به تغییرات آنی فشار در پرش آزاد است، با توجه به اینکه در پرش آزاد پنجه پرش در حوضچه آرامش قرار دارد، ملاحظه می‌شود که تغییرات آنی فشار در پیزومتر شماره ۲ بیشتر از پیزومتر شماره C است و در پیزومتر شماره ۱۲ نیز تغییرات نوسانی فشار حداقل است. نتایج نشان می‌دهد که تغییر در مقادیر فشار در نقاط مختلف حوضچه وابسته به موقعیت پرش است.

همچنین قابل توجه است که تغییرات آنی فشار در یک نقطه می‌تواند سبب تشکیل اختلاف پتانسیل لحظه‌ای در بستر پرش شود. این اختلاف پتانسیل‌ها می‌تواند سبب تشدید نیروی برخاست و حتی سبب تشدید در ایجاد خستگی در مصالح و تخریب بتن شود. به منظور بررسی تغییرات لحظه‌ای فشار و بررسی اثرات استغراق بر میزان این تغییرات با توجه به وجود حجم زیاد داده‌های جمع‌آوری شده، بررسی مستقیم داده‌ها امکان‌پذیر نبوده و به همین جهت مقادیر متوسط، بیشینه، کمینه و انحراف معیار داده‌ها برای تحلیل نتایج به کار رفته است.

۳-۲- ضریب فشار متوسط

تعیین توزیع فشار متوسط اولین گام ضروری برای توصیف میدان فشاری است که در بستر پرش هیدرولیکی رخ می‌دهد. همچنین به منظور تعیین ارتفاع دیواره‌های جانبی حوضچه آرامش، شناخت پروفیل طولی سطح آزاد پرش دارای اهمیت است. بسیاری از پژوهشگران بر این باوراند که سطح آزاد را می‌توان با مقادیر فشار متوسط اندازه‌گیری شده در کف کانال نشان داد. معادله ۱۲ که توسط مارکز و همکاران در سال ۱۹۹۷ ارائه شد بیانگر توزیع فشار متوسط در طول حوضچه آرامش می‌باشد (Marques et al., 1997)

شکل ۱۲ نشان می‌دهد برای درجه استغراق $2 < S < 1$ طول پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش در محدوده $1/7 < (Y_2 - Y_1) < 8$ متغیر است.

۳-۳- ضریب نوسانات متوسط

به منظور بررسی تغییرات نوسانات فشار در طول پرش، مارکز و همکاران در سال ۱۹۹۷ معادله ۱۴ را پیشنهاد نمودند (Marques et al., 1997)

$$\Omega_s = \frac{\sigma_x Y_2}{H_t Y_1} / S \quad (14)$$

که در آن

مقدار شدت نوسانات فشار به عنوان نمونه برای عدد فرود $0.7 < Y$ محاسبه و در شکل ۱۳ برای هر یک از درجات استغراق نشان داده شده است. در این نمودارها محور عمودی بیانگر توزیع نوسانات فشار در بستر پرش و محور افقی بیانگر فاصله نسبی از ابتدای حوضچه می‌باشد. با توجه به اینکه در پرش مستغرق پنجه پرش بر روی سرریز رخ می‌دهد، مقادیر مثبت بر روی محور منفی افقی بیانگر فاصله نسبی از ابتدای حوضچه به سمت پایین دست و مقادیر منفی بیانگر فاصله نسبی از ابتدای حوضچه به سمت بالادست است. همچنین بر روی هر یک از نمودارها، موقعیت نسبی پنجه پرش در حالت مستغرق نیز نشان داده شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود رفتار کلی تغییرات ضریب Ω_s هم در پرش آزاد و هم در پرش مستغرق به این صورت است که در ابتدای پرش مقدار آن شروع به افزایش نموده و پس از رسیدن به مقدار حداکثر، منحنی سیر نزولی داشته تا اینکه در انتهای پرش مقدار آن ثابت می‌شود.

همچنین با ایجاد استغراق در پرش و انتقال پنجه پرش بر روی سرریز، مقدار نوسانات بر روی سرریز افزایش می‌یابد. به طوری که مقدار ضریب Ω_s بر روی حوضچه آرامش در پرش آزاد همواره کمتر از ضریب Ω_s بر روی سرریز است. در شکل ۱۴ توزیع نوسانات برای عدد فرود $0.7 < Y$ و درجات استغراق مختلف در موقعیت حوضچه و سرریز نشان داده شده است.

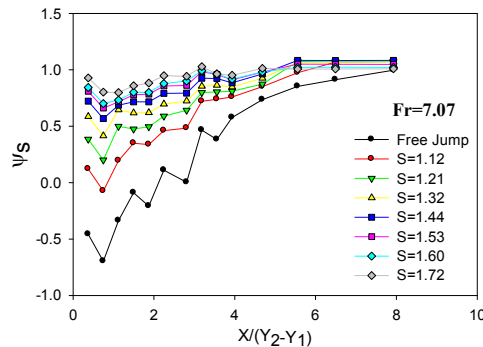


Fig. 11. Average variation of instant pressure in basin

شکل ۱۱- تغییرات متوسط فشارهای لحظه‌ای در حوضچه

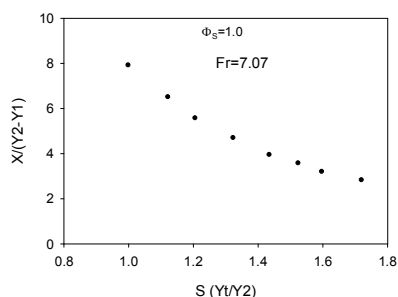


Fig. 12. Dimensionless relative distance for coefficient $\Phi_s = 1.0$

شکل ۱۲- فاصله نسبی بدون بعد برای ضریب $\Phi = 1$

نتایج نشان می‌دهد ضریب فشار هیدرواستاتیک در پرش آزاد در فاصله نسبی $X/(Y_2 - Y_1) = 8$ تقریباً ثابت و برابر با یک است و با افزایش درجه استغراق ضریب Φ_s در فاصله کمتری ثابت و برابر با یک می‌شود. به این ترتیب می‌توان استنباط کرد طول پرش هیدرولیکی در پرش آزاد برابر با $L_j = 8(Y_2 - Y_1)$ است و با افزایش درجه استغراق پرش این مقدار کاهش می‌یابد. همچنین در شکل ۱۱ نتایج نشان می‌دهد متوسط فشارهای لحظه‌ای همواره دارای تغییرات نوسانی بوده و ضریب فشار متوسط (Ψ) نیز با رسیدن به انتهای پرش تقریباً ثابت می‌شود. همچنین به دلیل وجود انرژی جنبشی، گردابه‌ها و در نتیجه تلاطم زیاد در پرش که سبب افت انرژی جریان می‌شود، متوسط فشارهای لحظه‌ای اندازه‌گیری شده در محدوده پرش کمتر از مقادیر فشارهای استاتیک می‌باشد.

در شکل ۱۲ مقادیر فاصله نسبی بدون بعد که در آن ضریب $\Phi = 1$ است برای درجات مختلف استغراق نشان داده شده است.

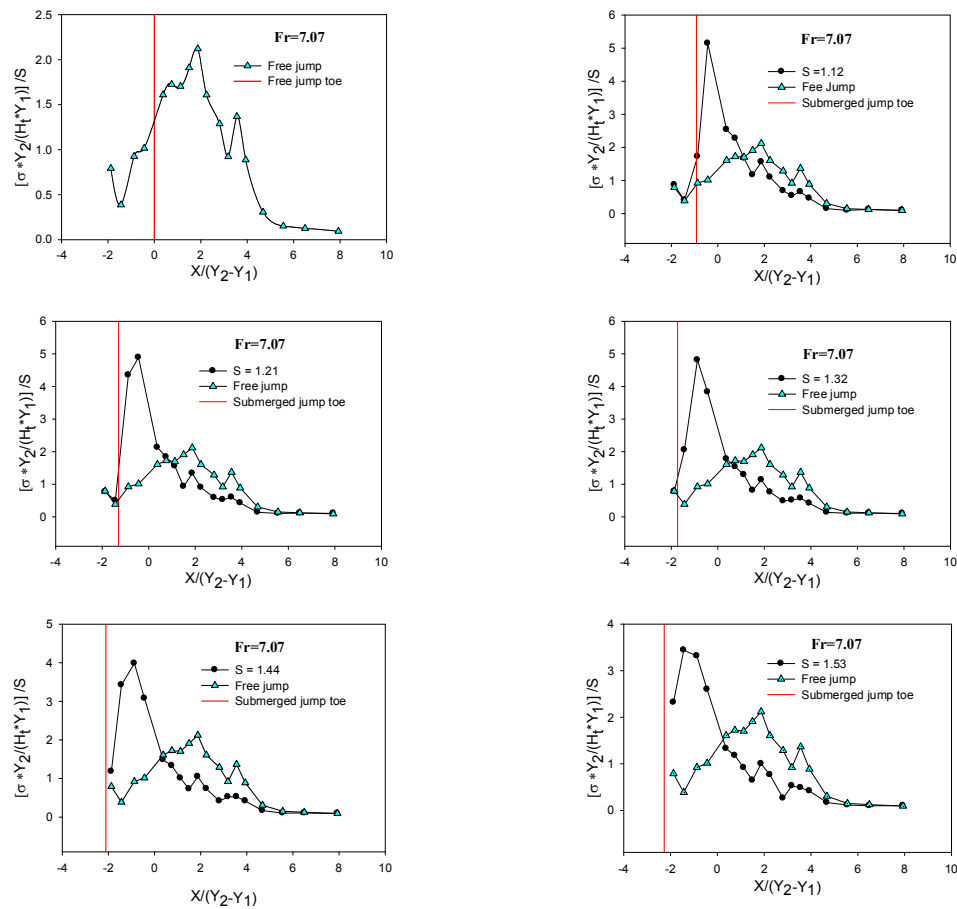


Fig. 13. Distribution of pressure fluctuation on the basin and spillway

شکل ۱۳- توزیع نوسانات فشار بر روی حوضچه و سرریز

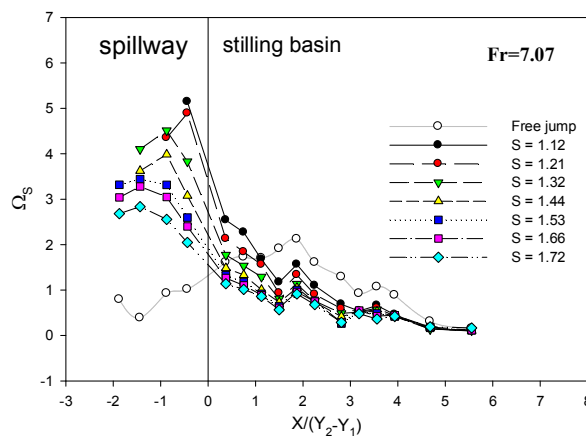


Fig. 14. Distribution of pressure fluctuation in submerged hydraulic jump

شکل ۱۴- توزیع نوسانات فشار در پرش هیدرولیکی مستغرق

شدت نوسانات کاهش یافته و در انتهای پرش مقدار آن تقریباً ثابت می‌شود.

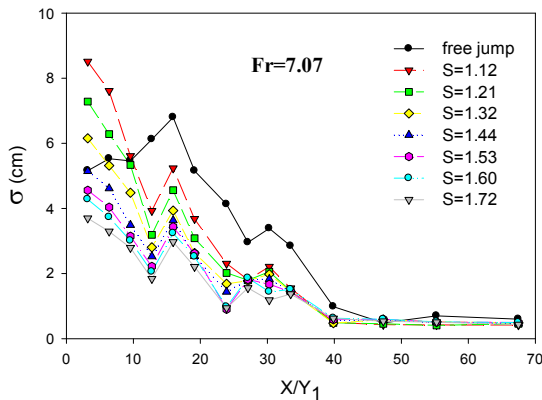


Fig. 16. Standard deviation of pressure fluctuation
شکل ۱۶- انحراف معیار نوسانات فشار

۳-۵- ضرایب بدون بعد C_p^+ و C_p^-

به منظور طراحی ضخامت دال کف حوضچه آرامش تعیین ضرایب بدون بعد C_p^+ و C_p^- برای شرایط هیدرولیکی و هندسه حوضچه ضروری است. به این ترتیب تغییرات ضرایب بدون بعد انحراف معیار نوسانات فشار (C_p') برای عدد فرود $7/0.7$ محاسبه و در شکل ۱۷ نشان داده شده است. در این شکل محور عمودی نشان دهنده ضرایب بدون بعد انحراف معیار نوسانات فشار و محور افقی فاصله نسبی از محل شروع حوضچه آرامش است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش عدد فرود جریان، مقدار حداکثر ضرایب (C_p') کاهش می‌یابد. البته این بدان معنا نیست که با افزایش عدد فرود نوسانات فشار کاهش می‌یابد. بلکه کاهش مقدار حداکثر C_p' با افزایش عدد فرود مشخص کننده این حقیقت است که با افزایش دبی، رشد انرژی جنبشی ($v^2/2g$) در ابتدای پرش بیشتر از رشد نوسانات فشار σ است.

در شکل ۱۸ تغییرات ضرایب بدون بعد انحراف معیار نوسانات فشار (C_p') برای پرش آزاد و مستغرق با درجه‌های مختلف استغراق نشان داده شده است. بر اساس پژوهش‌های پیشین، حداکثر انحراف معیار نوسانات فشار در پرش هیدرولیکی کلاسیک در فاصله ۱۰ تا ۳۰ برابر عمق اولیه پرش تشکیل می‌شود. مطابق شکل ۱۸ نتایج نشان می‌دهد که در پرش مستغرق حداکثر انحراف

نتایج نشان می‌دهد مقدار نوسانات فشار وابسته به فاصله از پنجه پرش است و در ابتدای پرش ضریب نوسانات فشار افزایش می‌یابد و پس از رسیدن به مقدار حداکثر، با افزایش فاصله از ابتدای پرش مقدار آن کاهش می‌یابد تا اینکه در انتهای پرش برابر با مقدار ثابتی می‌شود. همچنین با افزایش درجه استغراق پرش، مقدار نوسانات فشار هم در حوضچه آرامش و هم بر روی سرریز کاهش می‌یابد. شکل ۱۵ روند تغییرات حداکثر ضریب Ω_S را بر روی سرریز نشان می‌دهد.

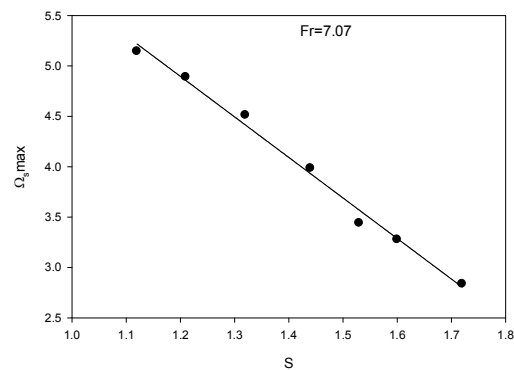


Fig. 15. Variation of coefficient Ω_{Smax} related to submergence ratio

شکل ۱۵- تغییرات ضریب Ω_{Smax} نسبت به درجه استغراق

۳-۴- انحراف معیار نوسانات فشار

انحراف معیار (σ)، معیار مناسبی برای تعریف شدت نوسانات فشار است. در شکل ۱۶ انحراف معیار نوسانات فشار نسبت به فاصله نسبی (X/Y_1) ترسیم شده است. همان‌گونه که در شکل ۱۶ نشان داده شده است، برای عدد فرود مشخص با افزایش درجه استغراق پرش، مقدار انحراف معیار نوسانات فشار کاهش یافته است.

همچنین مقدار انحراف معیار نوسانات فشار در زیر پرش وابسته به فاصله نسبی از پنجه پرش است. به طوری که در پرش هیدرولیکی آزاد در ابتدای پرش هیدرولیکی مقدار آن افزایش می‌یابد تا اینکه به یک مقدار بیشینه می‌رسد. سپس سیر نزولی داشته و در انتهای پرش مقدار آن تقریباً ثابت می‌شود. در پرش مستغرق نیز مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله از ابتدای حوضچه،

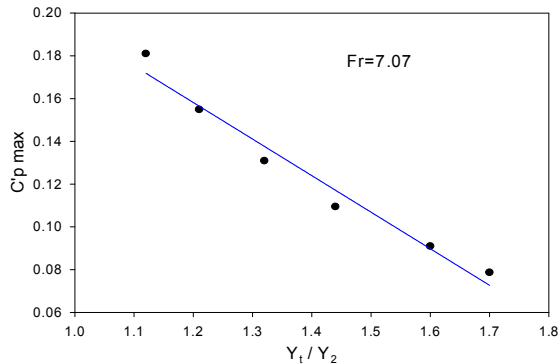


Fig. 19. Variation of maximum standard variation coefficient of pressure fluctuation related to submergence ratio

شکل ۱۹- تغییرات حداکثر ضریب انحراف معیار نوسانات فشار نسبت به درجه استغراق

ضریب C_p^+ بیان کننده اختلاف فشارهای حداکثر از فشار متوسط است. این ضریب بیان کننده میزان اثرات ضربات ناشی از نوسانات فشار بر کف حوضچه آرامش است. ضریب C_p^- بیان کننده اختلاف فشارهای منفی نسبت به فشار متوسط است و یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی اثرات نیروهای برهمکنش در زیر دال و میزان تمایل به ایجاد کاویتاسیون ناشی از نوسانات فشار است.

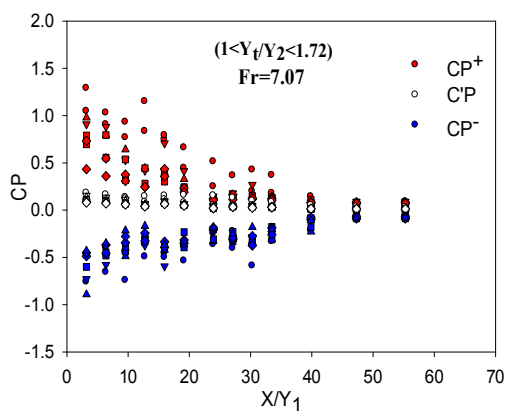


Fig. 20. Dimensionless coefficients C_p^+ , C_p and C_p^-

شکل ۲۰- ضرایب بدون بعد C_p^+ ، C_p و C_p^-

همانگونه که ملاحظه می شود، قدرمطلق ضرایب حدی نوسانات فشار برای پرش مستغرق، در ابتدای حوضچه حداکثر و با رسیدن به انتهای پرش کاهش یافته و برابر با مقدار ثابتی می شود.

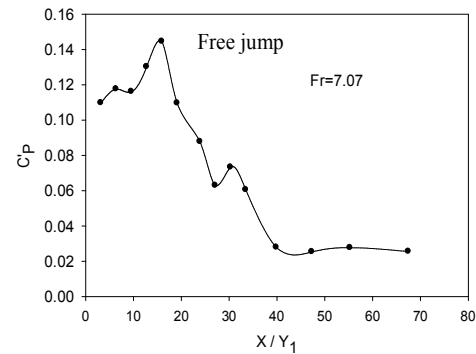


Fig. 17. Longitudinal variation of coefficient C_p' in free jump

شکل ۱۷- تغییرات طولی ضریب C_p' در پرش آزاد

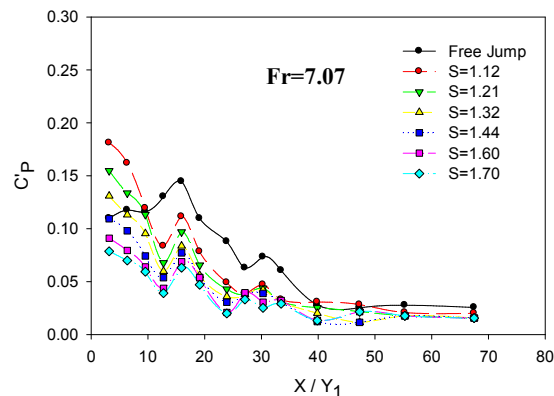


Fig. 18. Longitudinal variation of coefficient C_p' in submerged jump

شکل ۱۸- تغییرات طولی ضریب C_p' در پرش هیدرولیکی مستغرق

معیار نوسانات فشار در ابتدای حوضچه آرامش رخ می دهد و با افزایش فاصله از پنجه پرش مقدار این ضریب کاهش یافته در انتهای پرش تقریباً ثابت می شود.

با توجه به اینکه در طراحی حوضچه آرامش حداکثر ضریب انحراف معیار نوسانات فشار ($C'_{p,max}$) مورد توجه است، لازم است تغییرات آن مورد بررسی قرار گیرد. به این ترتیب در شکل ۱۹ تغییرات ضریب ($C'_{p,max}$) نسبت به درجه استغراق افزایش درجه استغراق ضریب $C'_{p,max}$ کاهش می یابد. میزان کاهش آن برای عدد فرود $0.7/0.89$ درصد است.

در شکل ۲۰ ضریب بدون بعد فشارهای حدی بیشینه و کمینه (C_p^+ و C_p^-) و انحراف معیار نوسانات فشار C_p' ترسیم شده است.

۴- نتیجه‌گیری

ضریب Ω_S بر روی سرریز است. همچنین با افزایش درجه استغراق پرش، مقدار نوسانات فشار هم در حوضچه آرامش و هم بر روی سرریز کاهش می‌یابد.

۴- در پرش مستغرق حداکثر انحراف معیار نوسانات فشار ($C'_{p_{max}}$) در ابتدای حوضچه آرامش رخ می‌دهد و با افزایش فاصله از پنجه پرش، مقدار این ضریب کاهش یافته و در انتهای پرش تقریباً ثابت می‌شود. همچنین با افزایش درجه استغراق ضریب $C'_{p_{max}}$ کاهش می‌یابد.

۵- بر اساس نحوه توزیع ضریب بدون بعد فشارهای حدی بیشینه و کمینه (C_p^- و C_p^+)، فشارهای حداکثر و حداقل در پایین دست سرریز در کف حوضچه آرامش، در محدوده $20 \leq X/Y_1$ رخ می‌دهد.

۶- در صورت نیاز با توجه به مبانی تئوری مدل‌های فیزیکی-هیدرولیکی، نتایج قابل تعمیم در سامانه‌های آب و فاضلاب از جمله سامانه‌های هوادهی و اختلاط سریع مبتنی بر پرش هیدرولیکی خواهد بود.

در این پژوهش اثرات درجه استغراق بر شدت نوسانات فشار در پرش هیدرولیکی در پایین دست یک سرریز بلند برای عدد فرود $7/07$ مورد مطالعه قرار گرفت که نتایج زیر از آن حاصل شد

۱- شدت نوسانات فشار در زیر پرش هیدرولیکی مستغرق تابعی از عدد فرود، فاصله نسبی از پنجه پرش و درجه استغراق پرش است.

۲- نتایج نشان داد طول پرش هیدرولیکی در پرش آزاد برابر با $L_j = 8(Y_2 - Y_1)$ است و با افزایش درجه استغراق پرش این مقدار کاهش می‌یابد. به طوری که برای درجه استغراق $1 < S < 2$ طول پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش در محدوده $1.7(Y_2 - Y_1) < L_j < 8(Y_2 - Y_1)$ تغییر می‌کند.

۳- با ایجاد استغراق در پرش و انتقال پنجه پرش بر روی سرریز، مقدار نوسانات بر روی سرریز افزایش می‌یابد. به طوری که مقدار ضریب Ω بر روی حوضچه آرامش در پرش آزاد همواره کمتر از

References

- Abdulkhader, M. H. & Elango, K. 1974. Turbulent pressure field beneath a hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Research*, 12(4), 469-489.
- Abrishami, J. & Hoseyni M. 2017. *Open channel hydraulics*, Imam Reza University Press, Mashhad, Iran (In Persian).
- Akbari, M. E., Mittal, M.K. & Pande, P.K. 1982. Pressure fluctuations on the floor of free and forced hydraulic jumps. *Conf. on the Hydraulic Modeling of Civil Eng. Struc*, England. 87-96.
- Bakhmateff, B.A. 1962. The hydraulic jump in sloped channels. *Transactions of ASME*, 60, 111-118.
- Chaudhry, M. H. 2008. *Open-channel flow*, Springer Science+Business Media, LLC, New York.
- Elder, R. A. 1961. Model-prototype turbulence scaling, *Proc. 9th Convention of IAHR*, Dubrovnik, Yugoslavia, 24-31.
- Farhoudi, J. and Sadat-Helbar, S. M. 2010. Pressure fluctuation around chute blocks of SAF stilling basins. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 12, 203-212.
- Fiorotto, V. & Rinaldo, A. 1992a. Fluctuation uplift and lining design in spillway stilling basins. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(4), 578-596.
- Fiorotto, V. & Rinaldo, A. 1992b. Turbulent pressure fluctuations under hydraulic jumps. *Journal of Hydraulic Research*, 30(4), 499-520.
- IPBO. 2008. *Guideline for hydraulics of water treatment plant*. Iran Plan and Budget Organization, No. 436, Tehran, Iran. (In Persian)
- Kindsvater, C.E. 1944. Hydraulic jump in sloping channels. *Trans. ASCE*, 109, 1107-1154.

- Liu, P. Q. & Li, A. H. 2007. Model discussion of pressure fluctuations propagation within lining slab joints in stilling basins. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(6), 618-624.
- Lopardo, R. A. & Henning, R. E. 1985. Experimental advances on pressure fluctuations beneath hydraulic jumps. *Proceedings of the 21st IAHR Congress*, Melbourne, Australia. 3, 633-638.
- Lopardo, R. A. & Solari, H. G. 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., Drapeau, J. & Verrette, J. L. 1997. Pressure fluctuation in a hydraulic jump. *Brazilian Journal of Water Resources*, 2(2), 45-52.
- Marques, M. G., Drapeau, J. and Verrette, J. L. 2004. Macro turbulence analysis of energy dissipation structures through varying pressures and levels. *Brazilian Journal of Water Resources*, 9, 127-153.
- Toso, J. & Bowers, E. C. 1988. Extreme pressure in hydraulic jump stilling basin. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114, 829-843.
- Wang, H., Felder, S. and Chanson, H., 2014. An experimental study of turbulent two-phase flow in hydraulic jumps and application of a triple decomposition technique. *Experiments in Fluids*, 55(7), 1775-1787