



خصوصیات جریان و پارامترهای فشار پرش هیدرولیکی آزاد و مستغرق در حوضچه‌های آرامش USBR

سید نصرالله موسوی، داود فرسادی‌زاده، فرزین سلماسی*، علی حسین زاده دلیر

گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۰۵

بازنگری: ۱۳۹۸/۱۲/۱۸

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۰۱

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۱/۱۹

کلمات کلیدی:

انحراف معیار نوسانات فشار

حوضچه آرامش USBR

درجه استغراق

سرریز اوجی

ضرایب فشار

خلاصه: در این تحقیق، خصوصیات جریان و پارامترهای فشار در پرش هیدرولیکی در یک فلوم آزمایشگاهی بررسی شده است. نتایج حاصل برای اعداد فرود اولیه مختلف (F_{r1}) در پاییندست سرریز اوجی در کف حوضچه آرامش نوع دو USBR با حوضچه های نوع یک USBR مقایسه شد. ابعاد سرریز اوجی شکل و حوضچه آرامش، بر اساس معیارهای USBR طراحی شده‌اند. داده‌های فشار نقاط واقع در کف حوضچه با استفاده از مبدل‌های فشار با بسامد ۲۰ هرتز ثبت شده‌اند. پارامترهای آزمایشگاهی شامل عمق و سرعت جریان در موقعیت‌های ابتدا و انتهای پرش آزاد (Y_1, Y_2, Y_3) و V_2 ، و پرش مستغرق (Y_3, V_3, Y_1, V_1) و اندازه‌گیری شدند. در تحقیق حاضر، پارامترهای بی‌بعد راندمان استهلاک انرژی (ϵ)، ارتفاع نظیر فشار متوسط (Ψ_x^*)، انحراف معیار نوسانات فشار (Φ_x^*)، ضریب حداکثر نوسان فشارهای مثبت (CP^+)، ضریب حداکثر نوسان فشارهای منفی (CP^-)، ضریب کل نوسانات فشار (CP) و ضریب چولگی (Ad) بررسی شدند. مقادیر پارامترهای فشار تابع F_{r1} ، موقعیت بی‌بعد نقطه (Γ_x^*) و درجه استغراق (S) هستند. نتایج نشان داد که با کاهش مقادیر F_{r1} ، پارامتر ϵ کاهش می‌یابد. پارامتر Φ_{xmax}^* در حوضچه نوع دو USBR در مقایسه با حوضچه‌های نوع یک در پرش آزاد، در حدود ۳۰ درصد کاهش می‌یابد. کاهش مقادیر Φ_{xmax}^* در پرش مستغرق با $S=1.4$ در مقایسه با پرش آزاد، در حدود ۲۹ درصد بود. مقادیر ضرایب CP_{max}^+ و CP_{max}^- در پرش مستغرق با $S=1.4$ در مقایسه با پرش آزاد، به طور متوسط به ترتیب برابر با ۱۵ و ۱۷ درصد کاهش می‌یابند.

۱- مقدمه

مطالعات انجام یافته، توزیع فشار در نزدیکی بستر حوضچه را نمی‌توان با قانونی توصیف نمود که از توزیع نرمال پیروی نماید. این موضوع بر اساس این واقعیت است که توزیع ضرایب چولگی و کشیدگی، به ترتیب متفاوت از مقادیر برابر با صفر و سه بوده که به توزیع نرمال نسبت داده می‌شوند.

توسو و باورز در سال ۱۹۸۸ پارامترهای آماری شامل میانگین، انحراف معیار و ضرایب چولگی و کشیدگی را جهت تجزیه و تحلیل نوسانات فشار در پرش هیدرولیکی مورد استفاده قرار دادند. نتایج نشان داد که تفاوت در نوسانات فشار پرش هیدرولیکی ناشی از اثرات توسعه لایه مرزی است [۱]. تیشیرا و همکاران در سال ۲۰۰۳ نوسانات فشار ناشی از پرش هیدرولیکی را در کف حوضچه آرامش

با توجه به اهمیت نیروهای هیدرودینامیکی پرش هیدرولیکی در طراحی سازه‌های استهلاک انرژی، این موضوع در منابع علمی به طور وسیع مورد مطالعه قرار گرفته است. شناخت نوسانات فشار در پرش هیدرولیکی که می‌تواند در داخل حوضچه آرامش رخ دهد، از اهمیت زیادی برای طراحی سازه‌های استهلاک انرژی برخوردار می‌باشد. آگاهی از توزیع طولی فشار متوسط، امکان درک بهتر از روند استهلاک انرژی و جریان در داخل حوضچه را فراهم می‌نماید. علاوه بر این، باعث می‌گردد که شرایط بحرانی که ممکن است در طول عمر مفید آن به سازه آسیب برساند، به حداقل برسد. با توجه به

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: farsadi@tabrizu.ac.ir

به حداقل می‌رسد [۸]. نواکوسکی و همکاران در سال ۲۰۱۷ مقادیر فشار را در کف حوضچه نوع یک USBR واقع در پایین دست سرریز پله‌ای^۴ اندازه‌گیری نمودند. نتایج نشان داد که مقادیر ارتفاع نظیر فشار متوسط و نوسانات فشار در نزدیک‌ترین نقاط به پنجه سرریز، نسبت به سرریزهای صاف افزایش می‌یابد [۹]. کریمی و همکاران در سال ۲۰۱۷ با ایجاد واگرایی ناگهانی در مقطع پرش نوع S^2 بر روی بستر صاف در پایین دست دریچه کشویی، نشان دادند که با افزایش دبی جریان عبوری، پارامتر انحراف معیار نوسانات فشار (RMS) افزایش می‌یابد. همچنین واگرا نمودن مقطع حوضچه باعث تشکیل گرداب‌های جانبی و در نتیجه کاهش پارامتر RMS می‌گردد [۱۰].

مشخصات جریان در پرش مستغرق، به طور گسترده در منابع علمی مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۱۱-۱۶]. حبیب‌زاده و همکاران در سال ۲۰۱۲ عملکرد بلوک‌های میانی^۵ واقع در پایین دست دریچه کشویی را در پرش مستغرق بررسی نمودند. در این تحقیق، با استفاده از روش تزریق رنگ، جهت مشاهده جریان در اطراف بلوک‌های میانی به همراه ثبت ویدیوهای با سرعت بالا توسط دوربین‌های از نوع PCI^6 با قابلیت ۱۰۰۰ فریم در ثانیه، دو نوع رژیم جریان شامل جت منحرف شده به سطح آب^۷ (DSJ) و جت دوباره متصل شونده به دیواره یا بستر^۸ (RWJ) بررسی گردید. نتایج نشان داد که چنانچه در عمل، پرش مستغرق با بلوک به عنوان مستهلک کننده انرژی مورد استفاده قرار گیرد، طراح بایستی اطمینان حاصل نماید که جریان در حالت رژیم DSJ می‌باشد [۱۲]. حبیب‌زاده و همکاران در سال ۲۰۱۴ میدان جریان متوسط را در پرش مستغرق با بلوک‌های میانی بررسی نمودند. در این آزمایش‌ها، با تغییر اعداد فرود اولیه و برای عمق‌های پایاب مختلف، جت ورودی به یک و یا دو ردیف از بلوک‌های میانی منحرف می‌گردید. نتایج نشان داد که در رژیم جریان DSJ که در درجه‌های استغراق کمتر رخ می‌دهد، خصوصیت اصلی جریان شامل یک غلتاب سطحی کوچک در بالادست بلوک‌ها و یک ناحیه جریان دوباره چرخشی بزرگ‌تر در پایین دست بلوک‌ها است. همچنین رژیم جریان RWJ که در درجه‌های استغراق بیشتر تشکیل می‌شود، با یک غلتاب سطحی بزرگ‌تر و یک گردابه ایستای کوچک‌تر، درست در

نوع یک USBR^۱ واقع در پایین دست سرریز بررسی نمودند. نتایج نشان داد که مقادیر نوسانی فشار منفی در نقاط ابتدایی حوضچه، دارای اختلاف قابل توجهی نسبت به مقادیر فشار متوسط هستند [۲]. فیوروتو و رینالدو در سال 1992a ساختار آماری نوسانات فشار در پرش هیدرولیکی را در رابطه با پایداری دال حوضچه‌های آرامش به صورت آزمایشگاهی بررسی نمودند. مطابق نتایج ارائه شده، توزیع طولی نوسانات فشار، همگن نبوده و بستگی به موقعیت نقطه مورد نظر در داخل حوضچه (X) دارد. توزیع عرضی نوسانات فشار، دارای همبستگی بوده و همگن می‌باشد [۳]. در تحقیقی، فیوروتو و رینالدو در سال 1992b با تحلیل فشار در جریان متلاطم پرش هیدرولیکی در پایین دست سرریز، در رابطه با کنترل فشار بالابر ایجاد شده در اثر نوسانات فشار در کف حوضچه‌های آرامش بحث کرده‌اند. در این تحقیق، با تعریف حداکثر فشار بالابر وارد بر دال حوضچه، معیاری برای طراحی مناسب دال کف حوضچه ارائه شده است [۴].

پینیرو در سال ۱۹۹۵ مشخصات میدان فشار در کف حوضچه را با ارائه روشی برای تعیین نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر دال به صورت تابعی از عدد فرود اولیه، ابعاد و موقعیت پرش هیدرولیکی بررسی نمود. نتایج نشان داد که فشارهای حدی مثبت و منفی در ابتدای حوضچه، به صورت کاملاً مشخص، متفاوت هستند [۵]. یان و همکاران در سال ۲۰۰۶ نوسانات فشار پرش نوع S^2 را در کف حوضچه با بازشدگی ناگهانی دیواره‌های جانبی در پایین دست دریچه کشویی تحلیل نمودند. نتایج نشان داد که مقادیر ضریب شدت نوسانات فشار (C_p') در مقایسه با مقادیر متناظر در پرش کلاسیک، افزایش می‌یابد [۶]. نتو و مارکیس در سال ۲۰۰۸ میدان فشار را در پرش مستغرق داخل حوضچه نوع یک USBR در پایین دست دریچه کشویی مطالعه نمودند. در این تحقیق، روشی برای پیش‌بینی فشارهای حدی با احتمالات وقوع مختلف و مقادیر متفاوت درجه استغراق ارائه گردید [۷]. در تحقیق آلویس در سال ۲۰۰۸ روش‌هایی برای تخمین مقادیر حدی فشار وارد بر یک پوشش دال حوضچه با ابعاد معین ارائه شده است که با استفاده از آن‌ها، می‌توان سازه‌های مقاوم به نیروهای فشار بالابر را طراحی نمود. نتایج نشان داد که در صورت استفاده از رابطه بی‌بعد پیشنهادی برای ارتفاع نظیر فشار متوسط، پراکندگی داده‌ها^۳

4 Stepped spillway
5 Baffle blocks
6 Peripheral Component Interconnect
7 Deflected Surface Jet
8 Reattaching Wall Jet

1 United States Bureau of Reclamation
2 Spatial hydraulic jump
3 Data dispersion

$$\varepsilon_t = \frac{E_1 - E_t}{E_1} = \frac{(Y_1 + \frac{V_1^2}{2g}) - (Y_t + \frac{V_t^2}{2g})}{(Y_1 + \frac{V_1^2}{2g})} \quad (1)$$

که در آن، پارامترهای Y_1 و V_1 به ترتیب برابر با عمق و سرعت جریان در ابتدای پرش هیدرولیکی، و پارامترهای Y_t و V_t به ترتیب برابر با عمق و سرعت جریان در انتهای پرش هیدرولیکی هستند.

۲-۲- ارتفاع نظیر فشار متوسط

مقدار فشار متوسط در هر نقطه به عنوان مبنای بررسی نوسانات فشار در آن نقطه است. اغلب چگونگی توزیع یک متغیر تصادفی حول مقدار متوسط آن دارای اهمیت است. مقادیر متوسط فشارهای نوسانی محدوده پرش هیدرولیکی در نقاط مختلف واقع در امتداد حوضچه آرامش تقریباً با فشار پیزومتریک یا پروفیل طولی سطح آب برابر است [۱]. برای پارامتر بی بعد ارتفاع نظیر فشار متوسط (Ψ_x^*) در پرش هیدرولیکی با شرایط مختلف جریان (آزاد و مستغرق) در پایین دست سرریز، روابط (۲) و (۳) ارائه شده است [۲۰ و ۲۱].

$$\Psi_x^* = \frac{P_x - Y_1}{Y_2 - Y_1} \times \frac{1}{S} = f(\Gamma_x^*) \quad (2)$$

$$\Gamma_x^* = \frac{X}{Y_2 - Y_1} \quad (3)$$

که در آن، P_x ارتفاع نظیر فشار متوسط در موقعیت طولی X ، Y_1 عمق اولیه پرش آزاد، Y_2 عمق ثانویه پرش آزاد، S درجه استغراق (Y_2/Y_1) ، Y_t عمق جریان در پایین دست حوضچه در حالت پرش مستغرق، Γ_x^* موقعیت بی بعد نقطه فشار و X موقعیت طولی نقطه فشار از ابتدای حوضچه هستند. در پرش هیدرولیکی آزاد، $S=1$ می باشد. مطابق مرجع [۸] به جای پارامتر Y_1 ، می توان با استفاده از روش پیشنهادی در مرجع [۲۲] و مطابق شکل ۱، پارامتر N_1 را

پشت بلوک ها در صفحه مرکزی فلوم توصیف می گردد [۱۳].

برخی پارامترهای فشار در حوضچه آرامش نوع دو USBR در مراجع [۱۷ و ۱۸] بررسی شده است. کاظمی و همکاران در سال ۲۰۱۶ با اندازه گیری فشارهای دینامیکی در کف حوضچه آرامش، نوسانات فشار در شرایط مختلف جریان را بررسی کردند. نتایج نشان داد که هنگامی که پرش هیدرولیکی به طور کامل در حوضچه تشکیل می گردد، فاکتورهای نوسانات فشار، زیاد می باشند. لذا در حالت $Q/Q_{max} = 0/47$ ، پرش هیدرولیکی کامل تشکیل می گردد [۱۷]. پادوانو و همکاران در سال ۲۰۱۷ آزمایش هایی بر روی حوضچه آرامش نوع دو USBR برای بررسی هیدرولیک جریان و راندمان استهلاک انرژی انجام دادند. در این تحقیق، با اندازه گیری مقادیر فشار در بالادست و پایین دست آستانه انتهایی، نوسانات فشار به راندمان استهلاک انرژی نسبت داده شد. همچنین به منظور طراحی صحیح حوضچه آرامش، معیارهایی برای تعیین نیروی درگ وارده بر آستانه ارائه گردید [۱۸].

به نظر می رسد که خصوصیات جریان و نوسانات فشار در پرش آزاد و مستغرق در داخل حوضچه های آرامش با اجزای کف نظیر بلوک و آستانه، به ندرت مورد توجه قرار گرفته است. در تحقیق حاضر، به بررسی خصوصیات جریان و پارامترهای فشار در پرش هیدرولیکی با اعداد فرود نسبتاً بالا در محدوده ۷/۱۲ تا ۹/۴۶، در شرایط مختلف جریان در پایین دست سرریز اوجی در کف حوضچه آرامش نوع دو USBR، پرداخته و نتایج آن با پرش آزاد در حوضچه های آرامش نوع یک USBR (با بستر صاف) مقایسه شده است.

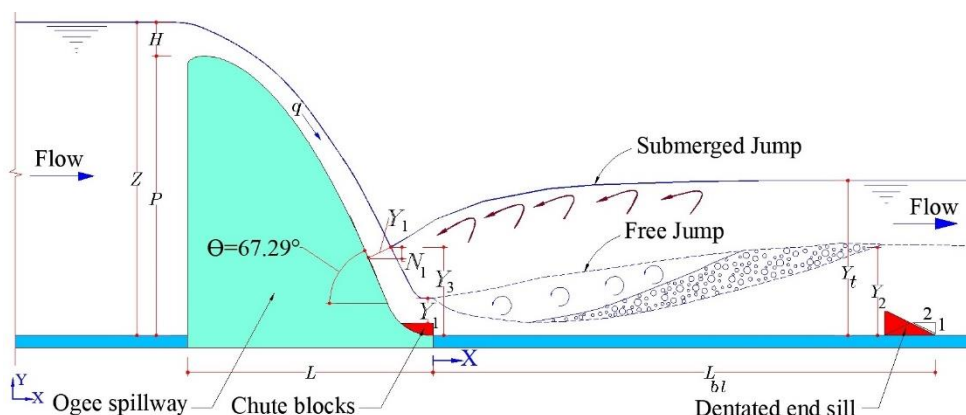
۲- مواد و روش ها

۲-۱- راندمان استهلاک انرژی

استهلاک انرژی^۱ در پرش هیدرولیکی (E_L) به صورت اختلاف انرژی های مخصوص در ابتدا و انتهای پرش (به ترتیب E_1 و E_t) تعریف می گردد. راندمان استهلاک انرژی (ε_t) طبق رابطه (۱) به صورت نسبت استهلاک انرژی به انرژی مخصوص در ابتدای پرش هیدرولیکی (E_L/E_1)، تعریف شده است [۱۹].

2 Mean pressure head

1 Energy dissipation



شکل ۱. تعریف پارامتر N_1 در پرش مستغرق با استفاده از روش پیشنهادی در مرجع [۲۲]

Fig. 1. Definition of the N_1 parameter in submerged jumps using the proposed method in reference [22]

۳-۲- انحراف معیار نوسانات فشار

انحراف معیار نوسانات فشار یکی از مهم‌ترین پارامترهای آماری برای تعریف شدت نوسانات فشار است. نوسانات فشار در پرش هیدرولیکی، با استفاده از پارامتر انحراف معیار (σ_X) ، طبق رابطه (۶) ارزیابی می‌گردد [۱].

$$\sigma_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - P_X)^2}{n}} \quad (6)$$

که در آن، P_i فشار لحظه‌ای در موقعیت طولی X است. مطابق رابطه (۷) برای بررسی پارامتر بی‌بعد انحراف معیار نوسانات فشار (Φ_X^*) ، از پارامتر استهلاک انرژی کل (E_L) استفاده می‌گردد [۲۰]. رابطه (۷) برای پارامتر Φ_X^* در پرش آزاد و مستغرق در مرجع [۲۱] ارائه شده است. نتایج نشان داده است که مقادیر نوسانات فشار به صورت تابعی از موقعیت نقطه در محدوده پرش هیدرولیکی (Γ_X^*) برای اعداد فرود مختلف، از یک روند واحد تبعیت می‌نمایند [۲۱].

$$\Phi_X^* = \frac{\sigma_X}{E_L} \times \frac{Y_2}{Y_1} \times \frac{1}{S} = f(\Gamma_X^*) \quad (7)$$

که در آن، Y_1/Y_2 نسبت اعماق مزدوج پرش و σ_X/E_L نسبت نوسانات فشار به استهلاک انرژی هستند. در روابط فوق، عدد فرود

در روابط فوق استفاده نمود. در صورت استفاده از پارامتر Y_1 ، عمق جریان در نقطه مورد نظر عمود بر هندسه کف سازه است. با این حال، فشار کف در یک موقعیت مشخص (X) ، برابر با $Y_1=N_1 \cos(\theta)$ بوده که در آن N_1 بار فشار استاتیکی و θ زاویه کف شوت سرریز نسبت به افق است [۲۲].

با اعمال اصلاحاتی در روابط (۲) و (۳)، می‌توان روابط زیر را برای پارامتر Ψ_X^* در پرش مستغرق ارائه نمود [۸].

$$\Psi_X^* = \frac{P_X - N_1}{Y_2 - N_1} \times \frac{1}{S} \quad (4)$$

$$\Gamma_X^* = \frac{X}{Y_2 - N_1} \times \frac{1}{\sqrt{S}} \quad (5)$$

پارامتر Y_2 با استفاده از سطح سنج اولتراسونیک اندازه‌گیری شد. پارامتر Y_1 را می‌توان با استفاده از رابطه پیوستگی جریان استخراج نمود. در حالت پرش آزاد $(S=1)$ ، مطابق شکل ۱، $Y_1=N_1$ است. در نقطه ابتدای پرش آزاد $(X=0)$ ، فشار را می‌توان به صورت هیدرواستاتیک در نظر گرفته و $P_X=Y_1$ است $(\Psi_X^*=0)$. در نقطه انتهایی پرش آزاد نیز فشار هیدرواستاتیک برقرار بوده و $P_X=Y_2$ است $(\Psi_X^*=1)$. برای شرایط پرش مستغرق، فشار در انتهای پرش به صورت $S.Y_i=Y_2$ بوده و پارامتر Ψ_X^* برابر با واحد نخواهد بود.

1 Standard deviation of pressure fluctuations

سری داده‌های اندازه‌گیری شده و P_{min} فشار حداقل سری داده‌های اندازه‌گیری شده هستند. مقادیر پیک ضرایب هیدرودینامیکی مربوط به نوسانات فشار در طراحی ضخامت دال کف حوضچه‌ها و تعیین نیروهای وارده بر آن مورد نیاز هستند. ضریب C_p^+ بیان‌کننده تأثیر ضربات ناشی از نوسانات فشار وارده بر کف حوضچه است. همچنین ضریب C_p^- تأثیر نیروهای بالابر در زیر دال کف حوضچه و پدیده کاویتاسیون را نشان می‌دهد [۱۰]. مقایر ضرایب فشار حدی تحت تأثیر پارامتر عدد فرود اولیه جریان و مدت زمان بهره‌برداری می‌باشد. به نحوی که در مرجع [۱۱]، مقادیر بالا در حدود واحد برای ضرایب فشار حدی در مدت زمان آزمایش طولانی مشاهده شده است. محدود بین -1 و $+1$ برای این ضرایب در نمونه‌های پروتوتیپ مورد انتظار می‌باشد [۳]. در مرجع [۴]، معیاری برای استخراج این ضرایب در موارد عملی با ارائه مثال طراحی پیشنهاد شده است.

۲-۵- ضریب چولگی

تجزیه و تحلیل ضریب چولگی یا عدم تقارن^۵ (A_d) برای تعیین نقطه جدایش جریان^۶ دارای اهمیت است [۲]. توزیع طولی ضریب A_d نشان‌دهنده میزان تأثیر مقادیر حدی بر مقدار متوسط است. در حالت $A_d < 0$ ، تابع چگالی احتمال به سمت راست سوق داده شده که به مفهوم وجود داده‌های لحظه‌ای فشار بزرگ‌تر از مقدار متوسط است و بالعکس. ضریب A_d به صورت تابعی از موقعیت بی‌بعد نقطه مورد نظر در امتداد حوضچه (Γ_X^*)، مطابق رابطه (۱۲)، محاسبه می‌گردد [۲۰].

$$A_d = \sum_{i=1}^n \frac{(P_i - P_X)^3}{n \sigma_X^3} = f(\Gamma_X^*) \quad (12)$$

۲-۶- تجهیزات آزمایشگاهی

در تحقیق حاضر، خصوصیات جریان و داده‌های سری زمانی فشار پرش هیدرولیکی در نقاط مورد نظر بر روی کف حوضچه آرامش نوع دو USBR در پایین‌دست سرریز اوجی شکل بررسی و با حوضچه نوع یک مقایسه شده است. مطابق شکل ۲، از فلوم آزمایشگاهی با مقطع مستطیلی و دیواره‌های شیشه‌ای از جنس پلکسی گلاس به طول ۱۰ متر، عرض ۵۱ سانتی‌متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر واقع

اولیه (Fr_1) به صورت غیرمستقیم در پارامتر Y_1/Y_2 لحاظ شده است. مطابق مرجع [۸]، برای حالت پرش مستغرق، پارامتر Γ_X^* در نمودارهای Φ_X^* ، مشابه پارامتر Ψ_X^* ، به فرم ارائه شده در رابطه (۵) در نظر گرفته شده است. نمودارهای ارائه شده، داده‌های مربوط به شرایط مختلف جریان را با پراکندگی کمتر نشان داده و بیشترین تغییرات را به ناحیه $\Gamma_X^* \approx 3$ محدود می‌نماید. همچنین نتایج نشان داد که اگر نمودار پارامتر Φ_X^* به صورت جداگانه برای هر تحقیق ارائه گردد، پراکندگی داده‌ها بسیار کمتر خواهد شد. به بیان دیگر، اندازه‌گیری نوسانات فشار تحت تأثیر عوامل متعددی از قبیل دقت اندازه‌گیری و روش نصب مبدل فشار، طول شیلنگ‌های مورد استفاده، قطر نقطه فشار^۱ و سایر موارد است [۸].

۲-۴- ضرایب فشار حدی

به منظور تجزیه و تحلیل نیروهایی که پایداری دال حوضچه آرامش را تحت تأثیر قرار می‌دهند، تعیین دامنه حدی مقادیر فشار، یک امر بدیهی است. این ضرایب، به ترتیب حداکثر نوسانات فشارهای مثبت و منفی نسبت به مقدار متوسط، و دامنه کل نوسانات فشار را به عنوان تابعی از انرژی جنبشی جریان در ابتدای پرش ($2g/V_1^2 = E_1$) نشان می‌دهند [۱].

$$C_p^+ = \frac{P_{max} - P_X}{E_1} \quad (8)$$

$$C_p^- = \frac{P_{min} - P_X}{E_1} \quad (9)$$

$$C_p = C_p^+ + |C_p^-| \quad (10)$$

$$\Gamma_X' = \frac{X}{Y_1} \quad (11)$$

که در آن، C_p^+ ضریب حداکثر نوسان فشارهای مثبت^۲ (بزرگ‌تر از متوسط)، C_p^- ضریب حداکثر نوسان فشارهای منفی^۳ (کوچک‌تر از متوسط)، C_p ضریب کل نوسانات فشار^۴، P_{max} فشار حداکثر

1 Pressure tap

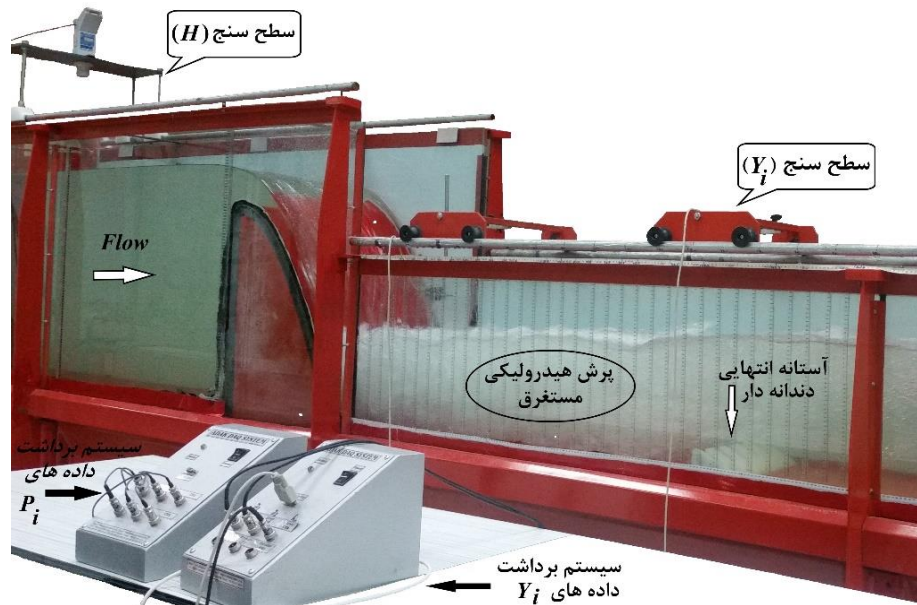
2 Maximum positive pressure fluctuation coefficient

3 Maximum negative pressure fluctuation coefficient

4 Total pressure fluctuation coefficient (amplitude)

5 Skewness coefficient

6 Flow detachment point



شکل ۲. فلوم آزمایشگاهی و تجهیزات مورد استفاده در تحقیق حاضر
 Fig. 2. Laboratory flume and instrument used in the present study

عمق ثانویه پرش آزاد (Y_2) و عمق ثانویه پرش مستغرق یا عمق پایاب Y_1 ، با استفاده از یک دستگاه سنسور اولتراسونیک نوع Datalogic مدل $US30-PR-5-N13-VH$ ساخت کشور ایتالیا با دقت اسمی حداقل یک میلی‌متر، انجام یافته است. مقادیر دبی جریان با استفاده از یک دستگاه فلومتر پرتابل اولتراسونیک نوع Trodeks با سنسور TM1 ساخت کشور انگلیس اندازه‌گیری شده‌اند. دقت اسمی اندازه‌گیری این نوع دبی‌سنج برابر با $\pm 0.5\%$ درصد با بسامد ۳۶۰۰ مگاهرتز است. مقادیر مختلف درجه استغراق ($S = Y_1/Y_2$) مورد استفاده در تحقیق حاضر، به ترتیب برابر با ۱، $1/0.5$ ، $1/1$ ، $1/2$ ، $1/3$ و $1/4$ می‌باشند. برای محاسبه پارامترهای جریان ورودی، مطابق شکل ۱ از روابط زیر استفاده شده است [۲۵].

$$V_1 = \sqrt{2g \times (Z - \frac{H}{2})} \quad (13)$$

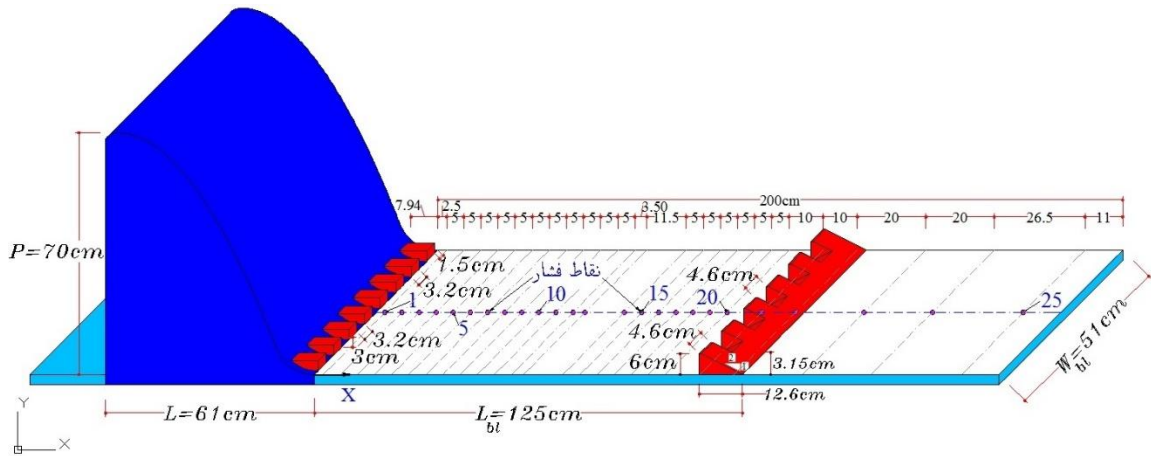
$$Y_1 = \frac{q}{V_1} \quad (14)$$

$$Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g \times Y_1}} \quad (15)$$

که در آن، Fr_1 عدد فرود اولیه جریان و g شتاب ثقل زمین هستند. مطابق شکل ۱، H بار آبی بالادست سرریز اوجی و Z اختلاف ارتفاع سطح آب بالادست سرریز و تراز کف حوضچه آرامش ($Z = P + H$)

در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تبریز استفاده شده است. ارتفاع دیواره‌های فلوم در بالادست سرریز اوجی (با ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر)، برابر با ۱۰۰ سانتی‌متر است. جهت تثبیت موقعیت پرش در شرایط مختلف جریان، از سرریز لولایی در انتهای فلوم، استفاده شده است. با اندازه‌گیری فشارهای لحظه‌ای نقاط واقع در کف حوضچه با استفاده از شش دستگاه مبدل فشار^۱ نوع Atek مدل $BCT-110-100\ mbar-A-G1/4$ ساخت کشور ترکیه، داده‌های اولیه به سیگنال‌های الکتریکی تبدیل می‌گردند. پس از انتقال سیگنال‌ها به سیستم داده‌برداری (DAQ^۲)، داده‌های فشار با استفاده از سیستم کامپیوتری در محیط اکسل قابل مشاهده است. مبدل‌های فشار برای محدوده بار فشار ۱۰۰- تا ۱۰۰+ سانتی‌متر کالبره شده و دقت اسمی اندازه‌گیری آن‌ها $\pm 0.5\%$ درصد هستند. بسامد داده برداری مبدل‌های فشار، ۲۰ هرتز بوده و مدت زمان برداشت داده‌ها، ۹۰ ثانیه برای هر نقطه فشار در هر آزمایش در نظر گرفته شده است. در تحقیق حاضر، ابعاد هندسی سرریز اوجی شکل و حوضچه آرامش، بر اساس معیارهای USBR طراحی شده‌اند [۲۳ و ۲۴]. بر این اساس، طول حوضچه (L_{bl}) بر اساس مقدار دبی جریان عبوری حداکثر $60/4$ لیتر بر ثانیه، برابر با ۱۲۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. اندازه‌گیری عمق جریان در نقاط مختلف شامل عمق اولیه پرش مستغرق (Y_3).

1 Pressure transmitter
 2 Data acquisition system



شکل ۳. آرایش نقاط فشار کف واقع در خط مرکزی حوضچه آرامش نوع دو USBR

Fig.3. Arrangement of pressure taps located in the centerline of the USBR type II stilling basin

جدول ۱. خصوصیات جریان در شرایط مختلف پرش آزاد حوضچه نوع دو USBR

Table 1. Flow characteristics under different conditions of free jumps of the USBR type II basin

Q (L/s)	Z (cm)	V_1 (m/s)	Y_1 (cm)	Fr_1	Y_2 (cm)
۳۳/۰	۸۰/۶۵	۳/۸۴	۱/۶۸	۹/۴۶	۱۹/۶۹
۴۳/۰	۸۲/۰۲	۳/۸۶	۲/۱۸	۸/۳۴	۲۲/۴۴
۴۷/۵	۸۲/۵۲	۳/۸۷	۲/۴۱	۷/۹۶	۲۳/۵۷
۵۲/۷	۸۳/۳۵	۳/۸۸	۲/۶۶	۷/۵۹	۲۴/۷۰
۵۵/۰	۸۳/۷۷	۳/۸۸	۲/۷۸	۷/۴۴	۲۵/۳۳
۶۰/۴	۸۴/۳۹	۳/۸۹	۳/۰۴	۷/۱۲	۲۶/۶۰

تحقیق حاضر، بررسی نوسانات فشار در کف حوضچه آرامش است، لذا با استفاده از قضیه باکینگهام و با انتخاب متغیرهای V_1 ، Y_1 و Wp می‌توان ضرایب مختلف مربوط به نوسانات فشار ($X*P$) شامل پارامترهای بی‌بعد ارتفاع نظیر فشار متوسط ($X*\Psi$)، انحراف معیار نوسانات فشار ($X*\Phi$)، ضریب حداکثر نوسان فشارهای مثبت ($+PC$)، ضریب حداکثر نوسان فشارهای منفی ($-PC$)، ضریب کل نوسانات فشار (PC) و ضریب چولگی (dA) را در حالت کلی به صورت تابعی از پارامترهای بی‌بعد مؤثر دیگر به صورت زیر تعریف نمود.

$$P_X^* = f\left(\frac{V_1}{\sqrt{g \cdot Y_1}}, \frac{X}{Y_2 - Y_1}, \frac{Y_1}{Y_2}\right) = f(Fr_1, \Gamma_X^*, S) \quad (17)$$

که در آن، Y_1/Y_2 نسبت اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی بوده و

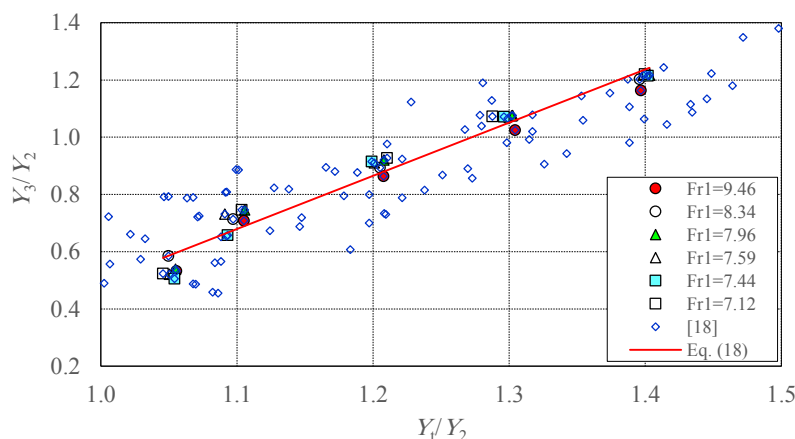
هستند. مطابق شکل ۳، نقاط فشار شماره ۳۲ تا ۵۲ جهت اندازه‌گیری فشار کف در خارج از محدوده حوضچه پیش‌بینی شده‌اند. مطابق شکل ۳، موقعیت نقاط اندازه‌گیری فشار کف (X) از ۲/۵ سانتی‌متر (نقطه فشار شماره ۱) تا ۱۸۹ سانتی‌متر (نقطه فشار شماره ۲۵) است.

۷-۲-آنالیز ابعادی

با توجه به شکل ۱، مقادیر فشارهای نوسانی ناشی از پرش هیدرولیکی بر روی کف حوضچه آرامش تابعی از متغیرهای مؤثر در جریان با سطح آزاد به شرح زیر هستند.

$$f(P', V_1, Y_1, Y_2, Y_t, \rho_w, g) = 0 \quad (16)$$

که در آن، P' مؤلفه نوسانی فشار ($P_i - P_X$) لزوجت دینامیکی آب و Wp جرم مخصوص آب هستند. با توجه به اینکه هدف از



شکل ۴. تغییرات Y_3/Y_2 نسبت به Y_1/Y_2 در پرش هیدرولیکی مستغرق برای حوضچه نوع دو USBR

Fig. 4. Variations of Y_3/Y_2 as a function of Y_1/Y_2 in submerged hydraulic jumps for the USBR type II basin

برای پرش مستغرق ($Y_1/Y_2 > 1$)، رابطه (۸۱) با ضریب تبیین (R2) برابر با ۰/۷۹ را ارائه می‌دهد. مشاهده می‌شود که پارامتر Y_2 ، اثرات هر دو پارامتر Fr_1 و Y_1 را شامل می‌گردد.

$$\frac{Y_3}{Y_2} = 1.8558\left(\frac{Y_1}{Y_2}\right) - 1.4893 \quad (18)$$

مطابق شکل ۵ مشاهده می‌گردد که تغییرات راندمان استهلاک انرژی (\mathcal{E}_f) در اعداد فرود بزرگ‌تر، بیشتر بوده و تمام اعداد فرود، دارای روند مشابه هستند. این نتیجه مطابق با مرجع [۱۸] است. مطابق رابطه (۱)، با کاهش عدد فرود اولیه، نرخ افزایش مقادیر انرژی مخصوص در ابتدای پرش، کمتر از مقادیر متناظر آن در انتهای پرش است. در نتیجه، با کاهش عدد فرود اولیه، پارامتر \mathcal{E}_f کاهش می‌یابد. برای یک عدد فرود اولیه معین، با افزایش درجه استغراق، پارامتر \mathcal{E}_f به تدریج به صورت خطی کاهش می‌یابد. اختلاف بین حداکثر راندمان (پرش آزاد) و حداقل راندمان (پرش مستغرق) برای عدد فرود حداکثر، حدود ۱۳ درصد و برای عدد فرود حداقل، حدود ۱۹ درصد است. بنابراین مطابق شکل ۵، راندمان استهلاک انرژی در پرش مستغرق نسبت به پرش آزاد، کمتر است. نقطه پیک منحنی افت انرژی در پرش آزاد واقع شده است. با افزایش درجه استغراق، اختلاط جت و راندمان استهلاک انرژی در پرش مستغرق نسبت به پرش آزاد کاهش می‌یابد. در نتیجه، کاهش جت‌های سرعت حداکثر در پرش

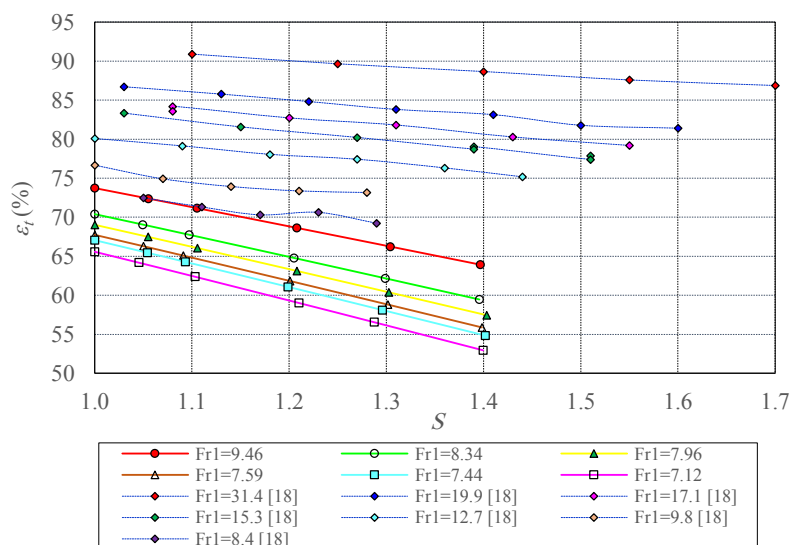
تابع عدد فرود می‌باشد. پارامترهای Y_t/Y_2 و $V_1/\sqrt{gY_1}$ ، $\rho_w V Y_1 / \mu$ به ترتیب بیانگر درجه استغراق پرش هیدرولیکی (S)، عدد فرود اولیه (Fr1) و عدد رینولدز اولیه (Re1) می‌باشند. پارامتر عدد رینولدز بیانگر اثر نیروی لزجت سیال بوده و با توجه به اینکه جریان در پرش هیدرولیکی در محدوده کاملاً متلاطم می‌باشد، از آن صرف‌نظر می‌گردد. پارامتر عدد فرود در جریان‌های روباز دارای اهمیت فراوانی بوده و در نظر گرفتن آن در پدیده پرش هیدرولیکی ضروری می‌باشد. در نمودارهای مربوط به تغییرات طولی برخی ضرایب فشار، از پارامتر $\Gamma_x^* = X / (Y_2 - Y_1)$ برای فواصل بی‌بعد استفاده شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- خصوصیات جریان

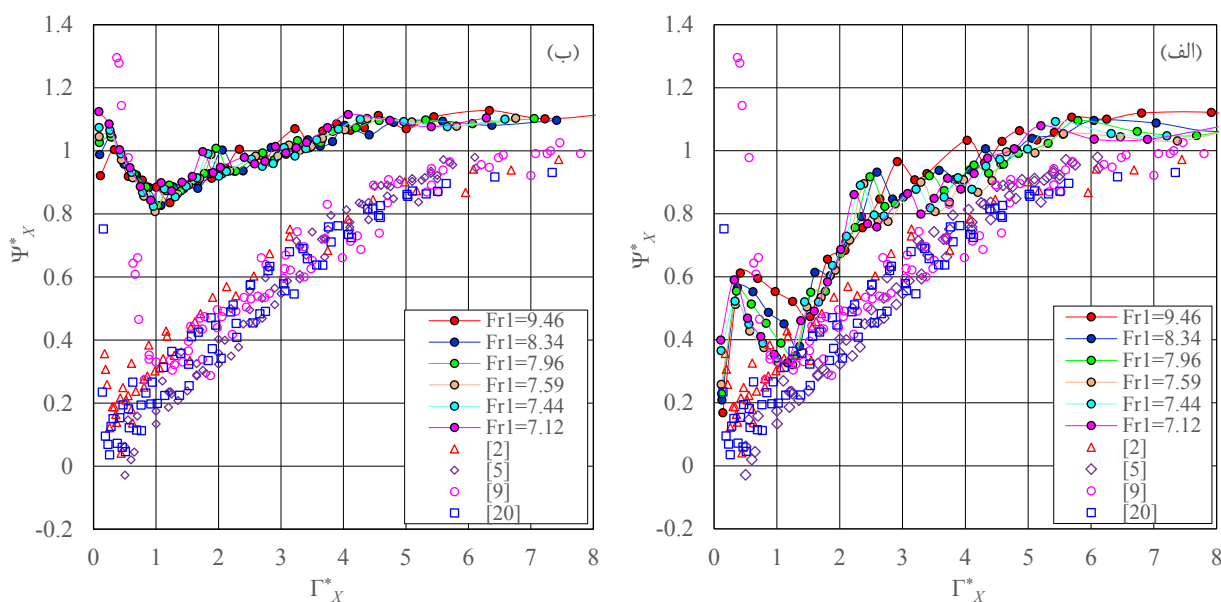
در جدول ۱، برخی خصوصیات اندازه‌گیری شده و محاسباتی جریان در پایین‌دست سرریز اوجی در شرایط مختلف پرش آزاد ارائه شده است. مطابق نتایج ارائه شده در جدول ۱، با افزایش دبی جریان، مقادیر عدد فرود اولیه در پرش آزاد کاهش می‌یابد.

در پایین‌دست سرریزها، مطابق رابطه (۵۱) برای عدد فرود اولیه جریان (Fr_1)، با افزایش دبی جریان ورودی، نرخ رشد عمق اولیه (Y_1) بیشتر از نرخ رشد سرعت جریان اولیه (V_1) است. به عبارت دیگر، پارامتر Y_1 نقش مهمی در تعیین مقادیر Fr_1 ایفاء می‌نماید. در پرش مستغرق، داده‌های بی‌بعد عمق اولیه جریان (Y_3/Y_2) نسبت به داده‌های بی‌بعد عمق ثانویه جریان (Y_t/Y_2)، مشابه مرجع [۱۸]، بر روی یک منحنی قرار می‌گیرند (شکل ۴). رگرسیون خطی داده‌ها



شکل ۵. تغییرات راندمان استهلاک انرژی برای حوضچه نوع دو USBR در اعداد فرود مختلف نسبت به درجه استغراق

Fig. 5. Energy dissipation efficiency for the USBR type II basin in different Froude numbers versus the submergence degree



شکل ۶. توزیع پارامتر Ψ_x^* در اعداد فرود اولیه مختلف برای حوضچه‌های نوع یک و دو USBR: (الف) $S=1.00$ و (ب) $S=1.40$

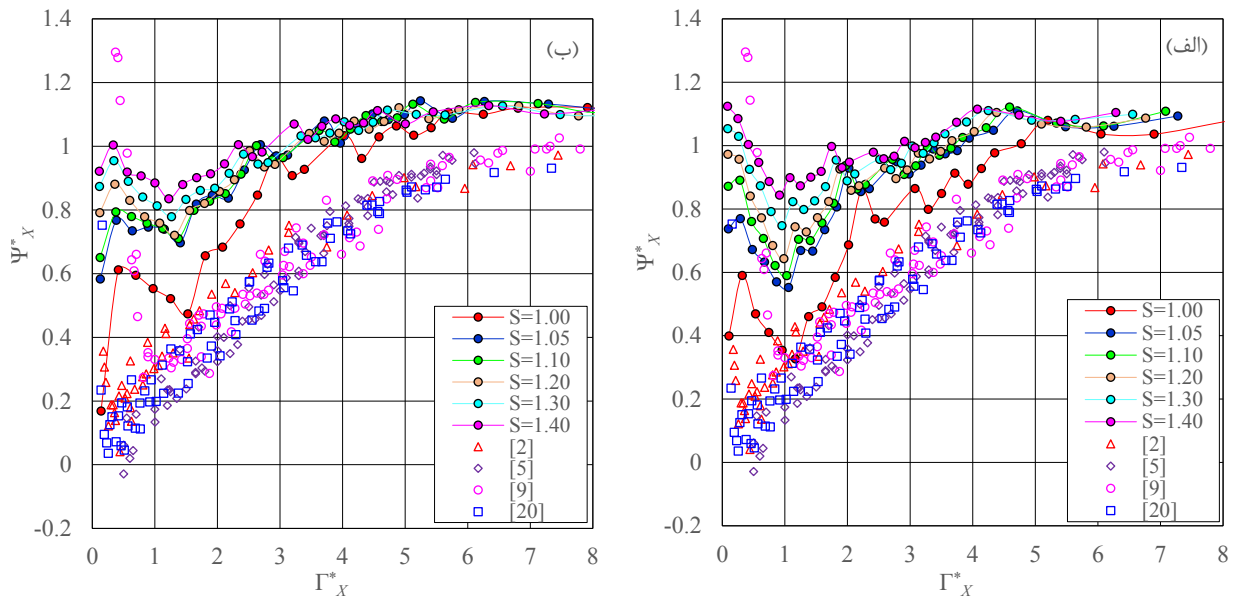
Fig. 6. Distribution of Ψ_x^* parameter in different Froude numbers for the USBR type I and II basins; (a) $S=1.00$; (b) $S=1.40$

سرریز به کف حوضچه (با توجه به تعبیه بلوک‌های پای تندآب)، مقادیر فشار در این ناحیه، تحت تأثیر جت جریان در ابتدای حوضچه، افزایش می‌یابند. در نتیجه، پارامتر Ψ_x^* تحقیق حاضر، دارای مقادیر بیشتری در مقایسه با نتایج سایر مراجع [۲۰ و ۵ و ۲] در حوضچه‌های نوع یک است. به نظر می‌رسد که این امر مربوط به وجود انحنای در محل اتصال کف حوضچه صاف با سرریز اوجی است. پس از موقعیت

مستغرق، با تأخیر همراه بوده که به عنوان یک ویژگی نامطلوب برای این نوع جریان محسوب می‌گردد [۱۹].

۳-۲- ارتفاع نظیر فشار متوسط

بررسی نمودارهای Ψ_x^* (شکل‌های ۶ و ۷) نشان می‌دهد که در حوضچه نوع دو، به خاطر عدم وجود انحنای قائم در محل اتصال



شکل ۷. توزیع پارامتر Ψ^*_χ در درجه‌های استغراق مختلف برای حوضچه‌های نوع یک و دو USBR: (الف) $Fr_1=7.12$ و (ب) $Fr_1=9.46$

Figure 7. Distribution of Ψ^*_χ parameter in different submergence degrees for the USBR type I and II basins; (a) $Fr_1=7.12$; (b) $Fr_1=9.46$

به کار رفته در تحقیق حاضر، در حدود ۰/۵۰ بوده که این مقدار در مرجع [۹] در حوضچه نوع یک با سرریز پله‌ای به حدود ۱/۲ افزایش یافته است.

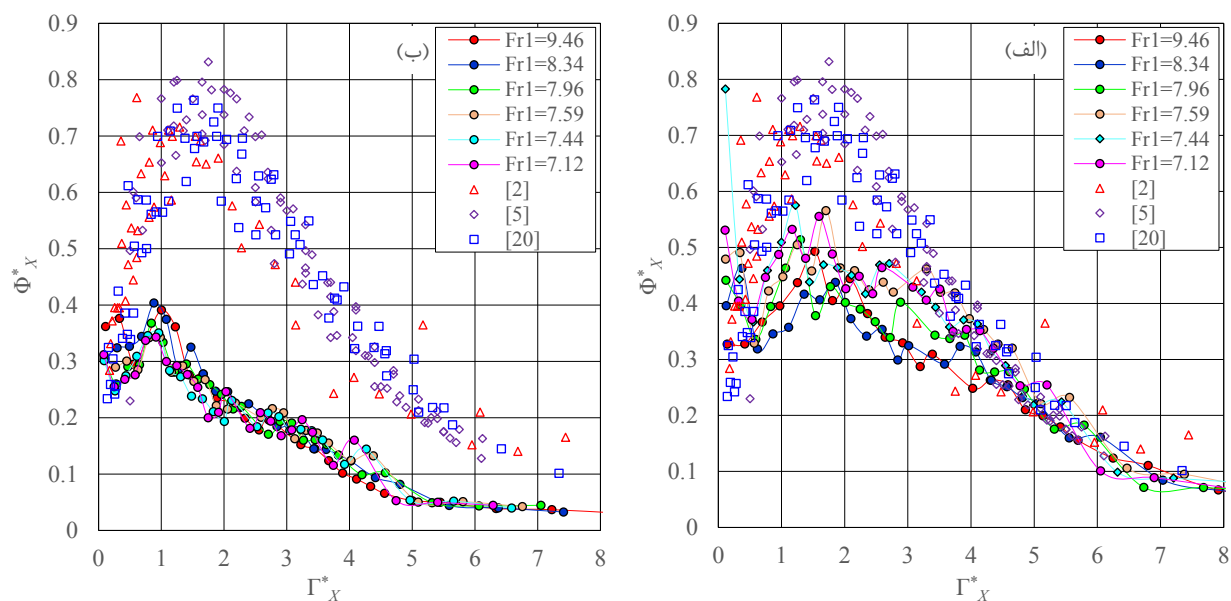
مطابق شکل‌های ۶ و ۷، مقادیر Ψ^*_χ در حوضچه نوع دو بیشتر از مقادیر متناظر در حوضچه‌های نوع یک است. متوسط افزایش مقادیر پارامتر Ψ^*_χ در پرش آزاد در امتداد حوضچه نوع دو در مقایسه با حوضچه‌های نوع یک ارائه شده در مراجع [۲۰ و ۵] به ترتیب در حدود ۴۴، ۳۰ و ۳۳ درصد است. این امر به خاطر کاهش پارامتر Y_2 در حوضچه‌های نوع دو نسبت به نوع یک است. با توجه به رابطه (۴)، با کاهش Y_2 پارامتر Ψ^*_χ افزایش می‌یابد. برای یک دبی جریان مشخص، مقدار ارتفاع نظیر فشار متوسط در پرش مستغرق بیشتر از پرش آزاد است. متوسط افزایش مقادیر پارامتر Ψ^*_χ در حوضچه نوع دو در پرش هیدرولیکی با درجه‌های استغراق ۱/۰۵، ۱/۱، ۱/۲، ۱/۳ و ۱/۴ در مقایسه با پرش آزاد، به طور تقریبی به ترتیب برابر با ۲۸، ۳۲، ۳۸، ۴۷ و ۵۳ درصد محاسبه شده است.

۳-۳- انحراف معیار نوسانات فشار

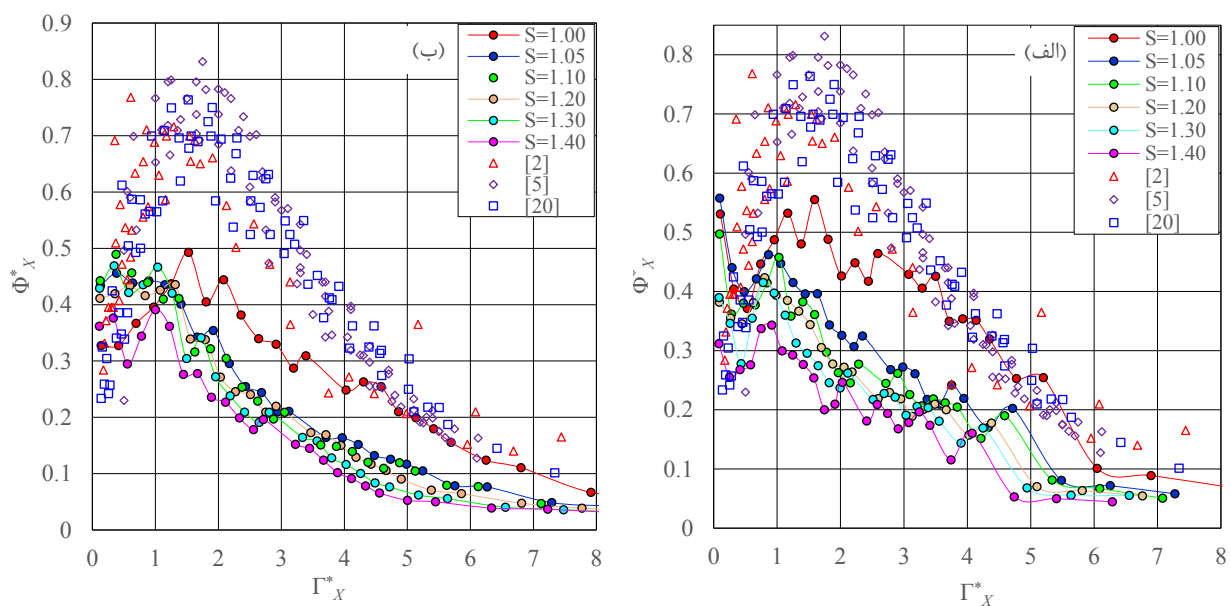
با توجه به شکل‌های ۸ و ۹، در ابتدای پرش، با افزایش میزان تلاطم جریان، نوسانات فشار افزایش می‌یابند. در طول پرش،

مذکور تا $1\Gamma^*_\chi \approx$ مقادیر Ψ^*_χ در حوضچه نوع دو، کاهش می‌یابند. از این نقطه به بعد، داده‌های Ψ^*_χ دارای الگوی مشابه با داده‌های دیگران بوده و با شیب تقریباً یکسان تا موقعیت $4\Gamma^*_\chi \approx$ افزایش می‌یابند. پس از آن، روند افزایشی مقادیر Ψ^*_χ با شیب ملایم‌تر ادامه می‌یابد. با توجه به نمودارهای ارائه شده، محدوده $6\Gamma^*_\chi \approx$ موقعیت انتهای استهلاك انرژی یا پرش هیدرولیکی در شرایط جریان آزاد را نشان می‌دهد. در انتهای پرش، تأثیر نیروهای جت آب ناشی از پرش هیدرولیکی بر کف حوضچه به حداقل رسیده و مقایز ضریب چولگی (A_d) به سمت صفر میل می‌نمایند [۲۰]. مطابق شکل‌های ۶ و ۷، در محدوده $6\Gamma^*_\chi \approx$ ، مقادیر پارامتر Ψ^*_χ تقریباً برابر با یک است. موقعیت انتهای پرش هیدرولیکی (Γ^*_p) در حوضچه‌های نوع یک، مطابق مراجع [۲۰ و ۲]، به ترتیب برابر با ۸ و ۸/۵ هستند. بنابراین طول حوضچه نوع دو نسبت به حوضچه‌های نوع یک در حدود ۲۷ درصد کاهش می‌یابد.

در مرجع [۹]، مقادیر پارامتر Ψ^*_χ در محدوده ابتدای حوضچه نوع یک واقع در پایین دست سرریز پله‌ای، بیشتر از مقادیر متناظر آن در حوضچه‌های نوع یک و دو مربوط به سرریزهای اوجی شکل هستند. در محدوده نزدیک‌ترین نقاط حوضچه به پنجه سرریز اوجی ($\Gamma^*_\chi \geq 0.5$)، مقدار متوسط پارامتر Ψ^*_χ در پرش آزاد برای حوضچه نوع دو



شکل ۸. توزیع پارامتر Φ^*_χ در اعداد فرود اولیه مختلف برای حوضچه‌های نوع یک و دو USBR: (الف) $S=1.00$ و (ب) $S=1.40$
 Fig. 8. Distribution of Φ^*_χ parameter in different Froude numbers for the USBR type I and II basins; (a) $S=1.00$; (b) $S=1.40$



شکل ۹. توزیع پارامتر Φ^*_χ در درجه‌های استغراق مختلف برای حوضچه‌های نوع یک و دو USBR: (الف) $Fr_1=7.12$ و (ب) $Fr_1=9.46$
 Fig. 9. Distribution of Φ^*_χ parameter in different submergence degrees for the USBR type I and II basins; (a) $Fr_1=7.12$; (b) $Fr_1=9.46$

مطابق جدول ۲، موقعیت مقادیر حداکثر پارامتر Φ^*_χ ($\Gamma^*_{\chi max}$) در حوضچه‌های نوع دو در محدوده کوچک‌تر از $1/7$ و در حوضچه‌های نوع یک، در محدوده کوچک‌تر از $2/04$ مشاهده می‌گردند [۲۰] و ۵ و ۲]. وجود بلوک‌های پای تندآب در کف حوضچه نوع دو باعث شده است که مقادیر $\Phi^*_{\chi max}$ در محدوده نسبتاً نزدیک‌تری نسبت به

اختلاف مقادیر ارتفاع نظیر فشارهای حداکثر و حداقل از فشار متوسط، بیشتر می‌شود. در انتهای پرش با توجه به کاهش شدت تلاطم پرش هیدرولیکی، این اختلاف به حداقل می‌رسد. در یک دبی جریان مشخص، مقادیر پارامتر Φ^*_χ با افزایش درجه استغراق، کاهش می‌یابند.

جدول ۲. محدوده مقادیر Φ_{Xmax}^* و موقعیت Γ_{Xmax}^* برای حوضچه‌های نوع یک و دو USBR
 Table 2. Range of Φ_{Xmax}^* values and the position of Γ_{Xmax}^* for the USBR type I and II basins

Flow conditions	Φ_{Xmax}^*	Γ_{Xmax}^*
S=1.00	0.46-0.58	1.22-1.70
S=1.05	0.35-0.56	0.87-1.18
S=1.10	0.38-0.50	0.89-1.22
S=1.20	0.40-0.44	0.81-1.31
S=1.30	0.37-0.48	0.78-1.04
S=1.40	0.34-0.40	0.84-1.00
[۲]	0.65-0.77	0.61-1.70
[۵]	0.73-0.83	1.40-2.00
[۲۰]	0.69-0.76	1.85-2.04

جدول ۳. ضرایب رابطه پیشنهادی و معیارهای آماری پیش‌بینی پارامتر Φ_X^* برای حوضچه نوع دو USBR
 Table 3. Proposed relationship coefficients and statistical criteria to estimate Φ_X^* parameter for the USBR type II basin

S	α	β	γ	δ	R	RMSE	MAE
۱/۰۰	۰/۴۳۲۷	-۰/۰۵۵۵	-۰/۱۶۶۳	۰/۰۱۹۵	۰/۷۹۳	۰/۰۶۰	۰/۰۴۴
۱/۰۵	۰/۴۴۳۹	۰/۰۱۶۴	۰/۱۲۴۱	۰/۰۷۷۷	۰/۹۲۹	۰/۰۳۷	۰/۰۲۹
۱/۱۰	۰/۴۴۰۲	۰/۰۷۶۵	۰/۲۱۷۶	۰/۱۵۷۵	۰/۹۴۷	۰/۰۳۳	۰/۰۲۷
۱/۲۰	۰/۳۶۹۵	۰/۱۶۱۱	۰/۱۰۵۳	۰/۳۰۷۸	۰/۹۵۶	۰/۰۲۸	۰/۰۲۲
۱/۳۰	۰/۳۴۷۲	۰/۱۴۳۶	-۰/۰۵۵۸	۰/۳۶۱۰	۰/۹۴۱	۰/۰۳۴	۰/۰۲۵
۱/۴۰	۰/۲۷۸۹	۰/۱۱۴۴	-۰/۰۶۵۵	۰/۳۱۳۳	۰/۹۳۳	۰/۰۲۸	۰/۰۲۲

بی‌بعد بودن پارامترهای به کار رفته در رابطه (۱۹)، پارامترهای آماری RMSE و MAE در جدول ۳، بی‌بعد بوده و این رابطه برای محدوده $\Gamma_X^* \geq 0.57$ ارائه شده است.

$$\Gamma_X^* = \frac{\alpha + \beta \Gamma_X^*}{1 + \gamma \Gamma_X^* + \delta \Gamma_X^{*2}} \quad (19)$$

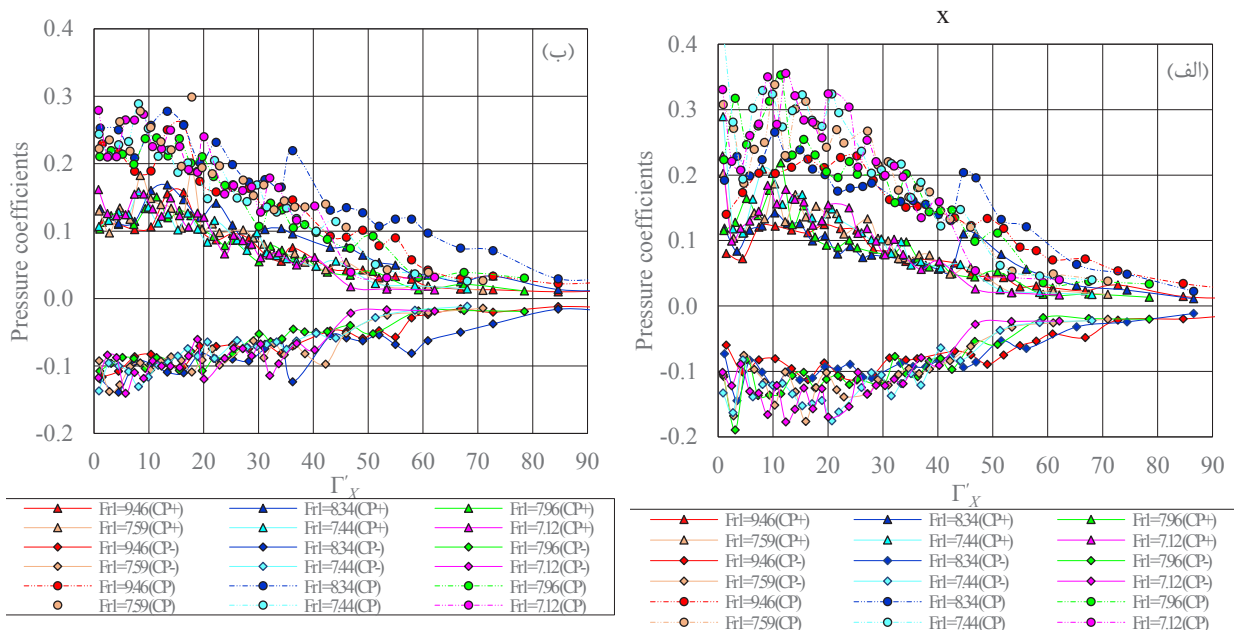
۳-۴- ضرایب فشار حدی

مطابق شکل‌های ۱۰ و ۱۱، تغییرات ضریب C_p^+ به نحوی است که در ابتدای پرش هیدرولیکی دارای روند افزایشی بوده و پس از رسیدن به مقدار حداکثر، کاهش می‌یابد. روند تغییرات ضریب C_p^- در ابتدا تقریباً به صورت کاهشی بوده و پس از رسیدن به مقدار حداقل، افزایش می‌یابد. ضرایب C_p^+ و C_p^- در انتهای حوضچه به مقدار صفر نزدیک می‌گردد. تغییرات ضرایب فشار نشان می‌دهد که

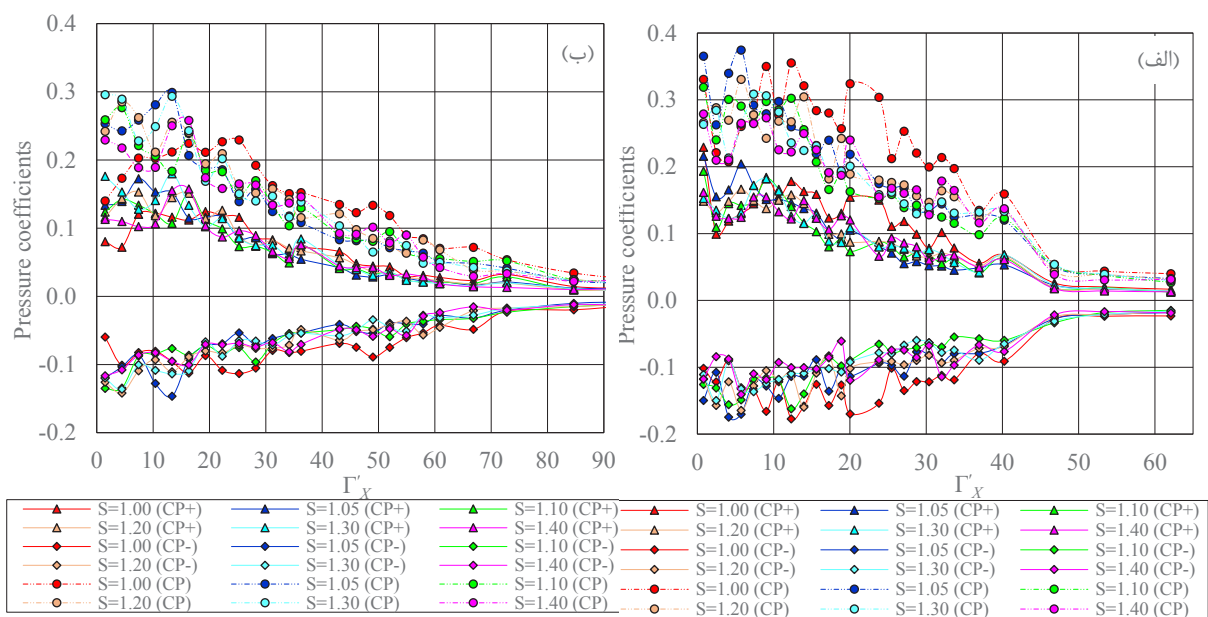
ابتدای حوضچه اتفاق بیفتد. مقدار این پارامتر در تحقیق حاضر در حدود ۰/۵۲ است. این مقدار در مراجع [۲۰ و ۵ و ۲]، به ترتیب برابر با ۰/۷۱، ۰/۷۸ و ۰/۷۲ هستند. میزان کاهش Φ_{Xmax}^* در حوضچه نوع دو نسبت به حوضچه نوع یک در پرش آزاد، به طور متوسط در حدود ۳۰ درصد است. متوسط کاهش مقادیر Φ_{Xmax}^* در پرش هیدرولیکی با درجه‌های استغراق ۱/۰۵ و ۱/۴ در مقایسه با پرش آزاد، به ترتیب در حدود ۱۳ و ۲۹ درصد هستند. با افزایش درجه استغراق، موقعیت وقوع Γ_{Xmax}^* به سمت ابتدای حوضچه، جابجا می‌گردد. البته مطابق جدول ۲، موقعیت ارائه شده در نوسان است.

تابع کسری چند جمله‌ای گویا^۱ از مرتبه دو برای پیش‌بینی پارامتر Φ_X^* در درجه‌های استغراق مختلف نسبت به موقعیت بی‌بعد نقطه مورد نظر (Γ_X^*) به صورت رابطه (۱۹) ارائه شده است. با توجه به

1 Rational model



شکل ۱۰. توزیع ضرایب فشار (C_p^+ , C_p^- و C_p) در اعداد فرود اولیه مختلف برای حوضچه نوع دو USBR؛ (الف) $S=1.00$ و (ب) $S=1.40$
Fig. 10. Distribution of pressure coefficients (C_p^+ , C_p^- and C_p) in different Froude numbers for the USBR type II basin; (a) $S=1.00$; (b) $S=1.40$



شکل ۱۱. توزیع ضرایب فشار (C_p^+ , $-C_p^-$ و C_p) در درجه‌های استغراق مختلف برای حوضچه نوع دو USBR؛ (الف) $Fr_1=7.12$ و (ب) $Fr_1=9.4$
Fig. 11. Distribution of pressure coefficients (C_p^+ , $-C_p^-$ and C_p) in different submergence degrees for the USBR type II basin; (a) $Fr_1=7.12$; (b) $Fr_1=9.4$

به ترتیب برابر با ۱۵ و ۱۷ درصد هستند. محدوده مقادیر ضرایب C_p^+ و $C_p^-|_{max}$ در پرش آزاد در مرجع [۱۷] که بر روی حوضچه نوع دو بوده است، به ترتیب برابر با $۰/۳۸-۰/۲۰$ و $۰/۲۳-۰/۱۵$ ارائه شده است.

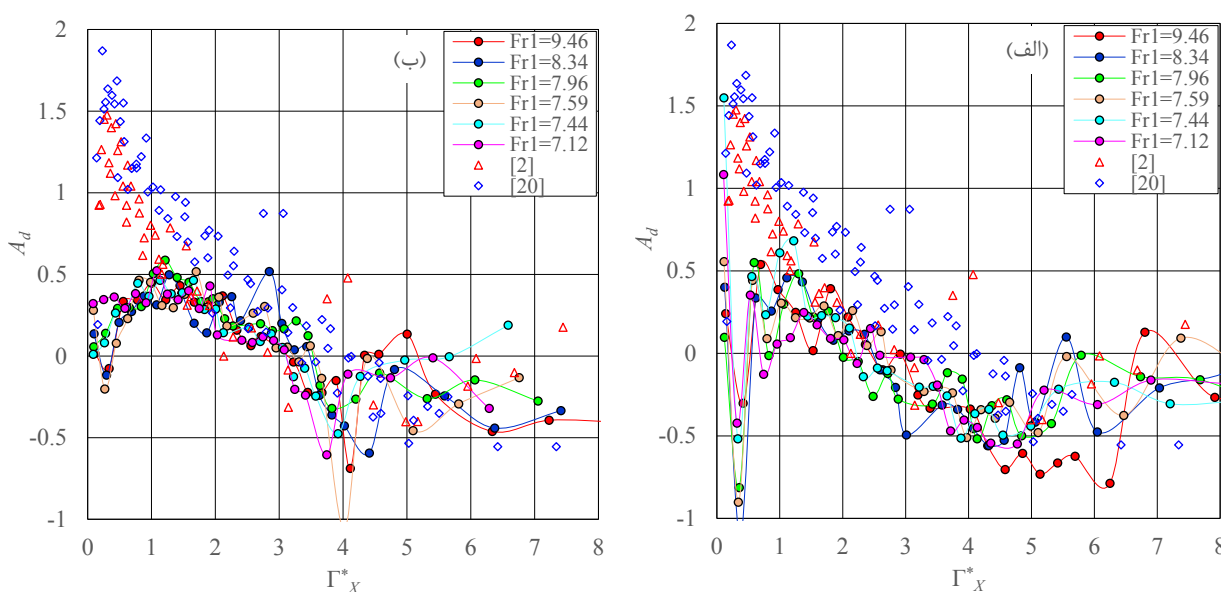
مقادیر فشارهای حداکثر و حداقل کف حوضچه در محدوده $\Gamma_X \geq 20$ رخ می‌دهند.

مطابق جدول ۴، متوسط کاهش ضرایب C_p^+ و $C_p^-|_{max}$ در پرش هیدرولیکی با درجه استغراق ۱/۴ در مقایسه با پرش آزاد،

جدول ۴. مقادیر حداکثر ضرایب C_p^+ ، $|C_p^-|$ و C_p در درجه‌های استغراق مختلف پرش هیدرولیکی برای حوضچه نوع دو USBR

Table 4. Maximum values of C_p^+ ، $|C_p^-|$ and C_p coefficients in different submergence degrees of hydraulic jumps for the USBR type II basin

S	$C_p^+_{max}$	$ C_p^- _{max}$	C_p_{max}
۱/۰۰	۰/۱۲-۰/۲۹	۰/۱۱-۰/۱۹	۰/۲۳-۰/۴۲
۱/۰۵	۰/۱۵-۰/۲۲	۰/۱۱-۰/۱۷	۰/۲۵-۰/۳۷
۱/۱۰	۰/۱۵-۰/۱۹	۰/۱۴-۰/۱۶	۰/۲۷-۰/۳۳
۱/۲۰	۰/۱۵-۰/۲۸	۰/۱۴-۰/۲۱	۰/۲۹-۰/۴۲
۱/۳۰	۰/۱۶-۰/۱۹	۰/۱۳-۰/۱۶	۰/۲۹-۰/۳۳
۱/۴۰	۰/۱۶-۰/۱۹	۰/۱۱-۰/۱۴	۰/۲۴-۰/۲۹



شکل ۱۲. توزیع ضریب A_d در اعداد فرود اولیه مختلف برای حوضچه‌های نوع یک و دو USBR؛ (الف) $S=1.00$ و (ب) $S=1.40$

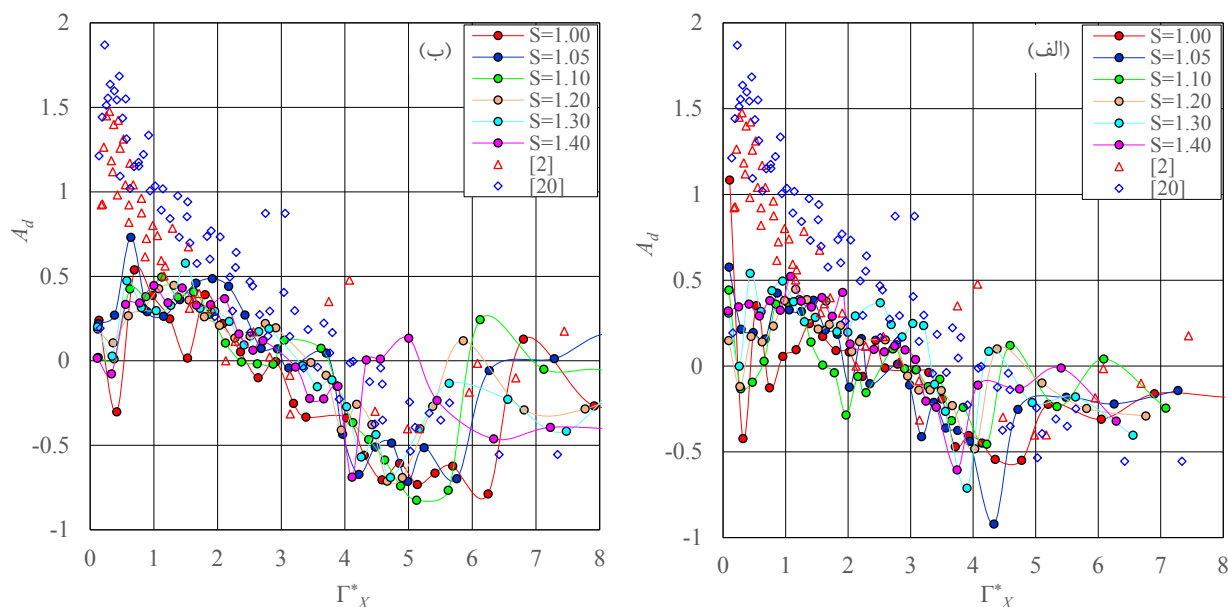
Fig. 12. Distribution of A_d parameter in different Froude numbers for the USBR type I and II basins; (a) $S=1.00$; (b) $S=1.40$

غلتاب ایجاد شده در این ناحیه است [۲۰]. از ابتدای حوضچه نوع دو تا $3\Gamma^*_X \approx$ ، ضریب A_d دارای مقادیر مثبت است. از این نقطه به بعد، ضریب A_d دارای مقادیر منفی است. مقادیر منفی ضریب A_d ، نواحی با جدانشدگی جریان از کف حوضچه را نشان می‌دهند [۲۶].

بسته به عدد فرود اولیه جریان، نقطه انتهای غلتاب در پرش هیدرولیکی که در آن، ضریب A_d به مقادیر حداقل می‌رسند در موقعیت Γ^*_X حدودی ۴ تا ۵ رخ می‌دهد. همچنین، نقطه انتهای تأثیر پرش هیدرولیکی که در آن، ضریب A_d دارای مقادیر صفر می‌گردند، در موقعیت Γ^*_X تقریباً ۶ بوده و پس از آن، تقریباً ثابت می‌ماند.

۳-۵- ضریب چولگی

مطابق شکل‌های ۱۲ و ۱۳، مقادیر ضریب A_d در ناحیه ابتدایی حوضچه نوع دو نسبت به حوضچه‌های نوع یک کاهش یافته است. متوسط کاهش مقادیر ضریب A_d در محدوده $\Gamma^*_X \geq 2$ نسبت به مراجع [۲۰ و ۲] به ترتیب در حدود ۵۵ و ۷۵ درصد است. در محدوده مذکور، متوسط مقادیر ضریب در حالت جریان آزاد به طور تقریبی برابر با ۰/۲۰ بوده و با افزایش درجه استغراق به مقدار تقریبی ۰/۳۰ می‌رسد. مقادیر زیاد ضریب A_d در ابتدای حوضچه‌های نوع یک، احتمالاً ناشی از نزدیکی به قسمت انحنا دار سرریز بوده که در اثر



شکل ۱۳. توزیع ضریب A_d در درجه‌های استغراق مختلف برای حوضچه‌های نوع یک و دو USBR: (الف) $Fr_1 = 7.12$; (ب) $Fr_1 = 9.46$

حالت پرش آزاد و مستغرق انجام گرفته و با نتایج سایر محققین در حوضچه‌های نوع یک مقایسه شده است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که:

- در پایین دست سرریزها، با افزایش دبی جریان، مقادیر عدد فرود اولیه (Fr_1) در ابتدای پرش آزاد، کاهش می‌یابد. با افزایش دبی جریان، نرخ رشد پارامتر Y_1 بیشتر از نرخ رشد پارامتر V_1 است. در پرش مستغرق، رابطه خطی مرتبه اول با $R^2 = 0.96$ برای پارامتر Y_3/Y_2 نسبت به Y_1/Y_2 قابل استخراج می‌باشد. راندمان استهلاک انرژی (ϵ) در اعداد فرود بزرگ‌تر، بیشتر می‌باشد. برای یک عدد فرود اولیه معین، با افزایش درجه استغراق، پارامتر ϵ به تدریج به صورت خطی کاهش می‌یابد.

- با تعبیه بلوک‌ها در ابتدای حوضچه نوع دو، مقادیر بی‌بعد ارتفاع نظیر فشار متوسط (Ψ_X^*)، تحت تأثیر جت جریان ورودی، افزایش می‌یابند. از ابتدای حوضچه تا موقعیت $\Gamma_X^* \approx 1$ ، مقادیر Ψ_X^* کاهش می‌یابند. از این نقطه به بعد، داده‌های Ψ_X^* افزایش می‌یابند. محدوده $\Gamma_X^* \approx 6$ موقعیت انتهای پرش را نشان می‌دهد. به خاطر کاهش مقادیر Y_2 ، مقادیر Ψ_X^* در حوضچه‌های نوع دو نسبت به حوضچه‌های نوع یک افزایش می‌یابد.

- با افزایش میزان تلاطم جریان، پارامتر انحراف معیار نوسانات

مطابق مرجع [۲۰]، نقاط مشخصه پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های نوع یک شامل نقطه جدانشدگی جریان (Γ_d^*)، نقطه انتهای غلتاب (Γ_r^*) و نقطه انتهای استهلاک انرژی یا پرش هیدرولیکی (Γ_p^*)، به ترتیب در موقعیت‌های ۴، ۶ و ۸/۵ مشخص شده‌اند. لازم به توضیح است که توزیع احتمال جریان‌هایی که توسط محققین مختلف بر روی حوضچه‌های نوع یک مورد مطالعه قرار گرفته است، ویژگی‌های توزیع نرمال را در پرش هیدرولیکی نشان نمی‌دهند. با این حال، با توجه به کاهش نوسانات فشار و در نتیجه کاهش مقادیر ضریب A_d در محدوده ابتدایی حوضچه‌های نوع دو در مقایسه با حوضچه‌های نوع یک، چنین به نظر می‌رسد که توزیع احتمالاتی نوسانات فشار در این نوع از حوضچه‌ها، تا حدودی شبیه توزیع نرمال است. در تطابق با مرجع [۲۷]، با افزایش درجه استغراق در داخل پرش هیدرولیکی، توزیع فشار به توزیع نرمال نزدیک می‌گردد. مطابق مرجع [۷]، ضریب چولگی در پرش آزاد، در هر دو حالت پایین دست دریاچه کشویی و سرریز، دارای مشخصات مشابهی می‌باشند.

۴- نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر به منظور بررسی آزمایشگاهی خصوصیات جریان و نوسانات فشار در کف حوضچه آرامش نوع دو USBR در دو

کمتری بوده، که یک مزیت در مقایسه با پرش آزاد محسوب می‌گردد. آزمایشات تکمیلی برای این نوع پرش هیدرولیکی پیشنهاد می‌گردد.

فهرست علائم

A_d	ضریب چولگی داده‌های فشار برداشت شده
C_p	ضریب کل نوسانات فشار
C_p^+	ضریب حداکثر نوسان فشارهای مثبت
C_p^-	ضریب حداکثر نوسان فشارهای منفی
E_1	انرژی جنبشی جریان در ابتدای پرش هیدرولیکی، cm
E_2	انرژی جنبشی جریان در انتهای پرش هیدرولیکی، cm
E_L	استهلاک انرژی در پرش هیدرولیکی، cm
Fr_1	عدد فرود جریان در مقطع اولیه پرش هیدرولیکی
g	شتاب ثقل زمین، m/s^2
H	بار آبی بالادست سرریز اوجی، cm
L_{bl}	طول حوضچه آرامش نوع دو USBR، cm
MAE	میانگین خطای مطلق
N_1	بار فشار استاتیکی در ابتدای پرش، cm
P_i	ارتفاع نظیر فشار لحظه‌ای در موقعیت طولی X ، cm
P_{max}	ارتفاع نظیر فشار حداکثر سری داده‌های اندازه‌گیری شده، cm
P_{min}	ارتفاع نظیر فشار حداقل سری داده‌های اندازه‌گیری شده، cm
P_X	ارتفاع نظیر فشار متوسط در موقعیت طولی X ، cm
Q	دبی جریان عبوری از روی سرریز، L/s
q	دبی جریان در واحد عرض فلوم، L/s/cm
R^2	ضریب تبیین
R	ضریب همبستگی
RMSE	خطای جذر میانگین مربعات
S	درجه استغراق پرش هیدرولیکی
V_1	سرعت جریان در ابتدای پرش هیدرولیکی، m/s
V_2	سرعت جریان در انتهای پرش هیدرولیکی، m/s
X	موقعیت طولی نقطه فشار از ابتدای حوضچه آرامش، cm
Y_1	عمق اولیه پرش آزاد، cm
Y_2	عمق ثانویه پرش آزاد، cm
Y_3	عمق اولیه جریان در پرش مستغرق، cm
Y_t	عمق ثانویه پرش مستغرق یا عمق پایاب، cm
Z	ارتفاع کل آب بالادست سرریز، cm
Γ_d^*	نقطه جداسازی جریان
Γ_r^*	نقطه انتهای غلتاب
Γ_j^*	نقطه انتهای استهلاک انرژی یا پرش هیدرولیکی
Γ_X^*	موقعیت بی‌بعد نقطه فشار
ε_t	راندمان استهلاک انرژی
θ	زاویه کف شوت سرریز نسبت به افق
σ_X	انحراف معیار نوسانات فشار، cm
Φ_X^*	پارامتر بی‌بعد انحراف معیار نوسانات فشار
Ψ_X^*	پارامتر بی‌بعد ارتفاع نظیر فشار متوسط

فشار (Φ_X^*) افزایش می‌یابد. وجود بلوک در کف حوضچه نوع دو باعث شده است که مقادیر Φ_{Xmax}^* در محدوده نسبتاً نزدیک‌تری نسبت به ابتدای حوضچه اتفاق بیفتد. میزان کاهش Φ_{Xmax}^* نسبت به حوضچه‌های نوع یک در پرش آزاد، به طور متوسط در حدود ۳۰ درصد است. متوسط کاهش مقادیر Φ_{Xmax}^* در پرش هیدرولیکی با درجه‌های استغراق ۱/۰۵ و ۱/۴ در مقایسه با پرش آزاد، به ترتیب در حدود ۱۳ و ۲۹ درصد هستند. با افزایش درجه استغراق، موقعیت وقوع Γ_{Xmax}^* به سمت ابتدای حوضچه، جابجا می‌گردد. تابع کسری چند جمله‌ای برای پیش‌بینی پارامتر Φ_X^* استخراج گردید.

- تغییرات ضریب C_p^+ به نحوی است که در ابتدای پرش دارای روند افزایشی بوده و پس از رسیدن به مقدار حداکثر، کاهش یافته و در انتها به مقدار تقریباً صفر می‌رسد. روند تغییرات ضریب C_p^- در ابتدا تقریباً به صورت کاهشی بوده و پس از رسیدن به مقدار حداقل، افزایش می‌یابد. مقادیر فشارهای حداکثر و حداقل کف حوضچه در محدوده $\Gamma_X^* \geq 20$ رخ می‌دهند. متوسط کاهش ضرایب C_{Pmax}^+ و C_{Pmin}^- در پرش هیدرولیکی با درجه استغراق ۱/۴ در مقایسه با پرش آزاد، به ترتیب برابر با ۱۵ و ۱۷ درصد هستند.

- مقادیر ضریب چولگی (A_d) در ابتدای حوضچه نوع دو نسبت به حوضچه نوع یک کاهش یافته است. این امر ناشی از نزدیکی به قسمت انحنادار سرریز بوده که در اثر غلتاب ایجاد شده در این ناحیه افزوده می‌شود. از ابتدای حوضچه تا موقعیت $\Gamma_X^* \approx 3$ (نقطه شروع جدایش جریان)، ضریب A_d دارای مقادیر مثبت است. سپس ضریب A_d دارای مقادیر منفی می‌شود. بسته به عدد فرود اولیه جریان، نقطه انتهای غلتاب با ضریب A_{dmin} در محدوده ۴-۵ $\Gamma_X^* \approx$ رخ می‌دهد. نقطه انتهای پرش هیدرولیکی ($A_d=0$)، در موقعیت $\Gamma_X^* \approx 6$ است. به نظر می‌رسد که توزیع احتمالاتی نوسانات فشار در این نوع از حوضچه‌ها، تا حدودی شبیه توزیع نرمال است.

- با افزایش درجه استغراق پرش هیدرولیکی، اختلاط جت کاهش می‌یابد. در نتیجه، استهلاک انرژی در مقایسه با پرش آزاد، کاهش می‌یابد. در پرش مستغرق، تمام تلاطم در داخل حوضچه واقع نمی‌شود. نوسانات فشار باقی‌مانده به پایین‌دست آستانه انتهایی منتقل می‌گردد. این موضوع می‌تواند به عنوان یک مشخصه نامطلوب تلقی شده و حوضچه آرامش طولانی‌تر مورد نیاز می‌باشد. با این حال، پرش مستغرق نسبت به نوسانات عمق پایاب، دارای حساسیت

- at sudden expansion of stilling basin, Amirkabir J. Civil Engineering., 81-79 (2017) (2)49.
- [11] S. Dey, A. Sarkar, Characteristics of turbulent flow in submerged jumps on rough beds, Journal of engineering mechanics, 59-49 (2008) (1)134.
- [12] A. Habibzadeh, M. Loewen, N. Rajaratnam, Performance of baffle blocks in submerged hydraulic jumps, Journal of Hydraulic Engineering, 908-902 (2012) (10)138.
- [13] A. Habibzadeh, M.R. Loewen, N. Rajaratnam, Mean flow in a submerged hydraulic jump with baffle blocks, Journal of Engineering Mechanics, 15-1 (2014) (5)140.
- [14] M. de Dios, F.A. Bombardelli, C.M. García, S.O. Liscia, R.A. Lopardo, J.A. Parravicini, Experimental characterization of three-dimensional flow vertical structures in submerged hydraulic jumps, Journal of hydro-environment research, 12-1 (2017) 15.
- [15] V. Jesudhas, R. Balachandar, V. Roussinova, R. Barron, Turbulence characteristics of classical hydraulic jump using DES, Journal of Hydraulic Engineering, (6)144 15-1 (2018).
- [16] N. Pourabdollah, M. Heidarpour, J. Abedi Koupai, Characteristics of free and submerged hydraulic jumps in different stilling basins, in: Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management, Thomas Telford Ltd, (2019), pp. 1-11.
- [17] F. Kazemi, S.R. Khodashenas, H. Sarkardeh, Experimental study of pressure fluctuation in stilling basins, International Journal of Civil Engineering, 21-13 (2016) (1)14.
- [18] R. Padulano, O. Fecarotta, G. Del Giudice, A. Carravetta, Hydraulic design of a USBR Type II stilling basin, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 9-1 (2017) (5)143.
- [19] A. Habibzadeh, S. Wu, F. Ade, N. Rajaratnam, M. Loewen, Exploratory study of submerged hydraulic jumps with blocks, Journal of Hydraulic Engineering, (2011) (6)137 710-706.
- [20] M.G. Marques, J. Drapeau, J.-L. Verrette, Pressure fluctuation coefficient in a hydraulic jump, Brazilian Journal of Water Resources (RBRH), 52-45 (1997) (2)2 (in Portuguese).
- [21] M. Marques, F. Almeida, L. Endres, Non-dimensioning
- [1] J.W. Toso, C.E. Bowers, Extreme pressures in hydraulic-jump stilling basins, Journal of Hydraulic Engineering, 843-829 (1988) (8)114.
- [2] E.D. Teixeira, E.F.T. Neto, L.A.M. Endres, M.G. Marques, Analysis of pressure fluctuations near the bed in hydraulic jump dissipation basins, in: In Proceedings of Brazilian Dam Committee, XXV Large Dams National Seminar, Salvador, Brazil, 15–12 October (2003), pp. 198-188 (in Portuguese).
- [3] V. Fiorotto, A. Rinaldo, Turbulent pressure fluctuations under hydraulic jumps, Journal of Hydraulic Research, 1992) (4)30a) 520-499.
- [4] V. Fiorotto, A. Rinaldo, Fluctuating uplift and lining design in spillway stilling basins, Journal of Hydraulic Engineering, 1992) (4)118b) 596-578.
- [5] A. Pinheiro, Hydrodynamic actions in thresholds for energy dissipation basin by hydraulic jumps, Submitted for the Doctor of Civil Engineering Degree, Technical University of Lisbon, Portugal (1995) (in Portuguese).
- [6] Z.-m. Yan, C.-t. Zhou, S.-q. Lu, Pressure fluctuations beneath spatial hydraulic jumps, Journal of Hydrodynamics, (6)18 726-723 (2006).
- [7] E.F.T. Neto, M.G. Marques, Analysis of the pressure field in a submerged hydraulic jump downstream of a sluice gate, Brazilian Journal of Water Resources (RBRH) (4)13 68-55 (2008) (in Portuguese).
- [8] A.A.M. Alves, Characterization of hydrodynamic forces in dissipation basins under hydraulic jumps with low Froude number, Institute for Hydraulic Research. Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre (2008) (in Portuguese).
- [9] C.K. Novakoski, E. Conterato, M. Marques, E.D. Teixeira, G.A. Lima, A. Mees, Macro-turbulent characteristics of pressures in hydraulic jump formed downstream of a stepped spillway, Brazilian Journal of Water Resources (RBRH) 8-1 (2017) (42)22.
- [10] M. Karimi, S.M. Jahromi, M. Shafai-Bajestan, Investigation of pressure fluctuations in hydraulic jump

- [25] A.J. Peterka, Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators, 8th ed., U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation: Denver, Colorado, USA, (1984).
- [26] R. Lopardo, R. Henning, Effects of the inflow conditions at the hydraulic jump on the bed instantaneous pressures, in: Latin American Hydraulic Congress, (1986), pp. -116 127 (in Spanish).
- [27] R. Lopardo, C. Fattor, M. Lopardo, J. Casado, Instantaneous pressure field on a submerged jump stilling basin, Hydraulics of dams and river structures. London: AA Balkema, (138-133)2004.
- of mean pressures in hydraulic jump dissipation basins, in: Xiii Brazilian Symposium on Water Resources, (1999) (in Portuguese).
- [22] W.H. Hager, B-jump in sloping channel, Journal of Hydraulic Research, 558-539 (1988) (5)26.
- [23] USBR, Spillways, in: Design of small dams, 3rd ed., US Department of the Interior, Bureau of Reclamation Washington, USA, (1987), pp. 437-339.
- [24] H. Chanson, R. Carvalho, Hydraulic jumps and stilling basins, in: Energy Dissipation in Hydraulic Structures; Chanson, H., Ed.; CRC Press: Leiden, The Netherlands, (2015), pp. 104-65.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Mousavi S. N., Farsadizadeh D., Salmasi F., Hosseinzadeh Dalir A., Flow Characteristics and Pressure Parameters of Free and Submerged Hydraulic Jumps in the USBR Stilling Basins, Amirkabir J. Civil Eng., 53(10) (2022) 4125-4142.

DOI: [10.22060/ceej.2020.17791.6676](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17791.6676)

