

The Effect of Energy Dissipation due to Outflow Water Jet from Floor and End of Stilling Basin on Hydraulic Jump Length

Airian Taghinia¹, Seyed Amin Asghari Pari^{2*}, Mahmood Shafai Bejestan³, Iman Ahmadianfar⁴


1- Graduated M.Sc., Water and Hydraulic Structures, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology.

2- Associate Professor, Civil Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology.

3- Professor, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz.

4- Assistant Professor, Civil Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology.

* asghari_amin@bkatu.ac.ir

Received: 23 February 2021, Accepted: 4 July 2021  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: The purpose of controlling hydraulic jump order to prevent damages caused by energy water in supercritical speeds of the research. To control the hydraulic jump and to prevent damage caused by water energy at supercritical speeds, at the end of structures such as spillways, special structures called energy dissipation are used which are built downstream. The effect of the floating sphere object's flexible bearing length on the characteristic of the hydraulic jump was studied by Varshosaz and Ahadian (2018) in the range of 1.5 to 8.3 Froude number. The characteristics of hydraulic jump was studied by Asadi et al (2017) in rough bed conditions with the use of a physical model. Results of them showed that the rough bed in comparison with the smooth bed, will decrease the jump relative depth in an average of 56.7 percent and the relative energy dissipation increases 69 percent and the shear modulus increases 2.6 percent. The goal of this study is reducing the hydraulic jump's length to prevent the damage caused by the energy of water and reducing the length of the stilling basin, in the supercritical flow that passing the spillways.

Methodology: The experiments had performed in a flume with a width of 0.3 m, a length of 10 m, its height that was 0.75 m at first 2.5 m of the flume and 0.45 m in its remaining flume length, and zero slopes in the hydraulic laboratory of Behbahan Khatam Alanbia University of Technology. In all experiments, hydraulic characteristics including jump length, rolling length, crossing discharge from the spillway, crossing discharge from the jet, second depth, tail water depth, water depth the back of the spillway, water height on the spillway, spillway water head recorded. The flow depth measured depth gauge with an accuracy of 0.1 mm at three fixed points and their average. For measuring these parameters needs to calculate the hydraulic jump length of all experiments, and equivalent to 90% of the place where the water surface was completely horizontal and the last air bubbles to came to the surface was considered as the end of the hydraulic jump (Toozandehjani and Kashefipour, 2013). And to determine the rolling length, a floating object was used that had a reciprocating effect due to the rotational area and the distance between this area from the hydraulic jump was measured as the rolling length (ShafaiBejestan and Chahardahcherik, 2016). In this research in order to determine the best model of energy dissipation and economization of the stilling basin with smaller dimensions for modeling the using several methods such as creating a slot in the spillway-body, on the floor of the stilling basin, and end of the stilling basin. In total 65

experiments with a Froude number of 4.56 to 10.18 were performed. In all experiments, the cross-section of the slot (jet) was constant and discharge was 16,12,8 L/s. For dimensional analysis, after identification of effective parameters on the hydraulic jump, dimensional numbers, have been extracted using the Buckingham π -theorem.

Results and Discussion: The results of these experiments, similar to previous studies, show that with increasing discharge spillway, the Froude number decreases, and the length of the jump and the length of the roll increase. The experiment of the second series (slot in the body of the spillway) by creating a slot with an angle of 45 degrees in the body of the spillway, we came to the conclusion that the slot in the body of the spillway was able to reduce the jump length between 14.28 to 4.76 percent in different flows. Third stage experiment (slot in the floor) by comparison of the results of the tests of the effect of the slot in the floor spillway with the control experiments showed that the use of the slot in the floor of the spillway at all distances reduced the hydraulic jump length compared to the control experiments at similar discharges. Also, the effect of using a slot in the floor on reducing the length of the hydraulic jump has increased as the slot approaches the spillway. The best way to reduce the jump length is related to the slot attached to the spillway, which has reduced the jump length by 59 to 67% for different discharges of the spillway compared to without a jet mode. Fourth Stage Experiment (the jet at the end) by the jet at the end of the stilling basin at all distances experiments showed that the jet at the jump was submerged because the momentum caused by the discharge passing through the flow over the spillway caused it to push water. The experiments showed all discharge inflow tested, the closer the jet is to the spillway, the best jump length. The best mode was to reduce the jump length of the jet attached to the spillway, which reduces the jump length by 80 to 88% in different discharges to the spillway compared to without a jet mode.

Conclusion: The jet at the end in the stilling basin had a jump length of maximum discharge 88% reduction, the slot jump length in the floor of the stilling basin 67.42% reduction and finally the slot jump length in the spillway body 14.28% reduction, which has the lowest reduction in jump length compared to other models of this research. In this study, the jet at the end of the stilling basin in different discharges reduces the level of the upstream water level, which in the maximum flow was able to reduce the upstream water level by 5.67%.

Keywords: Jump length, Energy dissipation, Stilling basin.



© 2021 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.
This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)
(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

تأثیر استهلاك انرژی ناشی از جت آب خروجی از کف و انتهای حوضچه آرامش بر طول پرش هیدرولیکی

آیرین تقی نیا^۱، سید امین اصغری پری^{۲*}، محمود شفاعی بجستان^۳، ایمان احمدیان فر^۴

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد آب و سازه های هیدرولیکی دانشگاه صنعتی خاتم الانبیا بهبهان.

۲- دانشیار گروه عمران، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیا بهبهان.

۳- استاد، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۴- استادیار گروه عمران، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیا بهبهان.

* asghari_amin@bkatu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۰۵، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۱۳، وبگاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: یکی از روش های معمول استهلاك انرژی در پایین دست سدها، بهره جستن از پدیده پرش هیدرولیکی است. در این مطالعه با هدف کاهش طول پرش هیدرولیکی با استفاده از جت آب، چند مدل شکاف در سرریز و حوضچه آرامش جهت خروج جت آب ایجاد شده است که شامل ایجاد شکاف در بدنه سرریز، شکاف در کف حوضچه آرامش و قرارگیری شکاف در انتهای حوضچه آرامش می باشد. این شکاف ها در پنج فاصله (چسبیده به سرریز)، ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد طول پرش هیدرولیکی حالت شاهد در نظر گرفته شده اند. آزمایش ها در دبی های ۱۶، ۱۲، ۸ لیتر بر ثانیه و با سطح مقطع ثابت جت صورت گرفته است. نتایج نشان داد که ایجاد جت در انتهای حوضچه آرامش در مقایسه با دیگر مدل ها، بیشترین تأثیر را در کاهش طول پرش هیدرولیکی داشته به طوری که در دبی ماکزیمم و حالت جت چسبیده به سرریز طول پرش را بین ۸۰ تا ۸۸ درصد نسبت به حالت بدون جت کاهش داده است. همچنین استفاده از جت باعث کاهش تراز سطح آب بالادست سرریز شده، به طوری که در دبی ماکزیمم تراز آب بالادست حدود ۵/۷ درصد کاهش یافته است.

کلید واژگان: طول پرش هیدرولیکی، استهلاك انرژی، حوضچه آرامش.

۱- مقدمه

از لحاظ اقتصادی مسئله ی مهمی است. فراسنجه هایی چون طول حوضچه، ضخامت دال کف، عمق پایاب مورد نیاز از جمله فراسنجه های مهمی هستند که بر اقتصادی کردن سازه حوضچه آرامش تأثیر فراوانی دارند (Beirami, 2000). تاکنون تحقیقات متفاوتی به منظور کاهش طول پرش هیدرولیکی صورت گرفته و روش های گوناگونی برای بهبود افزایش کارایی پرش از سوی محققان مختلف پیشنهاد شده است که می توان به شیب دار کردن کف (Shojaeian et al., 2011)، استفاده از بلوک های کف (Jam et al., 2015)، پله های مثبت یا منفی (Esmaili and Abrishami, 2002)، ناهمواری یا زبری با شکل مختلف (Najandali et al., 2012)، افزایش عرض مقطع (Hamidifar et al., 2011) و آستانه انتهایی (Minaei et al., 2016) اشاره کرد. در حوضچه های آرامش به منظور کاهش طول پرش از بلوک ها و ایجاد بازدارنده در برابر جریان استفاده

پرش هیدرولیکی از نوع جریان های متغیر سریع است که در آن جریان از حالت های فرا بحرانی به فرو بحرانی تغییر می یابد. با هدف کنترل پرش هیدرولیکی و به منظور جلوگیری از آسیب و زبان های ناشی از انرژی آب در سرعت های فرا بحرانی، در انتهای سازه هایی مانند سرریزها، از سازه های ویژه ای به نام تلف کننده انرژی که در پایین دست جریان ساخته می شوند استفاده می شود. حوضچه های آرامش در پایین دست سازه های کنترل احداث می شوند که دارای طول کوتاه و کف فرسایش ناپذیر می باشند. در نتیجه پدیده پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش، میزان زیادی انرژی جنبشی مستهلک و در نتیجه جریان خروجی از حوضچه آرامش به نسبت آرام است. در هنگام ساخت سدها هزینه و زمان زیادی صرف حوضچه های آرامش در انتهای سرریزها و سدهای انحرافی می شود، بنابراین کاهش طول پرش

سنگ‌چین پرداختند. نتایج نشان داد بستر سنگ‌چین باعث می‌شود که عمق پرش به میزان ۳۵ درصد، طول پرش به میزان ۵۰ درصد و طول غلتاب به میزان ۴۹ درصد نسبت به بستر صاف کاهش یابد. (Asadi et al., 2017) به بررسی ویژگی‌های پرش هیدرولیکی در شرایط بستر زبر با استفاده از مدل فیزیکی پرداختند. نتایج نشان داد که بستر زبر یا ناهموار نسبت به بستر صاف به طور میانگین عمق نسبی پرش را ۵۶/۷ درصد کاهش می‌دهد و استهلاک انرژی نسبی ۶۹ و نیروی برشی ۲/۶ درصد افزایش می‌یابد.

Najandali et al. (2012) تأثیر ناهمواری‌های یکپارچه مثلثی بر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی در بازه اعداد فرود ۴ تا ۱۳/۷ را بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که نسبت عمق‌های ثانویه پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر با افزایش عدد فرود اولیه به میزان بیشتری نسبت به بستر صاف کاهش می‌یابد. همچنین طول پرش هیدرولیکی روی این نوع از زبری‌ها حدود ۳۲ درصد نسبت به پرش کلاسیک کاهش می‌یابد. Boroujeni et al. (2013) فراسنجه‌های پرش هیدرولیکی برای شش بستر موج‌دار مثلثی در بازه اعداد فرود ۱۳/۱ تا ۶/۱ را بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که بستر موج‌دار در مقایسه با بستر صاف موجب کاهش ۲۵ درصدی عمق مزدوج و کاهش ۵۴/۷ درصدی طول پرش می‌شود و با افزایش عدد فرود ضریب تنش برشی روند شدیدتری خواهد داشت.

Jam et al. (2015) بررسی‌های خود را در حوضچه زبر شده به وسیله اجزای زبر (بلوک‌های دنداندار) با شکل هندسی و آرایش چیدمان جدید بررسی و تأثیر فراسنجه‌های پرش هیدرولیکی را روی حوضچه دنداندار بلوکی نسبت به بستر صاف نشان دادند، به طوری که طول پرش و عمق ثانویه به ترتیب ۵۰-۶۰ درصد و ۱۰-۱۲ درصد کاهش داشته است.

Salami Asl et al. (2018) به بررسی تأثیر شکل زبری مصنوعی کف بر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی پرداختند، در بررسی‌های آنان تأثیر اجزای زبر با شکل‌های مختلف مکعبی، مثلثی و ترکیبی از مکعبی و مثلثی بر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی نوع (A) شامل عمق مزدوج، طول پرش، افت انرژی و میزان ضریب نیروی برشی بررسی شده است. نتایج نشان داد که

می‌کنند. وجود بازدارنده در مقابل جریان باعث جداسازی خطوط جریان و استهلاک بیشتر انرژی و افزایش تنش برشی و نیز افزایش نیروی درگ می‌شود. عامل دیگری که می‌تواند باعث کاهش ابعاد پرش هیدرولیکی بدون ایجاد جدار خوردگی^۱ شود ناهمواری‌های کف است. در ادامه بخشی از تحقیقات صورت گرفته توسط محققان مختلف، بیان می‌شود.

Varshosaz and Ahadian (2018) به بررسی تأثیر بازدارنده‌های شناور متصل به کف با طول‌های مهاری مختلف بر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی در بازه اعداد فرود ۵/۱ تا ۸/۳ پرداختند. آنان به این نتیجه رسیدند که افت انرژی با استفاده از بازدارنده‌ها به طور میانگین حدود ۶۹ درصد بوده که نزدیک به ۱۰/۲ درصد نسبت به بستر صاف افزایش یافته است. طول پرش هیدرولیکی و عمق ثانویه نسبی به ترتیب به‌طور میانگین ۳۶ و ۱۹/۵ درصد نسبت به حوضچه کلاسیک کاهش می‌یابد. Dastourani et al. (2016) به بررسی تأثیر زاویه برخورد جت به پرش هیدرولیکی روی بستر زبر پرداختند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد، برای یک زاویه مشخص جت، در دبی‌های مختلف، پرش هیدرولیکی هیچگونه جابه‌جایی ندارد که این زاویه به عنوان زاویه بی‌اثر نامگذاری شد. با افزایش زاویه جت، پرش به سمت بالادست حرکت کرد و از یک زاویه به بعد پرش هیچگونه حرکتی به سمت بالادست نداشت که این زاویه نیز به عنوان بیشینه زاویه جابه‌جای پرش نامگذاری شد. تغییر زاویه و دبی جت موجب کاهش یا افزایش عمق ثانویه، طول پرش، افت انرژی نسبی و نیروی برشی بستر شد. بیشینه میزان کاهش طول پرش ۶۱/۳ درصد در استفاده از جت با بیشینه زاویه، دبی ۳/۲ لیتر بر ثانیه، کمترین عدد فرود جریان و حالت زبری سینوسی رخ داد.

Toozande jani and Kashefipour (2013) در آزمایشگاه تأثیر تخلیه تحتانی سد انحرافی روی ویژگی‌های پرش هیدرولیکی را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که تلاقی جت آب با زاویه ۴۵ درجه نسبت به افق، بیشترین تأثیر را در کاهش طول و عمق مزدوج پرش دارد و هنگامی که ۲۶ درصد دبی از شکاف عبور می‌کند، طول پرش نسبت به حالت کلاسیک در حدود ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. (Ghorbani et al., 2015)، به بررسی آزمایشگاهی پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با بستر

¹ Cavitation

جریان خروجی از شکافها با توجه به ارتفاع آب پشت سرریز همانند یک جت آب در تقابل با جریان عبوری از روی سرریز سد عمل می کنند.

۲-۱- تحلیل ابعادی

در این بخش فراسنجه های مؤثر و حاکم بر استفاده از جت مستغرق در پایین دست سرریز اوجی بررسی شده و با استفاده از آنالیز ابعادی و نظریه باکینگهام رابطه کلی استخراج شده است. فراسنجه های مؤثر در پرش هیدرولیکی مدل سرریز و جت به شرح زیر است:

$$f(y_1, y_2, v_1, \rho, \mu, g, B, B_j, B_h, Q_r, d, L_r, L_j, A, \Psi) = 0 \quad (1)$$

در عبارت بالا y_1 عمق اولیه پرش هیدرولیکی، y_2 عمق ثانویه پرش هیدرولیکی، V_1 سرعت اولیه، ρ چگالی آب، g شتاب ثقل، μ لزوجت پویایی، B عرض سرریز، B_j عرض شکاف، B_h ارتفاع جت آب، Q_r نسبت دبی جت به دبی عبوری از سرریز، d فاصله جت از سرریز، L_r طول غلتاب، L_j طول پرش، A سطح مقطع جت خروجی، Ψ نوع جت است. در همه ی آزمایشها به دلیل ثابت بودن فراسنجه های سطح مقطع خروجی جت (۳۰ سانتی متر مربع)، ارتفاع جت و عرض شکاف، فراسنجه های بدون بعد مربوطه از رابطه ها حذف شد. با توجه به ثابت بودن سطح مقطع جت و دبی خروجی از جت در فاصله های متفاوت تاحدودی ثابت بوده پس Q_r نیز حذف شده است. براساس روش π باکینگهام با در نظر گرفتن μ, v_1, y_1 به عنوان متغیرهای تکراری، خواهیم داشت:

$$f_1\left(\frac{y_2}{y_1}, \text{Re}, \frac{1}{Fr_1^2}, \frac{d}{y_1}, \frac{L_j}{y_1}, \Psi, \frac{L_r}{y_1}\right) = 0 \quad (2)$$

جریان از نوع آشفته بوده $26637 < \text{Re}_1 < 53298$ لذا نیروهای لزوجت نسبت به اینرسی کم بوده و تأثیری در حرکت جریان ندارد. در نتیجه:

$$\frac{L_r}{y_1}, \frac{L_j}{y_1}, \frac{y_2}{y_1} = f\left(Fr_1, \Psi, \frac{d}{y_1}\right) \quad (3)$$

۲-۲- روش انجام آزمایشها

آزمایشها در فلومی دارای عرض ۰/۳ متر، طول ۱۰ متر که ارتفاع آن در ۲/۵ متر ابتدایی فلوم ۰/۷۵ متر و در بقیه ی طول فلوم ۰/۴۵ متر و شیب صفر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان انجام گرفت. توسط یک پمپ آب از

ویژگی های پرش از جمله طول پرش و عمق مزدوج به دلیل وجود اجزای زیر کاهش می یابد. میزان کاهش این فراسنجه ها به طور متوسط به ترتیب ۳۶ و ۲۳ درصد است و بستگی به عدد فرود و شکل اجزای زیر دارد. بیشترین کاهش ویژگی های پرش مربوط به وجود اجزای زیر ترکیبی بوده است. تاکنون در مورد تأثیر جریان های تداخلی (جریان عبوری از روی سرریز و جریان خروجی از جت) بر ویژگی های پرش هیدرولیکی بررسی های زیادی صورت نگرفته است.

بنا بر نتایج تحقیقات صورت گرفته تاکنون روش های متفاوتی مانند استفاده از زبری در کف حوضچه آرامش، بستر زبر، بستر موج دار مثلثی، بستر سنگ چین، مهارهای انعطاف پذیر، بازدارنده های شناور کروی، زوایه برخورد جت فرضی و ... بررسی شده و هر کدام به گونه ای باعث کاهش طول پرش هیدرولیکی شده اند. در این تحقیق با دیدگاه استفاده از ایجاد جت آب ناشی از خروجی تخلیه کننده های زیرین سدها یا مجاری جدید زیرین ایجاد شده به این منظور و هدایت جریان خروجی از آنها به شکافها (مجاری) ایجاد شده در بدنه سرریز و یا حوضچه آرامش برای کاهش طول پرش هیدرولیکی پرداخته شده است.

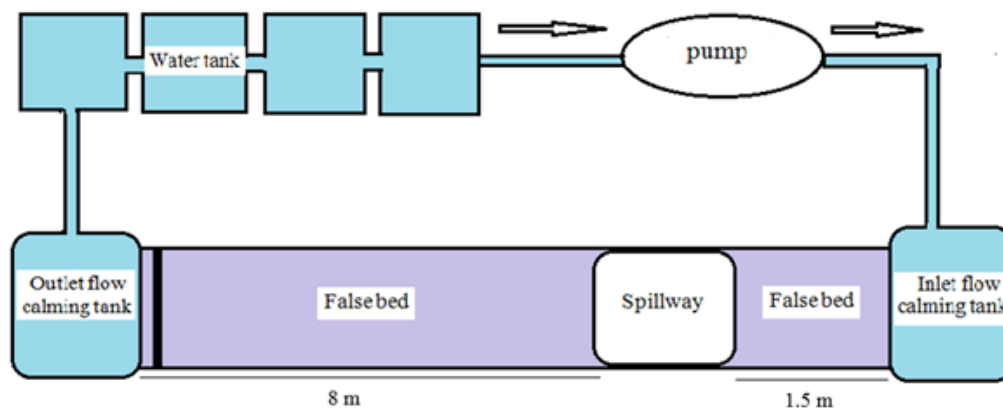
در این دیدگاه ضمن خروج بخشی از جریان سیلاب از مجاری زیرین سدها، جریان خروجی همانند یک جت آب در تقابل با جریان عبوری از روی سرریز می تواند باعث افزایش استهلاک انرژی و کاهش طول پرش هیدرولیکی شود. هدف از این تحقیق، بررسی تأثیر هیدرولیکی این دیدگاه بر طول پرش هیدرولیکی بوده و جزئیات اجرایی این ایده بسته به ساختگاه سرریز، موقعیت قرار گیری مجاری تخلیه کننده دیدگاه و حوضچه آرامش و شرایط فشار برکنش در زیر سرریز و حوضچه آرامش نیاز به بررسی بیشتر دارد.

۲- تحلیل ابعادی و روش انجام آزمایشها

این تحقیق آزمایشها در سه دبی ۸، ۱۲، ۱۶ لیتر بر ثانیه، با سه مدل قرار گیری شکاف و جت آب خروجی از آن انجام گردیده است که این سه مدل عبارت اند از: مدل اول شکاف در بدنه سرریز با زاویه ۴۵ درجه برابر با مدل توزنده جانی و کاشفی پور (شکل ۳-ا)، مدل دوم قرار گیری شکاف در کف حوضچه آرامش (شکل ۳-ب) و مدل سوم قرار گیری شکاف در انتهای حوضچه آرامش (شکل ۳-ج).

طول پرش هیدرولیکی در همه آزمایش‌ها مبنای یکسانی در نظر گرفته شد و آن معادل ۹۰ درصد محلی که سطح آب به کلی افقی شده و آخرین حباب‌های هوا به سطح آب می‌آیند به عنوان پایان پرش هیدرولیکی در نظر گرفته شد (Toozandehjania and Kashefipour, 2013) و برای تعیین طول غلتایی از یک جسم شناور استفاده شد که تحت تأثیر ناحیه چرخشی، رفت و برگشت داشت و فاصله این ناحیه از محل پرش هیدرولیکی به عنوان طول غلتایی اندازه‌گیری شد (ShafaiBejestan and Chahardahcherik, 2016). در این تحقیق به منظور تعیین بهترین مدل مستهلک کننده انرژی و کاهش طول حوضچه آرامش ۶۵ آزمایش هیدرولیکی در شرایط آب زلال، شیب صفر، دبی ۱۶، ۱۲، ۸ لیتر بر ثانیه، عمق جریان ۱۴/۵، ۱۳، ۱۰ سانتی‌متر و در بازه عدد فرود ۴/۵۶ تا ۱۰/۱۸ در ۴ سری انجام شد (جدول ۱، ۲ و ۳):

مخزن اصلی به کانال آبراهه انتقال داده می‌شد. در حوضچه ابتدایی فلوم به ابعاد قاعده $۱۷۰ \times ۵۰ \text{ cm}^2$ و ارتفاع ۱/۲ متر برای جلوگیری از ورود تلاطم ناشی از پمپاژ و به منظور یکنواخت کردن جریان درون مخزن یک‌لایه صفحه مشبک (توری) در ابتدای فلوم تعبیه شده است (شکل ۱). آزمایش‌ها با سه دبی ۸، ۱۲، ۱۶ لیتر بر ثانیه انجام شده است. برای تنظیم سطح آب پایین‌دست در انتهای فلوم یک دریچه نصب شده بود که میزان آب خروجی از فلوم توسط این دریچه کنترل شده و به این ترتیب باعث ثابت ماندن سطح پایاب می‌شد. در همه‌ی آزمایش‌ها مشخصات هیدرولیکی که شامل طول پرش، طول غلتاب، دبی عبوری از سرریز، دبی عبوری از جت، عمق ثانویه، عمق پایاب، عمق آب پشت سرریز، ارتفاع آب روی سرریز، هد آب روی سرریز ثبت شد. عمق جریان توسط عمق سنج با دقت ۰/۱ میلی‌متر در سه نقطه ثابت و با میانگین آن‌ها اندازه‌گیری شد. در ضمن برای اندازه‌گیری فراسنجه‌های لازم برای محاسبه



a



b

Fig. 1 (a) Schematic plan of laboratory flume (b) View of laboratory flume

شکل ۱ (a) طرح نقشه فلوم آزمایشگاهی و (b) نمایی از فلوم آزمایشگاه مورد استفاده

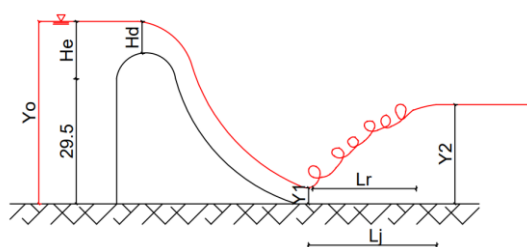


Fig. 3 characteristics hydraulic jump
شکل ۳ مشخصات پرش هیدرولیکی

سری سوم: با ایجاد شکاف در کف حوضچه آرامش، ۹ آزمایش در سه فاصله چسبیده به سرریز، ۲۰ و ۴۰ درصد طول پرش بیشینه در آزمایش شاهد انجام شد (جدول ۴، شکل ۴-ب).

سری چهارم: در این مرحله جتی به ارتفاع ۱ سانتی متر (از کف حوضچه آرامش) و سطح مقطع ۳۰ سانتی متر مربع در پنج فاصله ۸۰، ۶۰، ۴۰ و ۲۰ درصد طول پرش بیشینه و چسبیده به سرریز ایجاد شد که در جمع با این ویژگی‌ها ۴۵ آزمایش با دبی‌های ۱۲، ۱۶، ۸ لیتر بر ثانیه انجام شد، جت توسط یک شیار که در قسمت زیرین سرریز ایجاد شده و در زیر و امتداد طولی حوضچه آرامش قرار دارد تغذیه شده و موقعیت جت نسبت به سرریز جابه‌جا شده است (جدول ۴، شکل ۴-ج).

در ادامه تحقیق از نشانه اختصاری Sb برای شکاف در بدنه سرریز، Sf شکاف در کف حوضچه آرامش و از Se برای شکاف در انتهای حوضچه آرامش استفاده شده است.

۳ - نتایج و بحث

۳-۱- نتایج به دست آمده از سری اول (آزمایش شاهد)

از نتایج به دست آمده از آزمایش‌های سرریز بدون جت برای تعیین دبی عبوری از جت و مقایسه طول پرش با دیگر مدل‌ها استفاده شده است. نتایج این آزمایش‌ها همانند تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که با افزایش دبی عبوری از سرریز عدد فرود کاهش و طول پرش و طول غلتاب افزایش می‌یابد. برای بررسی تأثیر روش‌های مختلف ایجاد جت بر کاهش طول پرش هیدرولیکی و مقایسه با آزمایش‌های شاهد درصد کاهش طول پرش هیدرولیکی از رابطه زیر محاسبه شد:

$$\frac{L_j - L_{j-k}}{L_j} \times 100 \quad (4)$$

سری اول: آزمایش شاهد، برای تعیین منحنی دبی-اشل بر روی سرریز، از یک سرریز اوجی به ارتفاع ۰/۲۹۵ متر و طول تاج ۰/۳ متر استفاده شد که سرریز در فاصله ۱/۵ متری از ابتدای فوم و بر روی کف کاذبی که از جنس گالوانیزه به ارتفاع ۰/۱۵ متر (از کف فوم) نصب شده قرار گرفته شد. آزمایش‌ها در هشت دبی (۵، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶، ۱۷، ۱۸) لیتر بر ثانیه انجام و با اندازه‌گیری ارتفاع آب بر روی سرریز با استفاده از عمق سنج منحنی دبی-اشل استخراج شد. با استفاده از این منحنی برای آزمایش‌های سری دوم تا چهارم از روی ارتفاع آب روی سرریز دبی عبوری از روی سرریز و همچنین دبی عبوری از جت تعیین شد (شکل ۲).

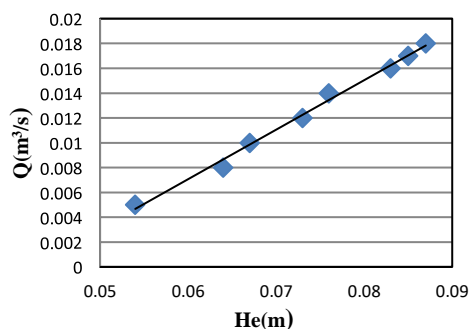


Fig. 2 Rating curve of Ogee spillway, witness test
شکل ۲ منحنی دبی-اشل سرریز اوجی، آزمایش شاهد

جدول ۱ ویژگی‌های هیدرولیکی شکاف در بدنه سرریز با زاویه ۴۵ درجه

Table 2 The hydraulic characteristics of the slot in the body of the spillway with an angle of 45 degree

L_j (cm)	L_r (cm)	θ (degree)	Fr	Q_j (lit/s)	Q (lit/s)	Q_t (lit/s)
75	45	45	4.28	6	10	16
60	35	45	4.51	4	8	12
50	25	45	4.62	3	5	8

در ادامه همه آزمایش‌ها در سه دبی (۸، ۱۲، ۱۶) لیتر بر ثانیه انجام شده و بر روی همه مدل‌ها ویژگی‌های پرش شامل طول پرش، طول غلتاب، عمق ثانویه پرش، عمق پایاب و همچنین عمق پشت سرریز ثبت شد (شکل ۳).

سری دوم: ۳ آزمایش با ایجاد شکاف در بدنه سرریز مطابق با مدل توننده جانی و کاشفی پور، با سه دبی ۸، ۱۲، ۱۶ لیتر بر ثانیه با زاویه ۴۵ درجه در بدنه سرریز با ابعاد شکاف (۳۰ سانتی‌متر مربع) انجام شد (جدول ۲، شکل ۴-ا).

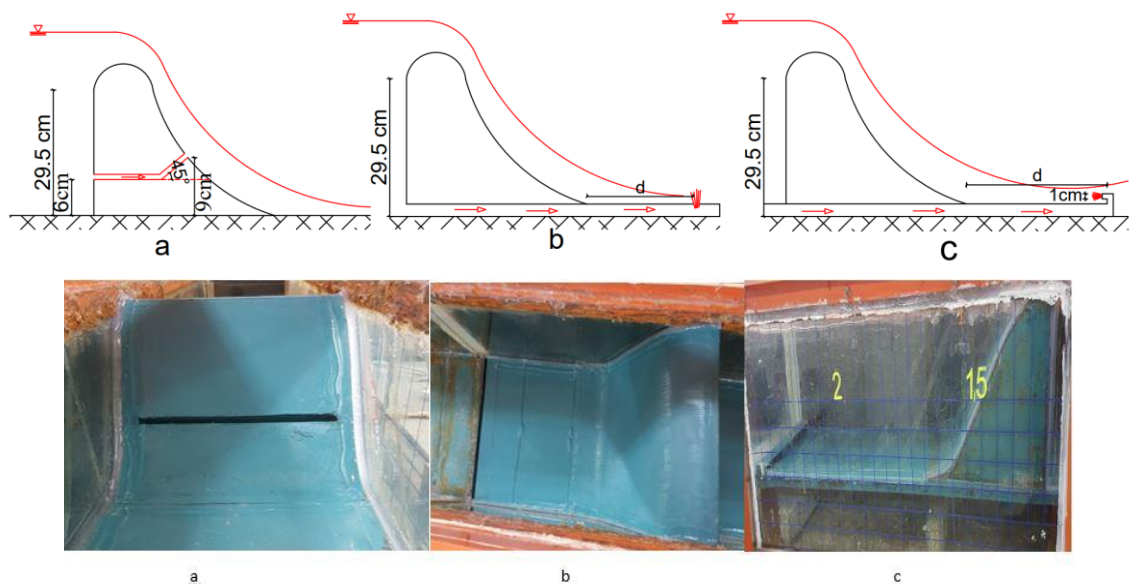


Fig. 4 Experimental model: (a) slot in the body spillway, (b) slot in the floor, (c) Slot at the end of stilling basin
شکل ۴ مدل‌های آزمایشگاهی: (a) شکاف در بدنه سرریز، (b) شکاف در کف، (c) شکاف در انتهای حوضچه آرامش

در رابطه بالا L_j طول پرش در آزمایش‌ها شاهد (سرریز بدون جت) و L_{j-k} طول پرش در آزمایش‌ها سرریز همراه با جت است.

۳-۲- نتایج به دست آمده از سری دوم (شکاف در بدنه سرریز)

نتایج به دست آمده از ثبت ویژگی‌های هیدرولیکی جدول ۲ نشان می‌دهد که شکاف در بدنه سرریز توانسته طول پرش را بین ۱۴/۲۸ تا ۴/۷۶ درصد در دبی‌های مختلف کاهش می‌دهد (شکل ۵).

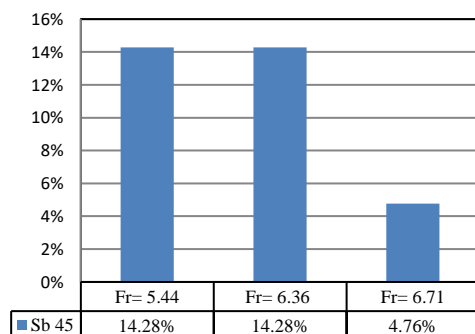


Fig. 5 The percentage in the reduction of the slot jump length in the spillway body at different Froude numbers
شکل ۵ تغییرپذیری‌های درصد کاهش طول پرش شکاف در

بدنه سرریز در اعداد فرود متفاوت

جدول ۳ مشخصات هیدرولیکی شکاف در کف

Table 3 The hydraulic characteristics of the slot in the floor

L_j (cm)	L_r (cm)	d (cm)	Fr	Q_j (lit/s)	Q (lit/s)	Q_t (lit/s)
57.5	45	35	4.28	6	10	16
45	32.5	17.5	4.28	6	10	16
28.5	18.5	0	4.28	6	10	16
57.5	47.5	35	4.51	4	8	12
45	32.5	17.5	4.51	4	8	12
28.5	18.5	0	4.51	4	8	12
50	45	35	4.62	3	5	8
35	30	17.5	4.62	3	5	8
20	15	0	4.62	3	5	8

جدول ۴ مشخصات هیدرولیکی جت انتهای حوضچه آرامش

Table 4 Hydraulic characteristics of the jet at the end of the stilling basin

L_{jp} (cm)	L_j (cm)	L_r (cm)	d (cm)	Fr	Q_j (l/s)	Q (l/s)	Q_t (l/s)
12.5	32.5	26	17.5	4.28	6	10	16
35	50	40	35	4.28	6	10	16
42.5	55	45	52.5	4.28	6	10	16
52.5	67.5	60	70	4.28	6	10	16
10	25	17.5	0	4.28	6	10	16
17.5	30	26	17.5	4.51	4	8	12
30	40	35	35	4.51	4	8	12
35	50	40	52.5	4.51	4	8	12
47.5	62.5	60	70	4.51	4	8	12
10	22.5	17.5	0	4.51	4	8	12
7.5	20	15	17.5	4.62	3	5	8
25	37.5	35.1	35	4.62	3	5	8
37.5	50	50	52.5	4.62	3	5	8
57	50	50	70	4.62	3	5	8
10	20	15	0	4.62	3	5	8

۳-۵- تغییرپذیری های تراز آب بالادست

استفاده از مجرای زیرین به منظور کاهش طول پرش هیدرولیکی، می تواند باعث کاهش تراز آب بالادست سرریز برای دبی های یکسان شود. در سدهای انحرافی با افزایش دبی، تراز سطح آب بالادست سرریز افزایش یافته و در نتیجه در مواقع سیلابی ممکن است باعث به زیر آب رفتن اراضی بالادست شود. با استفاده از جت مستغرق می توان بدون کاهش ارتفاع سد دبی بیشتری را از سرریز عبور داد. همچنین طول پرش را نیز کاهش می دهد. در این بخش به منظور بررسی تأثیر جت مستغرق بر روی میزان کاهش تراز سطح آب بالادست پرداخته و با آزمایش شاهد (سرریز بدون جت) مقایسه شد. نتایج نشان می دهد که استفاده از جت مستغرق باعث کاهش تراز سطح آب بالادست سرریز می شود (شکل ۸).

۳-۶- تغییرات نسبت های $\frac{L_j}{y_1}$, $\frac{L_r}{y_1}$, $\frac{y_2}{y_1}$ بر فرود اولیه

تغییرپذیری های فراسنجه های عمق ثانویه (نسبت عمق های مزدوج)، طول پرش هیدرولیکی و طول غلتاب نسبت به عمق اولیه که در آزمایش شاهد بود نسبت به فرود اولیه برای سه حالت شکاف در کف، شکاف در بدنه سرریز، جت انتهایی حوضچه آرامش و آزمایش شاهد نمودار ترسیم شده است. برابر نمودار، نسبت این سه فراسنجه تابعی از فرود اولیه جریان بوده و به صورت کلی با افزایش عدد فرود جریان افزایش می یابد (شکل ۹، ۱۰ و ۱۱).

نتایج آزمایش های ۳ مدل این تحقیق نشان می دهد که به ترتیب به کارگیری شکاف در انتهای حوضچه آرامش، شکاف در کف و شکاف در بدنه سرریز با زاویه ۴۵ درجه عملکرد بهتری بر کاهش طول پرش هیدرولیکی نسبت به حالت شاهد داشته است. همانطور که در جدول ۵ ملاحظه می شود، بیشترین میزان کاهش طول پرش مربوط به این تحقیق حاضر یعنی ۸۸ درصد است. عدد فرود آزمایش های این تحقیق نزدیک به محدوده تحقیق (Ghorbani et al. (2015) بوده است اما درصد کاهش طول پرش هیدرولیکی در حالت شکاف در کف و شکاف در انتهای حوضچه آرامش در این تحقیق از آنان و دیگر محققان بیشتر بوده است.

۳-۳- نتایج به دست آمده از سری سوم (شکاف در کف)

مقایسه نتایج آزمایش های تأثیر شکاف در کف حوضچه آرامش با آزمایش های شاهد نشان داد که استفاده از شکاف در کف حوضچه آرامش در همه فاصله ها باعث کاهش طول پرش هیدرولیکی در مقایسه با آزمایش های شاهد در دبی های همانند شده است و همچنین تأثیر استفاده از شکاف در کف بر کاهش طول پرش هیدرولیکی با نزدیک شدن شکاف به سرریز افزایش یافته است. به طوری که بهترین حالت کاهش طول پرش مربوط به شکاف چسبیده به سرریز بوده که بین ۵۹ تا ۶۷ درصد برای دبی های مختلف طول پرش را نسبت به حالت سرریز بدون جت کاهش داده است (شکل ۶).

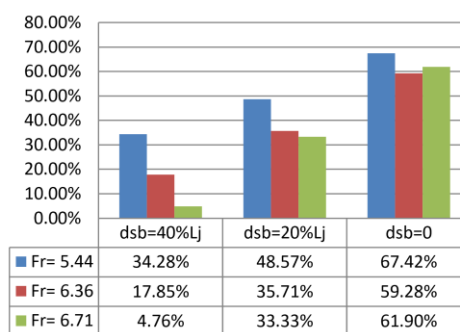


Fig.6 The percentage changes reduce the length of the slot jump in the floor stiling basin at different distance

شکل ۶ تغییرپذیری های درصد کاهش طول پرش شکاف در کف حوضچه آرامش در فاصله های متفاوت

۳-۴- نتایج به دست آمده از سری چهارم (جت انتهایی حوضچه آرامش)

با انجام آزمایش های جت انتهایی حوضچه آرامش مشخص شد که در همه ی فاصله های قرارگیری جت، پرش به صورت مستغرق انجام می شود به این دلیل که اندازه حرکت ناشی از دبی عبوری از جت در خلاف دبی عبوری از روی سرریز، باعث هل دادن آب به سمت سرریز شده و حالت پرش مستغرق ایجاد و انرژی پرش مستهلک شده است. آزمایش ها نشان داد در همه ی دبی های مورد آزمایش هر چه جت به سرریز نزدیک تر می شود طول پرش بیشتر کاهش می یابد. بهترین حالت کاهش طول پرش جت چسبیده به سرریز بود که بین ۸۰ تا ۸۸ درصد در دبی های مختلف طول پرش را نسبت به حالت سرریز بدون جت کاهش می دهد (شکل ۷).

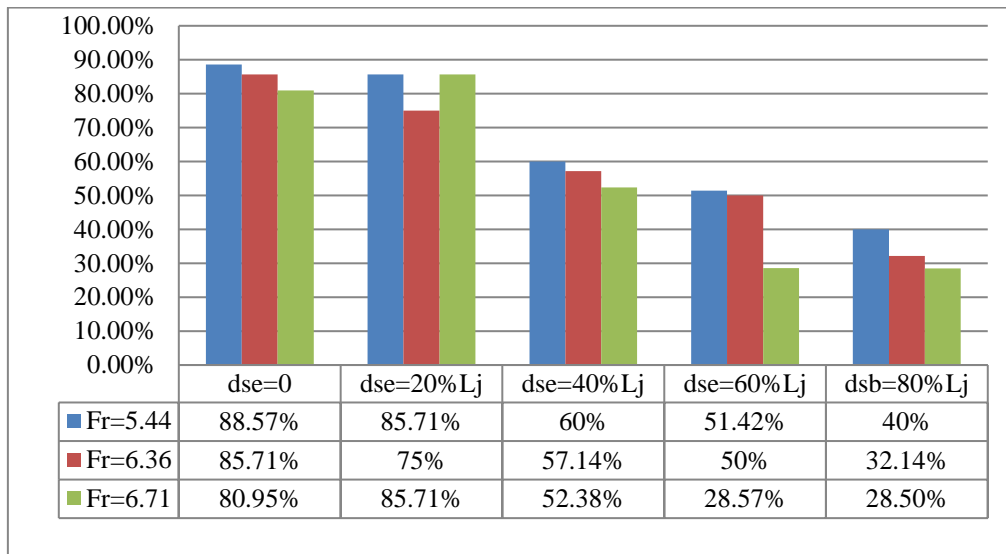


Fig. 7 Changes in the percentage reduction of the jump length against the total discharge in the spillway with the jet at the end of the stilling basin at different distances

شکل ۷ تغییرپذیری‌های درصد کاهش طول پرش در برابر دبی کل در سرریز با جت انتهای حوضچه آرامش در فاصله‌های متفاوت

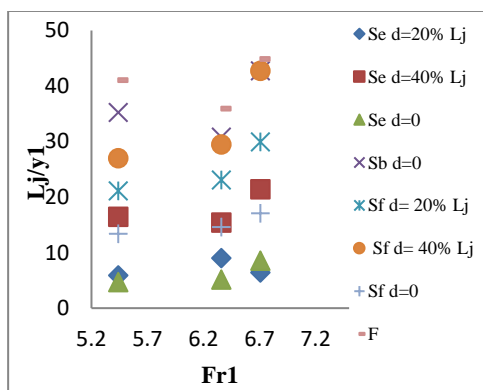


Fig. 9 Changes length of hydraulic jump versus Froude number

شکل ۹ تغییرپذیری‌های طول پرش هیدرولیکی به ازای عدد فرود اولیه

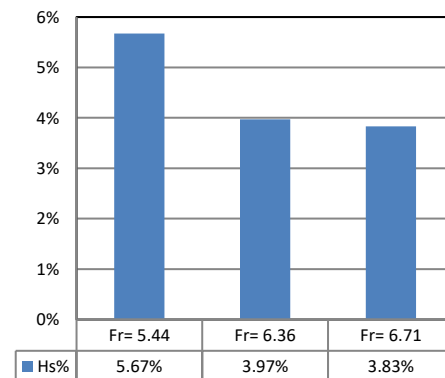


Fig. 8 Percentage reduction of water level against total discharge in spillway with the jet end of the stilling basin at different Froude numbers

شکل ۸ درصد کاهش تراز سطح آب در برابر فرود در سرریز با جت انتهای حوضچه آرامش در اعداد فرود مختلف

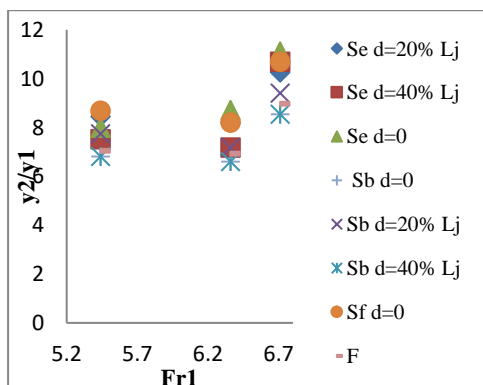


Fig. 11 Variation of sequent depth ratio Froude number
شکل ۱۱ تغییرپذیری‌های نسبت اعماق مزدوج به ازای عدد فرود اولیه

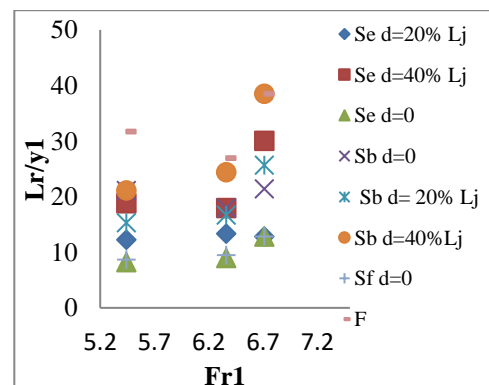


Fig. 10 Changes length of rollers versus Froude number
شکل ۱۰ تغییرپذیری‌های طول غلتاب به ازای عدد فرود اولیه

جدول ۵ مقایسه روش‌های مختلف استفاده‌شده در این تحقیق و نتایج سایر محققین

Table 5 Comparison of different methods used in this research and the results of the other research

Author	Range of Froude number	Maximum Reduction of hydraulic jump length	Method used
Varshosaz and Ahadian (2018)	5.1 - 8.3	19.5%	Effect of the floating sphere objects flexible bearing length on the characteristic of the hydraulic jump
Asadi et al. (2017)	3.5 - 4	56.7%	Investigation the characteristics of hydraulic jump in a rough bed condition using a physical model
Dastourami et al. (2016)	6.4-9.58	64%	The impact of water rectangular jet angel on the characteristics of hydraulic jump
Ghorbani et al. (2015)	4 - 6.5	50%	Laboratory assessment of hydraulic jump properties in a rippapped in stilling basin
Jam et al. (2015)	11-14	50-60%	Evaluation of hydraulic jump on dentate blocks stilling basin
Toozandehjani and Kashefpour (2013)	1.5 - 4.5	50%	Laboratory investigation of the effect of diversion dam underflow on the hydraulic Jump characteristics
Najandali et al. (2012)	4 - 13.7	32%	The effect of triangular blocks on the characteristics of Hydraulic Jump
present research	5.44-6.71	88.57%	The effect of the jet at the end the stilling basin on hydraulic jump characteristics
present research	5.44-6.71	67.42%	The effect of the slot floor on hydraulic jump characteristics
present research	5.44-6.71	14.28%	Effect of slot in spillway body with a 45-degree angle on hydraulic jump characteristics

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر ۳ مدل شکاف (جت آب خروجی از آن) ایجاد شده در بدنه سرریز، کف حوضچه آرامش و انتهای حوضچه آرامش و در پنج فاصله متفاوت از پنجه سرریز (ابتدای حوضچه آرامش) بر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی بررسی شد. نتایج نشان داد که استفاده از شکاف در انتها و کف حوضچه آرامش نسبت به دیگر روش‌های کاهش طول پرش از جمله ایجاد شکاف در بدنه سرریز، ایجاد بازدارنده‌ها و بلوک‌ها در داخل حوضچه آرامش، طول پرش را به میزان بیشتری کاهش می‌دهند. به‌طور خلاصه نتایج نشان می‌دهد که:

۱- استفاده از شکاف در انتهای حوضچه آرامش در فاصله‌ها و دبی‌های مختلف عملکرد بهتری در مقایسه با دیگر مدل‌های آزمایش مورد بررسی در این تحقیق در کاهش طول پرش داشته است و هر چه موقعیت شکاف انتهایی و شکاف در کف حوضچه آرامش به پنجه سرریز نزدیک تر بوده است طول پرش را به میزان بیشتری کاهش داده است.

۲- شکاف انتهای حوضچه آرامش، شکاف در کف و شکاف در بدنه به ترتیب توانسته طول پرش هیدرولیکی را نسبت به سرریز بدون جت ۸۸/۵۷، ۶۷/۴۲ و ۱۴/۲۸ درصد کاهش دهد.

۳- ایجاد سه حالت جت (شکاف در کف، شکاف در بدنه سرریز، شکاف در انتهای حوضچه آرامش) برای یک دبی کل ثابت، تأثیری قابل ملاحظه‌ای بر دبی عبوری از روی سرریز، عدد فرود، دبی عبوری از جت، عمق پایاب، عمق آب پشت سرریز، ارتفاع آب روی سرریز نداشته است.

۴- در این بررسی و ارزیابی جت انتهای حوضچه آرامش، در دبی‌های مختلف باعث کاهش تراز سطح آب بالادست سرریز می‌شود و در دبی بیشینه توانسته تراز آب بالادست را ۵/۶۷ درصد کاهش دهد.

۵- فهرست نشانه‌ها

y_1	عمق اولیه پرش (cm)
y_2	عمق ثانویه پرش (cm)
μ	لزوجت پویایی ($\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
V_1	سرعت اولیه (ms^{-1})
L_j	طول پرش (cm)
L_r	طول غلتاب (cm)
Q_t	دبی کل (lit/s)

in a riprapped in stilling basin. *J. Hydraulics*, 10(2), 73 - 82. (In Persian)

Hamidifar, H., Omid, M.H. and Farhoudi, J. (2011). Hydraulic jump in triangular section and comparison with rectangular section. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, Isfahan University of Technology, 14(54), 27-36. (In Persian)

Jam, M., Mardasht, A. and Talebbeydokhti, N. (2015). Evaluation of hydraulic jump on dentate blocks stilling basin. *J. Hydraulics*, 9(1), 1-10.

Minaei, G.A., Ghodsian, M. and Mehraein, M. (2016). Experimental investigation of hydraulic jump in stilling basin with stepped sill. *Modares Civil Engineering journal*, 16(1), 145-155. (In Persian)

Najandali, A., Esmaili, K. and Farhoudi, J. (2012). The effect of triangular blocks on the characteristics of Hydraulic Jump. *J. Water & Soil*, 26(2), 282 - 289. (In Persian)

Shafai Bejestan, M. and Chahardahcherik, P. (2016). Scour dimension of the downstream hydraulic jump stilling basin with bed covered with six legs elements. *J. Irrigation & Drainage structures Engineering Research*, 17(66), 105-118. (In Persian)

Samadi-Boroujeni, H., Ghazali, M., Gorbani, B. and Nafchi, R.F. (2013). Effect of triangular corrugated beds on the hydraulic jump characteristics. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 40(9), 841-847. (In Persian)

Shojaeian, Z., Hosseinzade Dalir, A., Farshadzadeh, D. and Salmasi, F. (2011). Investigation of hydraulic jump characteristics in divergent rectangular sections on inverse slope. *Water and Soil Knowledge*, 21(3), 49-60. (In Persian)

Toozandehjani, M. and Kashefipour, M. (2013). Laboratory investigation of the effect of diversion dam underflow on the hydraulic Jump characteristics. *JWSS-Isfahan University of Technology*, 16(62), 205-216. (In Persian)

Varshosaz, A. and Ahadian, J. (2018). Effect of the floating sphere objects flexible bearing length on the characteristic of the hydraulic jump. *J. Water & Soil Cons.*, 25(1), 297-308. (In Persian)

Q	دبی عبوری از روی سرریز (lit/s)
Q _i	دبی عبوری از جت (lit/s)
Se	شکاف در انتهای حوضچه آرامش
S _{b45°}	شکاف در بدنه سرریز با زاویه ۴۵ درجه
d _{sf}	فاصله شکاف در کف از پنجه سرریز
F	آزمایش شاهد
S _b	شکاف در بدنه (Slot in body)
S _f	شکاف در کف (Slot in floor)
d _{se}	فاصله شکاف انتهای حوضچه از سرریز
H _{s%}	درصد کاهش آب بالادست سرریز
g	شتاب ثقل (ms ⁻²)
B	عرض سرریز (cm)
B _j	عرض شکاف (cm)
Q _r	نسبت دبی جت به دبی کل (lit/s)
A	سطح مقطع جت خروجی (m ²)
Fr	عدد فرود

۶- منابع‌ها

Asadi, F., Fazloulou, R. and Emadi, A. (2017). Investigation the characteristics of hydraulic jump in a rough bed condition using a physical model. *Gorgan, J. Water & Soil Cons.* 23(5), 295-306. (In Persian).

Beirami, M.K. (2000). *Water Convenyance Struvture*. Isfahan University of technology publication Center. (In Persian)

Dastourani, M., Esmaili, K. and Khodashenas, S.R. (2016). The impact of water rectangular jet angel on the characteristics of hydraulic jump. *J. Water & Soil Cons.*, 23(3), 225-238. (In Persian)

Esmaili, K. and Abrishami, J. (2002). Determining the relationship between depths before and after the jump and the height of the stairs in order to control the hydraulic jump on the reverse slopes and with the stairs (positive and negative). *International Journal of Industrial Engineering & Production Research*, 13(2), 105-116. (In Persian)

Salami Asl, S., Fathi, A. and Ghomeshi, M., (2018). Effect of the Artificial Bed Roughness's Shape on Hydraulic Jump's Characteristics. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering*, 41(2), 19-31. (In Persian)

Ghorbani, B., Samadi, B.H. and Rahmati, E., (2015). Laboratory assessment of hydraulic jump properties