

EXTENDED ABSTRACT

Experimental investigation of hydraulic jump in Hexagonal Stilling Basin

M. H. Jafari Abnavi¹, R. Mohammadpour^{2*} and M. Karim Beirami³

1-PhD Student of Water and Hydraulic Structure, Islamic Azad University, Estahban branch.

2- Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Estahban branch.
(Re.Mo564@iau.ac.ir)*

3-Associate Professor, Isfahan University of Technology.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 18 May 2022

Revised: 16 November 2022

Accepted: 21 November 2022

Keywords:

Flow Velocity, Jump length,
Alternative depth, Energy loss.

TO CITE THIS ARTICLE:

Jafari Abnavi, M. H., Mohammadpour, R., Beirami, M. K. (2023). 'Experimental investigation of hydraulic jump in Hexagonal Stilling Basin', *Irrigation Sciences and Engineering*, 46(3), pp. 85-102. doi: 10.22055/jise.2022.39990.2028.

Introduction

Hydraulic jump is used as an important energy dissipator phenomenon downstream of hydraulic structures such as spillways, gates, and chutes. The US Bureau of Reclamation (USBR) surveyed the state of knowledge in this field and presented practical guidelines for the design of different types of stilling basins (Peterka 1958). However, it is always preferable to achieve maximum energy loss with a minimum length and cost in the stilling basin. Experimental studies on the effect of gradually diverging stilling basin walls on the hydraulic jump parameters have shown that diverging walls cause a reduction of the sequent depth by up to 30%, a reduction of the length of the hydraulic jump by up to 22%, and an increase in the energy loss compared with the classic hydraulic jump (Kouluseus and Ahmad 1969; Khalifa and McCorquodale 1979; Omid et al. 2007). Hassanpour et al. (2017) studied the characteristics of the hydraulic jump in a gradually expanding rectangular stilling basin. They showed that the sequent depth ratio and relative length of the jump decrease with decreasing divergence ratio. Arabhaabhirama and Abela (1971) studied radial hydraulic jumps in a gradually expanding rectangular channel with divergence angles from 0 to 13°. The results showed that the divergence of the walls causes reductions in the sequent depth and length of the jump and an increase in energy loss as compared to the hydraulic jump in a straight rectangular channel.

Since the hydraulic jump changes the flow from the supercritical to the subcritical, on the other hand, the flow depth is decreased in the expanding and diverging stilling basins in the supercritical and subcritical conditions, respectively. The innovation of this research is the use of divergent-convergent stilling basins to increase the performance of the stilling basins. The results of the divergent-convergent stilling basin were compared with the classic and divergent basins as well as previous research.

Methodology

All experiments were performed in a channel with a length of 11.0 m, depth of 0.7 m, and width of 0.48 m. In this study, to investigate the performance of stilling basin, fourteen experiments with different discharges were conducted on both divergent-convergent and divergent basins. As shown in Figure (1), the length of the expansion and contraction channel was 85 cm and 65 cm, respectively.

Moreover, the channel width was 30 cm and 48 cm at the first of expansion and contraction, respectively.

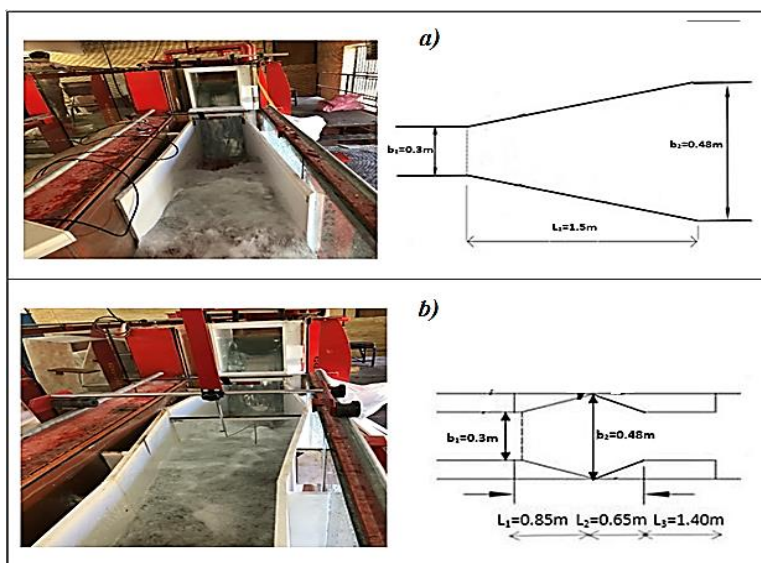


Fig. 1-The experimental stilling basin a) divergent basin; b) divergent-convergent basin

Results and Discussion

As shown in Table (1), in maximum discharge ($Q=66.1$ lit/s), the maximum ratio of flow depth (y_2/y_1) and jump length (L_j/y_1) in the divergent basin are 6 and 24, while these values in the divergent-convergent channel are 5.83 and 20.83, respectively. On the other hand, the maximum value of $\Delta E/EI$ in the divergent and divergent-convergent basins is 0.70 and 0.73, respectively. The results show that with increasing the Froud number the flow depth ratio (y_2/y_1) and jump length (L_j/y_1) increase in both divergent-convergent and divergent ponds gradually, but both of these values in the divergent-convergent basin are always less than those in the divergent basin. For example, for the $Fr_1 = 6.96$, the flow depth ratio in the divergent basin is 7.06 and decreases to 5.88 in the divergent-convergent basin (reduction of 17%). Furthermore, for $Fr_1 = 6.96$, the L_j/y_1 is 21.18 and 27.94 in the divergent-convergent and divergence basins, respectively.

To evaluate the performance of the divergent-convergent and divergence basins, the results were compared to the classic basin. The maximum y_2/y_1 and L_j/y_1 in the divergent-convergent basin decrease by 35.5% and 95.7%, respectively, compared to the classical basin, while for the divergent basin the reduction is 31.7% and It is 69.9%. Furthermore, the energy loss ratio ($\Delta E/EI$) in divergent-convergent and convergent basins has increased by 23.9% and 19.8%, respectively. The results indicate that the performance of divergent-convergent basins is much better than divergent and classic basins. Finally, several equations were developed to predict the flow depth ratio and jump length ratio in the divergent-convergent basins.

Table 1-The hydraulic jump characteristics

NO	Q (Lit/s)	Divergent basin							Divergent-convergent basin						
		Fr1	E1 (m)	E2 (m)	ΔE (m)	$(\Delta E/E1)$	$(y2/y1)$	$(Lj/y1)$	Fr1	E1 (m)	E2 (m)	ΔE (m)	$(\Delta E/E1)$	$(y2/y1)$	$(Lj/y1)$
1	66.1	6.29	1.04	0.31	0.73	0.70	6.00	24.00	6.69	1.12	0.30	0.82	0.73	5.83	20.83
2	58.0	6.47	0.99	0.30	0.68	0.69	6.44	25.11	6.06	0.91	0.27	0.64	0.71	5.32	18.09
3	56.0	6.68	1.00	0.30	0.71	0.70	6.63	26.05	6.24	0.92	0.26	0.66	0.72	5.44	19.11
4	54.5	6.99	1.04	0.29	0.75	0.72	6.88	26.83	6.50	0.95	0.25	0.70	0.73	5.58	19.53
5	53.5	7.25	1.08	0.29	0.79	0.73	7.09	26.58	6.61	0.96	0.24	0.72	0.75	5.48	19.05
6	49.5	7.11	1.00	0.29	0.71	0.71	7.24	27.63	6.59	0.91	0.23	0.67	0.74	5.50	18.75
7	45.0	7.31	0.97	0.27	0.70	0.72	7.43	28.57	6.47	0.83	0.22	0.61	0.74	5.39	18.95
8	41.0	6.96	0.86	0.25	0.61	0.71	7.06	27.94	6.96	0.86	0.21	0.65	0.75	5.88	21.18
9	40.0	7.10	0.87	0.26	0.61	0.71	7.45	28.79	7.44	0.92	0.22	0.70	0.76	6.41	21.88
10	38.0	7.41	0.88	0.24	0.64	0.72	7.58	29.03	7.41	0.88	0.21	0.67	0.76	6.45	21.61
11	32.0	7.68	0.82	0.23	0.59	0.72	8.30	31.48	6.90	0.72	0.19	0.53	0.74	6.03	20.69
12	29.5	8.71	0.92	0.23	0.69	0.75	9.36	34.04	7.94	0.81	0.18	0.63	0.78	6.80	24.00
13	25.5	9.59	0.94	0.22	0.73	0.77	10.50	38.50	8.32	0.78	0.17	0.61	0.78	7.55	25.91
14	23.5	9.55	0.89	0.20	0.68	0.77	10.26	39.47	8.84	0.80	0.17	0.63	0.79	8.00	28.50

Conclusions

Hydraulic jump is used as an important energy dissipator downstream of hydraulic structures such as spillways, gates, and chutes. The innovation of this research is to use divergent-convergent stilling basins to increase the performance of the stilling basins. The results indicate that in the divergent-convergent basin, the depth ratio ($y2/y1$) and jump length ($Lj/y1$) decrease by 35.5% and 95.7% compared to the classical basin, respectively. The reduction of these values for the divergence basin is just 31.7% and 69.9 %, respectively. Furthermore, the energy loss in divergent-convergent and divergent basins has increased by 23.7% and 19. 8%, respectively. Finally, several equations were recommended to predict the ratio of conjugate depths and jump length using dimensional analysis and two analytical and regression methods. In light of this study, it can be concluded that divergent-convergent settling basins with smaller dimensions and greater energy loss are much more suitable alternatives for classical and divergent basins.

Acknowledgment

The authors would like to thank the Water Research Center of Islamic Azad University, Estehban Branch for providing the facilities to conduct this study.

References

- 1- Arabhaabhirama, A. and Abela, A.U. 1971. Hydraulic jump within gradually expanding channel. *Journal of the Hydraulics Division*, 97(1), pp.31–42.
- 2- Hassanpour. N. and Hosseninzade Dalir. A. and Farsadizadeh. D. and Gualtieri C. 2017. An Experimental study of hydraulic jump in a gradually expanding rectangular stilling basin with roughened bed. *MDPI journal water*, doi:10.3390.
- 3- Khalifa, A. and McCorquodale, J. 1979. Radial hydraulic jump. *Journal of the Hydraulics Division*. 105 (9): 1065–1078.
- 4- Kouluseus, H. and Ahmad, D. 1969. Circular hydraulic jump. *Journal of the Hydraulics Division*. 95 (1): 409–422.

- 5- Omid, M. and Esmaeeli Varaki, M. and Narayanan, R. 2007. Gradually expanding hydraulic jump in a trapezoidal channel. *Journal of the Hydraulics Reserch*. 45 (4): 512–518.
- 6- Peterka. A. J. 1958. Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators. United States Department of the Interior: Washington, DC, USA.



© 2023 Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. This article 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/>).

بررسی آزمایشگاهی مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های واگرا-همگرا

محمد حسین جعفری ابنوی^۱، رضا محمدپور^۲ و محمد کریم بیرامی^۳

۱- دانشجوی دکتری آب و سازه‌های هیدرولیکی دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان.

۲- نویسنده مسئول، استادیار گروه آب و واحد استهبان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان. Re.Mo564@iau.ac.ir

۳- دانشیار، دانشگاه صنعتی اصفهان.

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۳۰

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۸/۲۵

دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۸

چکیده

در این تحقیق مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های واگرا-همگرا مورد بررسی قرار گرفته و کلیه آزمایش‌ها در کانالی به طول ۱۱ متر، عمق ۰/۷ متر و عرض ۰/۴۸ متر انجام گرفت. نتایج به دست آمده از حوضچه واگرا-همگرا با حوضچه واگرای تدریجی و کلاسیک و همچنین تحقیقات پیشین مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در دبی بیشترین نسبت عمق (y_2/y_1) و طول پرش (L_j/y_1) در حوضچه واگرا-همگرا به ترتیب به میزان ۳۵/۵ و ۹۵/۷ درصد نسبت به حوضچه‌های کلاسیک کاهش داشته در حالی که این مقادیر برای حوضچه واگرای تدریجی به ترتیب برابر با ۳۱/۷ و ۶۹/۹ درصد به دست آمده است. از طرفی مقدار افت انرژی در حوضچه‌های واگرا-همگرا و واگرای تدریجی به ترتیب ۲۳/۷ و ۱۹/۸ درصد نسبت به حوضچه‌های کلاسیک افزایش یافته است. در انتها با استفاده از آنالیز ابعادی و دو روش تحلیلی و رگرسیونی، معادله‌هایی برای پیش‌بینی نسبت اعماق مزدوج و طول پرش پیشنهاد شده است. با توجه به این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت که حوضچه‌های واگرا-همگرا عملکرد مناسب‌تری نسبت به حوضچه‌های کلاسیک و واگرا دارد که علاوه بر ابعاد کمتر دارای افت انرژی بیشتری نیز می‌باشند.

کلید واژه‌ها: سرعت جریان، عمق ثانویه پرش، طول گرداب پرش، افت انرژی در پرش.

مقدمه

پرش هیدرولیکی به عنوان یک پدیده مهم کاهش دهنده انرژی در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی، سرریزها، دریچه‌ها، تندآب‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. به منظور کنترل پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش، از حوضچه‌هایی با طرح‌های هندسی متفاوت مورد استفاده می‌شود. طراحی حوضچه‌ها تأثیر مستقیمی روی عمق ثانویه، طول و افت انرژی پرش هیدرولیکی دارد. یکی از متداول‌ترین نوع پرش‌های هیدرولیکی، پرش هیدرولیکی روی کف صاف و افقی در کانال‌های مستطیلی می‌باشد که به آن پرش هیدرولیکی کلاسیک می‌گویند. این نوع پرش توسط Belanger (1828) مورد بررسی قرار گرفت، وی با توجه به معادله مومنوم و پیوستگی رابطه‌ای برای محاسبه اعماق متناوب در کانال‌های منشوری افقی ارائه کرد که به رابطه بلانگر معروف است. در چند دهه اخیر، پرش هیدرولیکی در کانال‌های شیبدار از جمله مواردی بوده که مورد علاقه محققین واقع شده است. Beirami و Chamani (2006 & 2010) عمق ثانویه، طول و افت انرژی پرش هیدرولیکی را در کانال‌های شیبدار

مستطیلی بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه دست یافتند که در شیب منفی و مثبت عمق ثانویه به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. همچنین برای افت انرژی نشان دادند که افت انرژی در پرش کلاسیک با شیب صفر نسبت به پرش در شیب‌های مثبت و منفی بیشتر است.

پرش هیدرولیکی در کانال‌های مستطیلی با مقاطع واگرا نسبت به پرش هیدرولیک کلاسیک به دلیل کاهش عمق ثانویه، مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته است. لازم به توضیح است که در مکان‌هایی که عمق پایاب مورد نیاز پرش کلاسیک نباشد تبدیل واگرا توصیه می‌گردد. Arabhaabhirama و Abela (1971) مطالعه‌هایی در کانال‌های مستطیلی با دیواره واگرا با حداکثر زاویه واگرایی ۱۳ درجه انجام دادند. آن‌ها رابطه‌ای برای عمق ثانویه و افت انرژی پرش ارائه دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که در حوضچه‌های واگرا نسبت اعماق مزدوج و طول پرش کاهش و نسبت افت انرژی افزایش داشته است. Herbrand (1973) پرش هیدرولیکی متقارن در حوضچه واگرای ناگهانی را مورد بررسی قرار

افت افزایش می‌یابد. Daneshfaraz et al. (2017) خصوصیات پرش هیدرولیکی در تنگ شدگی و واگرایی را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که در تنگ شدگی مقدار افت انرژی حدود $8/74$ درصد نسبت به واگرایی کاهش داشته است. Hassanpour et al. (2017) پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش واگرا با کف زیر را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصله نشان می‌دهد که با افزایش مقدار زبری عمق ثانویه و طول پرش کاهش می‌یابد. Eshkou et al. (2018) تاثیر بلوک‌های بافل زاویه‌دار را بر خصوصیات پرش در کانال واگرایی تدریجی با بستر معکوس را بررسی کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که بلوک‌ها نسبت اعماق متوالی و طول پرش را در مقایسه با حوضچه بدون بلوک به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. Daneshfaraz et al. (2019) پرش هیدرولیکی نوع S را در حوضچه‌های آرامش با واگرایی ناگهانی و کف زبر مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق نشان داده شده که عمق ثانویه و طول پرش در بستر زبر نسبت به بستر صاف به ترتیب 20 و 16 درصد کاهش یافته و همچنین عمق ثانویه به میزان $5/58$ درصد نسبت به پرش کلاسیک کاهش می‌یابد. در این نوع کانال‌ها افت انرژی پرش برای بستر صاف و زبر به ترتیب $23/5$ و $28/7$ درصد نسبت به پرش کلاسیک افزایش داشته است. Torkamanzad et al. (2019) پرش هیدرولیکی را در حوضچه آرامش نامتقارن با واگرایی ناگهانی و بستر زبر مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیقات آنان نشان داد که عمق ثانویه و طول پرش در اینگونه حوضچه‌ها در مقایسه با حوضچه‌های منشوری با بستر صاف کاهش می‌یابد. از طرفی زبری بستر نقش تعیین کننده‌ای در محل وقوع پرش و افزایش میزان افت انرژی را ایفا می‌کند. Daneshfaraz et al. (2020) تحقیقاتی را به صورت عددی و آزمایشگاهی پیرامون تبدیل‌های واگرایی ناگهانی انجام دادند. Daneshfaraz et al. (2022) تحقیقاتی پیرامون بررسی آزمایشگاهی رفتار هیسترتیک رژیم فوق بحرانی بر پارامترهای هیدرولیکی جریان در برابر تنگ شدگی گابیونی انجام دادند. تاکنون تحقیقات عددی گسترده‌ای برای بررسی پرش‌های در کانال‌های واگرا انجام شده است. این تحقیقات نشان می‌دهد که عموماً عمق ثانویه پرش هیدرولیکی در کانال‌های واگرا نسبت به پرش کلاسیک کاهش یافته است (LUO2008, Nikpour, Roushangar and Ghasempour 2017, 2018, Daneshfaraz et al. 2020, Gul et al. 2021).

عموماً تحقیقات صورت گرفته در تبدیل‌های همگرا نسبت به واگرا کمتر بوده و اولین تحقیق در این زمینه توسط Ippen (1951) صورت گرفته است. Chanson و Montes (1995) آزمایش‌هایی در خصوص پرش هیدرولیکی در مقاطع همگرا در کانال مستطیلی انجام دادند. تحقیقات آنان نشان داد که تئوری کلاسیک

داد. نتیجه این تحقیق ارائه یک رابطه تجربی ساده برای تعیین اعماق متناوب بوده است. Hager (1985) خصوصیات پرش هیدرولیکی در کانال مستطیلی غیر منشوری واگرا را بررسی کرد. نتایج این تحقیق نشان داد که عمق ثانویه پرش در کانال واگرا با شرایط ورودی یکسان در مقایسه با کانال مستطیلی منشوری کمتر می‌باشد. Hager و Bremen (1993) پرش هیدرولیکی در کانال واگرایی ناگهانی با بستر افقی که پنجه پرش در ابتدای واگرایی رخ می‌دهد را بررسی کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که عملکرد این نوع پرش نسبت به پرش هیدرولیک کلاسیک بهتر بوده اما طول پرش در این نوع کانال‌ها بزرگتر است. Alhamid (2004) خصوصیات پرش هیدرولیکی S-Jump در کانال واگرایی ناگهانی با بستر صاف و شیب‌دار را بررسی کرد. در این نوع پرش پنجه پرش کاملاً در مقطع واگرا قرار می‌گیرد. نتایج نشان دادند که نسبت اعماق متوالی در پرش هیدرولیکی S-Jump در مقایسه با پرش هیدرولیک کلاسیک کوچک‌تر است. از طرفی با کوچک‌تر شدن عرض کانال شیب‌دار با واگرایی ناگهانی، عمق ثانویه پرش نسبت به پرش هیدرولیک کلاسیک کاهش چشم‌گیری داشته است. Kashefipour و Bakhtiari (2009) تاثیر افزایش زاویه واگرایی را بر پارامترهای پرش هیدرولیکی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند در زاویه واگرایی 25 درجه و عدد فرود اولیه حدود چهار، عمق ثانویه حدود 27 درصد کاهش و افت انرژی 55 درصد نسبت به پرش کلاسیک افزایش می‌یابد. Zare و Doering (2011) مطالعه‌هایی پیرامون پرش هیدرولیکی در کانال‌های واگرایی ناگهانی منشوری و غیر منشوری انجام دادند. آن‌ها پارامترهای جدیدی تحت عنوان ارتفاع آستانه و مکان آستانه معرفی کردند که در طراحی حوضچه‌های آرامش برای کنترل جریان و آبستگي بسیار اهمیت دارد. Habib et al. (2012) خصوصیات پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش با دیواره واگرایی تدریجی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که دیواره‌های واگرا، عمق ثانویه و طول پرش را کاهش و افت انرژی را افزایش می‌دهد. همچنین کمترین مقدار اعماق نسبی و طول پرش در حوضچه با زاویه واگرایی آن $10/2$ درجه به دست آمد. Varaki et al. (2014) مطالعه‌هایی پیرامون پرش هیدرولیکی در کانال‌های واگرا تدریجی با شیب معکوس به صورت تئوری و آزمایشگاهی انجام دادند. آن‌ها روابطی را برای خصوصیات پرش ارائه کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش توام درجه واگرایی و شیب کف معکوس، عمق ثانویه، طول پرش کاهش و

که در این رابطه Fr_1 و Re به ترتیب عدد فرود قبل از پرش و عدد رینولدز می‌باشد. با توجه به اینکه در این تحقیق مقادیر عدد رینولدز بین ۹۱۳۴۰ تا ۲۵۶۹۲۰ بوده بنابراین جریان کاملاً آشفته بوده و می‌توان از تاثیر لزجت و یا عدد رینولدز چشم پوشی کرد بنابراین رابطه فوق به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$F\left(Fr_1, \frac{b_1}{y_1}, \frac{b_2}{y_2}, \frac{\theta_1}{y_1}, \frac{\theta_2}{y_2}, \frac{L_j}{y_1}, \frac{\Delta E}{E_1}\right) = 0 \quad (3)$$

با توجه به اینکه در این تحقیق عرض در ابتدا و انتهای تبدیل در کلیه آزمایش‌ها ثابت بوده بنابراین مقدار $\frac{b_1}{b_2}$ و همچنین $\frac{\theta_1}{\theta_2}$ ثابت می‌باشد در نتیجه این نسبت نیز در این تحقیق بعنوان متغیر محسوب نخواهد شد و از رابطه فوق حذف خواهد شد در نتیجه می‌توان رابطه نهایی بی بعد را برای نسبت عمق مزدوج، طول پرش و افت انرژی پرش به صورت زیر خلاصه کرد:

$$\frac{y_2}{y_1} = f(Fr_1, \frac{b_1}{y_1}) \quad (4)$$

$$\frac{L_j}{y_1} = f(Fr_1, \frac{b_1}{y_1}) \quad (5)$$

$$\frac{\Delta E}{E_1} = f(Fr_1, \frac{b_1}{y_1}) \quad (6)$$

کلیه آزمایش‌ها در کانالی به طول ۱۱ متر و عرض ۰/۴۸ متر واقع در دانشگاه آزاد اسلامی-واحد استهبان انجام گرفت. ارتفاع کانال در چهار متر ابتدای ۱/۲ متر و در هفت متر انتهایی به ۰/۷ متر کاهش می‌یابد. مقطع طولی کانال در شکل (۱-الف) نشان داده شده است. در این تحقیق برای تشکیل پرش هیدرولیکی از یک سرریز اوجی شکل استاندارد با ارتفاع $P=0/8$ متر و عرض $L=0/3$ متر استفاده شد. با توجه به شکل (۱) پاشنه سرریز در قسمتی از کانال که ارتفاع آن ۱/۲ متری می‌باشد و پنجه سرریز در عمق ۰/۷ متری نصب شد. بلافاصله بعد از سرریز از تبدیل‌ها نصب شد. برای کنترل و تشکیل پرش هیدرولیکی از یک دریچه در انتهای کانال استفاده شد که با افزایش سطح آب در پایاب بوسیله بالا آوردن دریچه پرش هیدرولیکی ایجاد شد. لازم به توضیح است که شروع پرش هیدرولیکی دقیقاً انتهای سرریز اوجی شکل و ابتدای حوضچه آرامش بود. پلان حوضچه آرامش با تبدیل واگرا-همگرا و همچنین سرریز اوجی در شکل (۱-ب) نشان داده شده است. حوضچه‌های آرامش واگرا-همگرا به گونه‌ای طراحی شد که واگرایی در ابتدا و همگرایی پس از آن قرار گیرد.

پرش هیدرولیکی در مقاطع همگرا با جریان‌های فوق بحرانی مطابقت بیشتری دارد. Ohtsu et al. (1997) نشان داد که پرش هیدرولیکی در مقاطع همگرا به عدد فرود اولیه، شیب کف، عدد رینولدز و فاصله پاشنه پرش تا تاج پرش بستگی دارد. Honar و Porhamze (2010) پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش همگرا را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که اعماق نسبی و طول پرش در یک حوضچه همگرا نسبت به حالت کلاسیک به ترتیب حدوداً ۵۶ و ۵۱ درصد کاهش می‌یابد.

بررسی مطالعه‌های پیشین نشان می‌دهد که اکثر تحقیقات انجام شده روی پرش هیدرولیکی مربوط به حوضچه‌های واگرا و اندکی از آنها مربوط به حوضچه‌های همگرا بوده است. با توجه به اینکه تحقیقات اندکی پیرامون تبدیل واگرا-همگرا انجام شده، لذا نوآوری این تحقیق استفاده هم‌زمان از تبدیل واگرا-همگرا برای بررسی خصوصیات پرش هیدرولیکی در این نوع حوضچه‌ها می‌باشد

مواد و روش‌ها

تحلیل ابعادی

با توجه به اینکه در این تحقیق دو نوع حوضچه واگرا-همگرا و واگرایی تدریجی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است لازم است در ابتدا تحلیل ابعادی به منظور یافتن پارامترهای مؤثر بر پرش در این گونه حوضچه انجام گیرد. به طور کلی مشخصات پرش هیدرولیکی در این نوع حوضچه‌ها تابعی از پارامترهای زیر است.

$$F(\rho, \mu, y_1, y_2, V_1, g, b_1, b_2, \theta_1, \theta_2, L_j, \Delta E, E_1) \quad (1)$$

در این رابطه ρ = جرم حجمی سیال، μ = گرانروی دینامیکی، y_1 = عمق اولیه پرش هیدرولیکی، y_2 = عمق ثانویه پرش هیدرولیکی،

g = شتاب ثقل، V_1 = سرعت قبل از پرش هیدرولیکی، L_j = طول غلطانی پرش، ΔE = افت انرژی پرش، E_1 = انرژی در مقطع ابتدایی، θ_1 زاویه واگرایی، θ_2 زاویه همگرایی، b_1 و b_2 به ترتیب عرض کانال در ابتدا و انتهای تبدیل واگرا. با توجه به اینکه عمق آب روی سرریز بیشتر از پنج سانتی‌متر بوده اثر کشش سطحی روی مشخصات هیدرولیکی پرش تاثیری ندارد. (شکل ۱).

با استفاده از نظریه باکینگهام پارامترهای بی بعد به صورت زیر انتخاب شد.

$$F\left(Fr_1, Re, \frac{b_1}{y_1}, \frac{b_2}{y_2}, \frac{\theta_1}{90}, \frac{\theta_2}{90}, \frac{L_j}{y_1}, \frac{\Delta E}{E_1}\right) = 0 \quad (2)$$

با دقت مناسب و تزریق پرمنگنات برای مشخص شدن آخرین موج غلطان اندازه‌گیری شد. همان‌گونه که در جدول (۱) نشان داده شده است، محدوده دبی جریان از $23/5$ تا $66/1$ لیتر بر ثانیه برای هر حوضچه انتخاب و پارامترهای مورد نظر برداشت شد. پارامترها اندازه‌گیری شده عبارتند از: $y_1 =$ عمق اولیه پرش هیدرولیکی، $y_2 =$ عمق ثانویه پرش هیدرولیکی، $L_j =$ طول پرش. لازم به توضیح است که با جمع‌آوری این مقادیر میزان سرعت جریان در ابتدا و انتها با استفاده از رابطه پیوستگی به دست آمد همچنین عدد فرود و پارامترهای هیدرولیکی پرش در هر آزمایش محاسبه شد. محدوده پارامترهای آزمایشگاهی تحقیق حاضر در جدول (۱) نشان داده شده است. در ادامه مقایسه‌ای بین نتایج به دست آمده در این تحقیق و مطالعه‌های پیشین انجام شده است. جدول (۲) روابطی که توسط محققان پیشین برای محاسبه نسبت عمق جریان ($\frac{y_2}{y_1}$) در حوضچه‌های کلاسیک و تبدیل‌های واگرای تدریجی و همچنین واگرای ناگهانی ارائه شده است را نشان می‌دهد. روابط ارائه شده Herbrand (1973)، Alhamid (2004)، Matin et al. (2008) مربوط به حوضچه‌های واگرای ناگهانی و Varaki et al. (2014) و Hassanpour et al. (2017) مربوط به حوضچه‌های واگرای تدریجی می‌باشد.

در این تحقیق، برای بررسی عملکرد حوضچه آرامش، آزمایش‌ها روی دو نوع حوضچه واگرا-همگرا و واگرای تدریجی انجام شد (شکل ۲). در شکل (۲-الف) جزئیات تبدیل واگرای تدریجی نشان داده شده است. این تبدیل به طول $1/5$ متر بوده که عرض آن در ابتدا $b_1=30\text{ cm}$ و $b_2=48\text{ cm}$ می‌باشد. در شکل (۲-ب) از یک تبدیل واگرا - همگرا استفاده شده است بدین صورت که جریان پس از عبور از سرریز به عرض 30 سانتی‌متر ابتدا وارد یک تبدیل واگرا و سپس به تبدیل همگرا خواهد رسید. طول تبدیل‌های واگرا و همگرا به ترتیب 85 سانتی‌متر و 65 سانتی‌متر و عرض آن‌ها به ترتیب $b_1=30\text{ cm}$ و $b_2=48\text{ cm}$ می‌باشد. لازم به ذکر است که عرض کانال پس از تبدیل همگرا مجدداً به 30 سانتی‌متر رسیده است. با توجه به محدودیت‌های کانال آزمایشگاهی و همچنین مطالعه‌های پیشین (معمولاً زاویه واگرایی بیش از چهار درجه)، در این تحقیق دو زاویه شش و هشت درجه انتخاب شد. بعد از نصب و راه‌اندازی هر کدام از مدل‌های مورد نظر اعماق جریان با استفاده از عمق سنج (Point Gage) با دقت $0/1$ میلی‌متر در سه نقطه از عرض کانال برداشت شده و عمق متوسط آن‌ها به عنوان عمق نهایی در نظر گرفته شد.

طول پرش هیدرولیکی که عبارت است از فاصله شروع پرش تا نقطه ای روی سطح آب بلافاصله پس از آخرین موج غلطان (L_j)

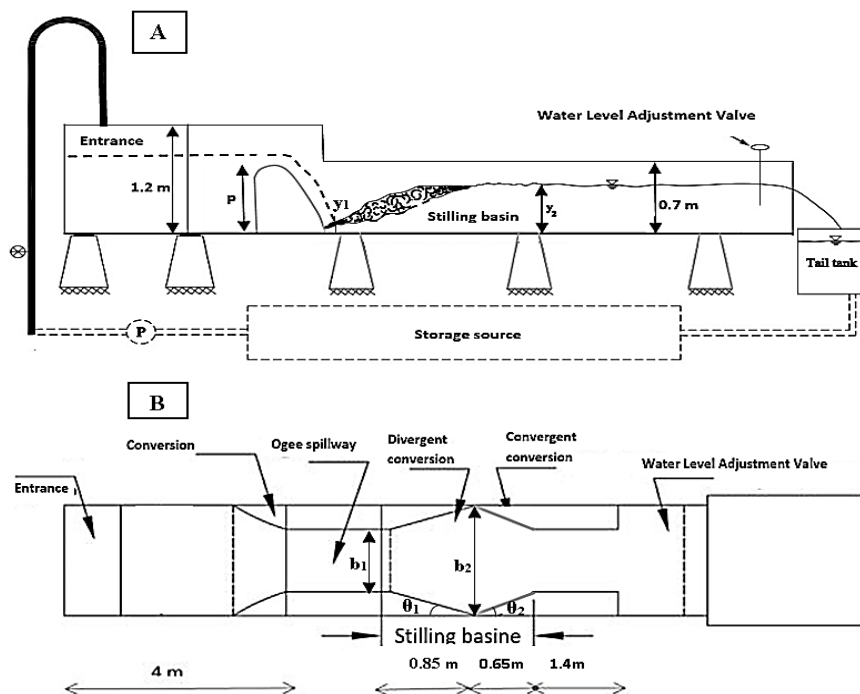


Fig. 1-Schematic view of flume A) longitudinal section, B) plan

شکل ۱- نمای شماتیک کانال الف: مقطع طولی ب: پلان

جدول ۱- محدوده پارامترهای آزمایشگاهی

Table 1-Range of experimental parameters

Variables	Q (m ³ /s)	Fr ₁	y ₁ (cm)	y ₂ (cm)	V ₁ (m/s)
Range of parameters	23.5-66.1	6.05-10.5	1.9-5	16-30	3.6-4.59

جدول ۲- روابط پیشنهادی برای اعماق مزدوج پرش

Table 2-The suggested equations for depth ratio

Researcher(s)	Type of Stilling Basin	Equations
Bélanger (1828)	Classic jump	$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2}(-1 + \sqrt{1 + 8F_1^2})$
Herbrand (1973)	Sudden divergent	$\frac{y_2}{y_1} = \sqrt{\frac{2}{B}F_1 - \frac{1}{2B}}$
Alhamid (2004)	Sudden divergent	$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8[F_1^2(1 + 0.25 \ln B)^{(1 + \ln F_1)}]} - 1 \right)$
Matin et al. (2008)	Sudden divergent	$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2}(\sqrt{1 + 8E^2} - 1)$, $E^2 = K^{-1}F_1^2$, $K = 1 + 4.243 \left[\log_{10}\left(\frac{1}{B}\right) \log_{10}(F_1) \right]$
Varaki et al. (2014)	Gradual divergent	$\frac{y_2}{y_1} = 0.309(S + 1)^{3.4542}(\theta + 1)^{-0.1197}(F_1^{0.5175}) \left(\frac{L}{y_1}\right)^{0.5444} + 1.4396$
Hassanpour et al. (2017)	Gradual divergent	$\frac{y_2}{y_1} = 0.832(F_1) + 1.998(B) - 1.25 \left(\frac{r}{y_1}\right) + 0.432$

B=b₂/b₁

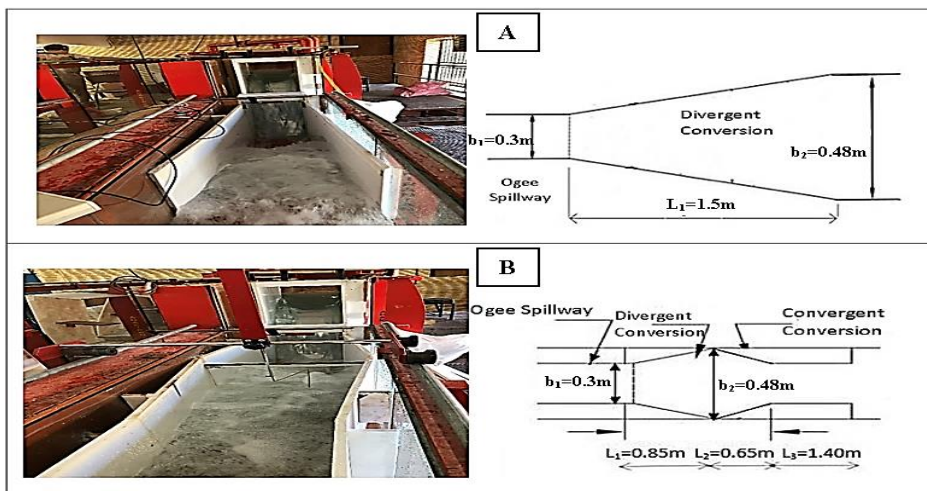


Fig. 2-Stilling Basin A) Gradual divergent; B) divergent-convergent

شکل ۲- حوضچه آرامش الف: تبدیل واگرای تدریجی ب: تبدیل واگرا-همگرا

نتایج و بحث

با شروع آزمایش در کانال و عبور جریان از روی سرریز، جریان فوق بحرانی در کانال تشکیل شده لذا برای ایجاد پرش هیدرولیکی و افزایش عمق پایاب از درپچه انتهایی کانال استفاده شد. شروع کلیه پرش‌ها در تمامی آزمایش‌ها در ابتدای حوضچه و انتهای آن درون حوضچه قرار گرفت. جدول (۳) نتایج به‌دست آمده برای هر دو حوضچه واگرا-همگرا و حوضچه واگرای تدریجی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که قبلاً ذکر شد تعداد ۱۴ آزمایش با دبی‌های متفاوت از ۲۳/۵ تا ۶۶/۱ لیتر بر ثانیه انجام شد. این نتایج نشان دهنده آن است که با کاهش دبی، مقادیر سرعت، عمق جریان و همچنین طول پرش هیدرولیکی در هر دو حوضچه کاهش می‌یابد. جدول (۴) مقادیر پارمترهای جریان از جمله انرژی (E)، نسبت افت انرژی ($\Delta E/E_1$)، نسبت عمق جریان (y_2/y_1) و همچنین نسبت طول پرش هیدرولیکی (L_j/y_1) را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این جدول نشان داده شده است در حداکثر دبی ($Q=66.1 \text{ lit/s}$)، نسبت عمق جریان و طول پرش در حوضچه واگرای تدریجی برابر با ۶ و ۲۴ بوده در حالی که این مقادیر در حوضچه واگرا-همگرا به ترتیب برابر با ۵/۸ و ۲۰/۸ می‌باشد که نشان دهنده کاهش این پارامترها خواهد بود. از طرفی مقدار ($\Delta E/E_1$) در حوضچه‌های واگرای تدریجی برابر با ۰/۷۰ بوده که به مقدار ۰/۷۳ در حوضچه‌های واگرا-همگرا رسیده و نشان دهنده افزایش افت در اینگونه حوضچه‌ها می‌باشد. در شکل (۳-الف) تغییرات نسبت عمق جریان بر حسب عدد فرود نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود نسبت عمق در هر دو حوضچه واگرا-همگرا و همچنین واگرای تدریجی افزایش می‌یابد. همچنین در تمامی مقادیر عدد فرود، نسبت عمق در حوضچه واگرا-همگرا کمتر از حوضچه واگرای تدریجی می‌باشد. به‌طور مثال برای عدد فرود $Fr_1 = 6/96$ این مقدار در حوضچه واگرای تدریجی برابر با ۷/۰۶ می‌باشد که با کاهش ۱۷٪ به مقدار ۵/۸۸ در حوضچه واگرا-همگرا می‌رسد. همچنین در دبی بیشترین مقادیر (y_2/y_1) در حوضچه واگرا-همگرا و واگرای تدریجی به ترتیب برابر با ۵/۸ و ۲۰/۸ می‌باشد که نشان دهنده میزان تقریبی ۳ درصد کاهش عمق در حوضچه واگرا-همگرا می‌باشد.

در شکل (۳-ب) تغییرات نسبت طول پرش (L_j/y_1) در هر دو حوضچه واگرا-همگرا و واگرای تدریجی نشان داده شده است. نتایج

نشان می‌دهد که در هر دو حوضچه با افزایش عدد فرود میزان طول پرش افزایش می‌یابد اما همواره طول پرش در حوضچه واگرا-همگرا از حوضچه‌های واگرای تدریجی کمتر می‌باشد. به‌طور مثال برای عدد فرود $Fr_1 = 6/96$ این مقدار در حوضچه واگرا-همگرا ۲۱/۱۸ و در واگرای تدریجی ۲۷/۹۴ می‌باشد. همان‌گونه که در جدول (۴) نشان داده شده است در حداکثر دبی (L_j/y_1) در حوضچه واگرا-همگرا و واگرای تدریجی به ترتیب با مقادیر ۲۰/۸ و ۲۴ بوده که نشان دهنده کاهش طول پرش در حوضچه‌های واگرا-همگرا به میزان تقریبی ۱۵/۳ درصد می‌باشد.

با توجه به اینکه میزان افت انرژی یکی از پارامترهای مهم در طراحی حوضچه‌های آرامش می‌باشد لذا در شکل (۳-ج) تغییرات افت انرژی نسبت به عدد فرود در هر دو حوضچه واگرا-همگرا و واگرای تدریجی نشان داده شده است. هر چند که نسبت افت انرژی در هر دو حوضچه، با افزایش عدد فرود افزایش می‌یابد اما این مقدار در حوضچه‌های واگرا-همگرا نسبت به حوضچه‌های واگرای تدریجی بیشتر است. نتایج ارائه شده در جدول (۴) نشان می‌دهد در حداکثر دبی انرژی قبل و بعد از پرش برای حوضچه واگرا-همگرا برابر با انرژی ۱/۱۲ و ۰/۳ متر می‌باشد در حالی که این مقادیر برای حوضچه واگرای تدریجی برابر با ۱/۰۴ و ۰/۳۱ متر می‌باشد. از طرفی میزان افت انرژی برای حداکثر دبی ($\Delta E/E_1$) در حوضچه واگرا-همگرا و واگرای تدریجی به ترتیب برابر با ۰/۷۳ و ۰/۷ بوده که نشان دهنده افزایش افت به میزان ۴/۸ درصد در حوضچه‌های واگرا-همگرا می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد که با توجه به کاهش عمق، طول و همچنین افزایش میزان افت انرژی پرش ابعاد حوضچه در تبدیل‌های واگرا-همگرا از واگرای تدریجی کمتر می‌باشد. در شکل (۴) مقایسه بین نتایج به‌دست آمده در این تحقیق و مطالعه‌های پیشین نشان داده شده است. نتایج ارائه شده در شکل (۴-الف) نشان می‌دهد که آزمایش‌های انجام شده در حوضچه واگرا انطباق مناسبی با تحقیقات پیشین دارند. علاوه بر این برای تمامی مقادیر مختلف عدد فرود، نسبت عمق جریان ($\frac{y_2}{y_1}$) در حوضچه‌های واگرا-همگرا از حوضچه‌های واگرای تدریجی، واگرای ناگهانی و همچنین حوضچه‌های کلاسیک کمتر می‌باشد.

جدول ۳-مقادیر برداشت شده برای حوضچه واگرا- همگرا و حوضچه واگرای تدریجی

Table 3- Collected data for gradual divergent and divergent-convergent

NO	Q (Lit/s)	Gradual divergent					Divergent-convergent				
		y1 (m)	y2 (m)	Lj (m)	V1 (m/s)	V2 (m/s)	y1 (m)	y2 (m)	Lj (m)	V1 (m/s)	V2 (m/s)
1	66.1	0.050	0.300	1.200	4.407	0.508	0.048	0.280	1.000	4.590	0.590
2	58.0	0.045	0.290	1.130	4.296	0.476	0.047	0.250	0.850	4.113	0.546
3	56.0	0.043	0.285	1.120	4.341	0.479	0.045	0.245	0.860	4.148	0.538
4	54.5	0.041	0.282	1.100	4.431	0.483	0.043	0.240	0.840	4.225	0.524
5	53.5	0.040	0.280	1.050	4.515	0.494	0.042	0.230	0.800	4.246	0.531
6	49.5	0.038	0.275	1.050	4.342	0.465	0.040	0.220	0.750	4.125	0.513
7	45.0	0.035	0.260	1.000	4.286	0.450	0.038	0.205	0.720	3.947	0.505
8	41.0	0.034	0.240	0.950	4.020	0.446	0.034	0.200	0.720	4.020	0.483
9	40.0	0.033	0.246	0.950	4.040	0.425	0.032	0.205	0.700	4.167	0.487
10	38.0	0.031	0.235	0.900	4.086	0.426	0.031	0.200	0.670	4.086	0.474
11	32.0	0.027	0.224	0.850	3.951	0.381	0.029	0.175	0.600	3.678	0.458
12	29.5	0.024	0.220	0.800	4.184	0.362	0.025	0.170	0.600	3.933	0.435
13	25.5	0.020	0.210	0.770	4.250	0.331	0.022	0.166	0.570	3.864	0.405
14	23.5	0.019	0.195	0.750	4.123	0.328	0.020	0.160	0.570	3.917	0.388

جدول ۴-محاسبه پارامترهای مربوط به جریان در حوضچه واگرا-همگرا و حوضچه واگرای تدریجی

Table 4- Calculation of flow characteristic in for gradual divergent and divergent-convergent basin

NO	Q (Lit/s)	Gradual divergent basin							Divergent-convergent basin						
		Fr1	E1 (m)	E2 (m)	ΔE (m)	(ΔE/E1)	(y2/y1)	(Lj/y1)	Fr1	E1 (m)	E2 (m)	ΔE (m)	(ΔE/E1)	(y2/y1)	(Lj/y1)
1	66.1	6.29	1.04	0.31	0.73	0.70	6.00	24.00	6.69	1.12	0.30	0.82	0.73	5.83	20.83
2	58.0	6.47	0.99	0.30	0.68	0.69	6.44	25.11	6.06	0.91	0.27	0.64	0.71	5.32	18.09
3	56.0	6.68	1.00	0.30	0.71	0.70	6.63	26.05	6.24	0.92	0.26	0.66	0.72	5.44	19.11
4	54.5	6.99	1.04	0.29	0.75	0.72	6.88	26.83	6.50	0.95	0.25	0.70	0.73	5.58	19.53
5	53.5	7.25	1.08	0.29	0.79	0.73	7.09	26.58	6.61	0.96	0.24	0.72	0.75	5.48	19.05
6	49.5	7.11	1.00	0.29	0.71	0.71	7.24	27.63	6.59	0.91	0.23	0.67	0.74	5.50	18.75
7	45.0	7.31	0.97	0.27	0.70	0.72	7.43	28.57	6.47	0.83	0.22	0.61	0.74	5.39	18.95
8	41.0	6.96	0.86	0.25	0.61	0.71	7.06	27.94	6.96	0.86	0.21	0.65	0.75	5.88	21.18
9	40.0	7.10	0.87	0.26	0.61	0.71	7.45	28.79	7.44	0.92	0.22	0.70	0.76	6.41	21.88
10	38.0	7.41	0.88	0.24	0.64	0.72	7.58	29.03	7.41	0.88	0.21	0.67	0.76	6.45	21.61
11	32.0	7.68	0.82	0.23	0.59	0.72	8.30	31.48	6.90	0.72	0.19	0.53	0.74	6.03	20.69
12	29.5	8.71	0.92	0.23	0.69	0.75	9.36	34.04	7.94	0.81	0.18	0.63	0.78	6.80	24.00
13	25.5	9.59	0.94	0.22	0.73	0.77	10.50	38.50	8.32	0.78	0.17	0.61	0.78	7.55	25.91
14	23.5	9.55	0.89	0.20	0.68	0.77	10.26	39.47	8.84	0.80	0.17	0.63	0.79	8.00	28.50

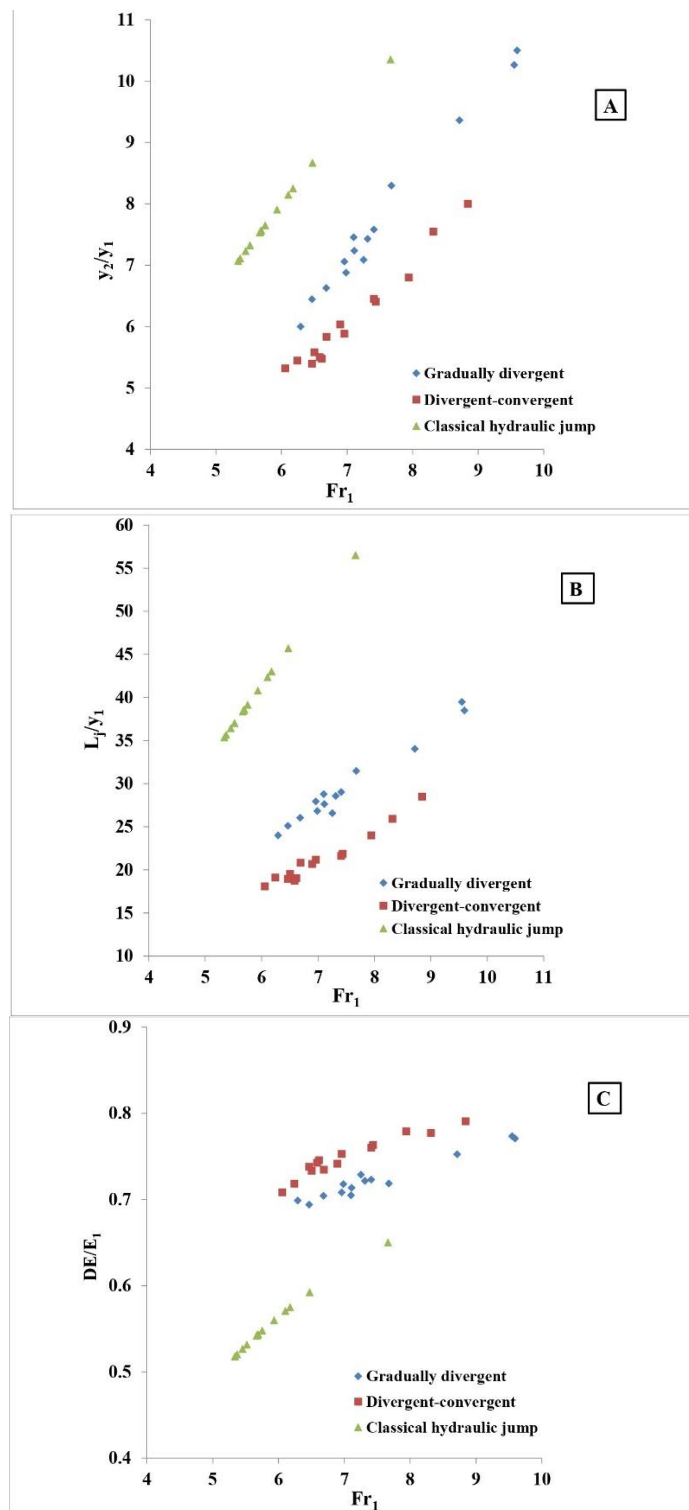


Fig. 3-Variation of hydraulic jump characteristics in terms of Froude number A) Depth ratio, B) Length ratio, C) Energy loss ratio شکل

۳- تغییرات پرش بر حسب عدد فرود الف) نسبت عمق پرش ب) نسبت طول پرش ج) نسبت افت انرژی

مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در حداکثر دبی، نسبت عمق ثانویه در حوضچه‌های کلاسیک از ۷/۹ به مقدار ۵/۸ در حوضچه‌های واگرا-همگرا کاهش پیدا کرده است. دلیل این امر آن است که در جریان‌های فوق بحرانی تبدیل واگرا و در جریان زیر بحرانی تبدیل همگرا عمق جریان را کاهش می‌دهد، از آنجایی که در ابتدای حوضچه جریان فوق بحرانی و پس از پرش جریان زیر بحرانی است لذا انتظار می‌رود در حوضچه واگرا-همگرا عمق جریان کاهش یابد. همچنین در دبی حداکثر نسبت طول پرش از ۴۰/۷ در حوضچه‌های کلاسیک به مقدار ۲۰/۸ در حوضچه‌های واگرا-همگرا کاهش یافته است. از طرفی نسبت افت انرژی در حداکثر دبی در تبدیل‌های کلاسیک از مقدار ۰/۵ به ۰/۷ در حوضچه‌های واگرا-همگرا رسیده است. دلیل این امر اغتشاش و آشفته‌گی بیشتر جریان در حوضچه‌های واگرا-همگرا نسبت به حوضچه‌های کلاسیک می‌باشد. با توجه به نتایج مشابه‌ای که در حوضچه‌های واگرای تدریجی نیز به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت حوضچه‌های واگرا-همگرا عملکرد بهتری نسبت به حوضچه‌های واگرای تدریجی و کلاسیک در کاهش عمق ثانویه، طول پرش و افزایش افت انرژی دارند.

به عبارت دیگر برای یک عدد فرود ثابت بیشترین مقدار $(\frac{y_2}{y_1})$ مربوط به پرش هیدرولیک کلاسیک و کمترین آن متعلق حوضچه آرامش واگرا-همگرا می‌باشد در نتیجه حوضچه‌های واگرا-همگرا بهترین تبدیل برای پرش هیدرولیکی با حداقل عمق ثانویه می‌باشد. در شکل (۴-ب) نتایج به دست آمده در این تحقیق برای نسبت افت انرژی $(\Delta E/E_1)$ با نتایج تحقیقات پیشین مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که افت انرژی در حوضچه واگرای تدریجی انطباق مناسبی با تحقیقات پیشین دارد. همچنین در تمامی مدل‌ها با افزایش عدد فرود نسبت $(\Delta E/E_1)$ افزایش می‌یابد به عبارت دیگر با افزایش عدد فرود افت انرژی پرش افزایش می‌یابد. برای یک عدد فرود ثابت، بیشترین مقدار $(\Delta E/E_1)$ مربوط به حوضچه آرامش واگرا-همگرا و کمترین آن متعلق به پرش هیدرولیک کلاسیک می‌باشد. همچنین میزان افت انرژی در حوضچه‌های واگرا-همگرا از حوضچه‌های واگرای تدریجی و ناگهانی بیشتر می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تبدیل‌های واگرا-همگرا با حداکثر افت انرژی عملکرد بسیار بهتری نسبت به بقیه حوضچه‌ها دارند.

در شکل (۵) مقادیر نسبت عمق ثانویه (y_2/y_1) ، نسبت طول پرش (L_j/y_1) و نسبت افت انرژی $(\Delta E/E_1)$ در حوضچه‌های واگرا-همگرا و همچنین واگرای تدریجی با حوضچه‌های کلاسیک

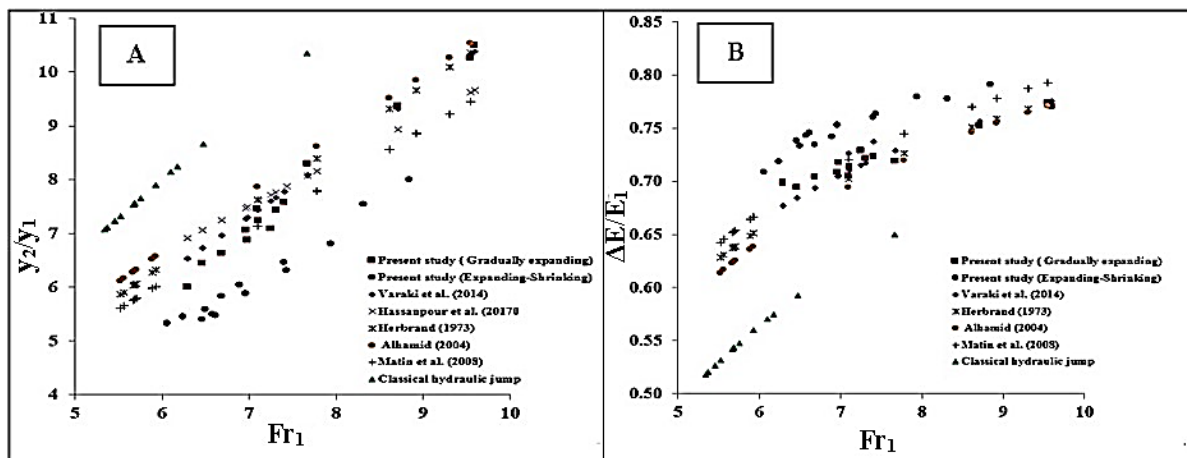


Fig. 4-A comparison between present study and previous researches A) flow depth ratio, B) energy loss ratio

شکل ۴- مقایسه تحقیق حاضر و تحقیقات دیگران (الف) نسبت اعماق مزدوج پرش (ب) نسبت افت انرژی

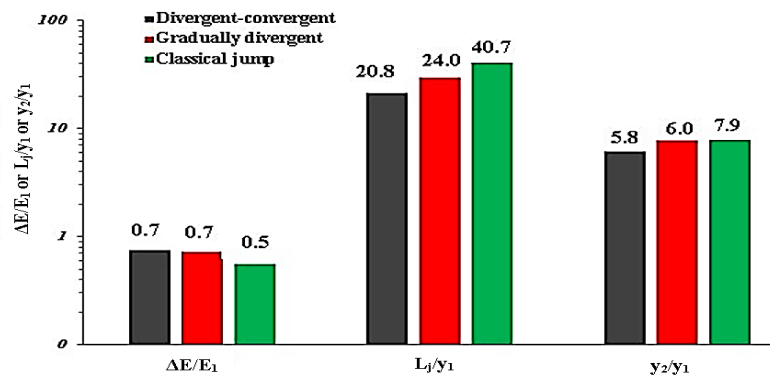


Fig. 5-A comparison between hydraulic jump parameters in different basins

شکل ۵-مقایسه پارامترهای پرش هیدرولیکی در انواع حوضچه ها

$$y_2 = \left[\frac{(F_1 - F_2)}{b_2/2} \right]^{0.5} \quad (7)$$

که در این رابطه پارامترهای F_1 و F_2 بصورت زیر تعریف می شوند:

$$F_1 = \frac{1}{2} b_1 y_1^2 - \frac{1}{2} \cos \alpha (0.48 + b_1)(y_{1.2} - y_1)^2 - \frac{1}{2} \cos \beta (0.48 + b_2)(y_2 - y_{1.2})^2 \quad (8)$$

$$F_2 = \frac{Q^2}{g} \left(\frac{1}{A_2} - \frac{1}{A_1} \right) \quad (9)$$

که در این روابط مقادیر β, α و $y_{1.2}$ از معادلات زیر به دست می آیند:

$$\sin \alpha = \frac{0.48 - b_1}{2L_1} \quad \text{و} \quad \sin \beta = \frac{0.48 - b_1}{2L_2} \quad (10)$$

$$y_{1.2} = 0.514 y_2 \quad (11)$$

مقدار $y_{1.2}$ برابر با عمق آب در محل تلاقی دو طول L_1 و L_2 می باشد. رابطه فوق دارای دقت ($R^2 = 0.984$)، $RMSE = 0.108$ و $MAE = 0.09$ می باشد. در شکل (۶-الف) روابط به دست آمده برای نسبت عمق مزدوج با استفاده از دو روش رگرسیون و تحلیلی با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج نشان می دهد که روش تحلیلی با مقدار $R^2 = 0.984$ ، $RMSE = 0.108$ دارای دقت بالاتری نسبت به روش رگرسیونی می باشد.

مقایسه میزان در صد کاهش یا افزایش پارامترهای ذکر شده در سه نوع حوضچه واگرا-همگرا، واگرای تدریجی و کلاسیک در جدول (۵) ارائه شده است. در این جدول مقادیر مثبت و منفی به ترتیب نشان دهنده میزان افزایش و کاهش می باشد. نتایج نشان می دهد که در حداکثر دبی مقادیر (y_2/y_1) و (L_1/y_1) در حوضچه واگرا-همگرا به ترتیب به میزان $35/5$ و $95/7$ درصد نسبت به حوضچه های کلاسیک کاهش داشته در حالی که این مقادیر در حوضچه واگرای تدریجی نسبت به حوضچه های کلاسیک برابر با $31/7$ و $69/9$ درصد می باشد. از طرفی مقدار افت انرژی در حوضچه های واگرا-همگرا و همگرای تدریجی به ترتیب $23/7$ و $19/8$ درصد نسبت به حوضچه های کلاسیک افزایش یافته است. همچنین مقایسه نتایج بین حوضچه های واگرای تدریجی و واگرا-همگرا نشان می دهد که نسبت عمق و طول پرش به ترتیب به میزان $2/8$ درصد و $15/2$ درصد کاهش و مقدار افت انرژی $4/8$ درصد افزایش یافته است که نشان دهنده عملکرد بهتر حوضچه های واگرا-همگرا در مقایسه با حوضچه های واگرای تدریجی می باشد.

پیش بینی پرش در حوضچه واگرا-همگرا

در ادامه این تحقیق برای به دست آوردن رابطه ای برای تعیین نسبت عمق ثانویه و طول پرش در حوضچه های واگرا-همگرا از دو روش رگرسیونی و تحلیلی استفاده شده است. در جدول (۶) با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و آنالیز ابعادی دو رابطه بر اساس روش رگرسیونی برای محاسبه پارامترها ذکر شده به دست آمده است. نتایج نشان می دهد که رابطه به دست آمده برای نسبت عمق ثانویه ($R^2=0.973$ و $RMSE=0.132$) و نسبت طول پرش ($R^2=0.957$ و $RMSE=0.60$) دارای دقت بالایی برای پیش بینی این مقادیر در حوضچه های واگرا-همگرا هستند. در این تحقیق برای محاسبه عمق ثانویه پرش به روش تحلیلی رابطه زیر با استفاده از معادله اندازه حرکت به دست آمده است:

جدول ۵- درصد تغییرات عمق ثانویه، طول پرش و افت انرژی در انواع حوضچه‌ها

Table 5-Percentage of variation for secondary depth, jump length and energy loss in different basins

Q	Variation between divergent-convergent and classic basins (%)			Variation between gradual divergent and classic basins (%)			Variation between gradual divergent and divergent-convergent basins (%)		
	(ΔE/E1)	(y2/y1)	(Lj/y1)	(ΔE/E1)	(y2/y1)	(Lj/y1)	(ΔE/E1)	(y2/y1)	(Lj/y1)
	66.10	23.79	-35.51	-95.79	19.89	-31.75	-69.96	4.87	-2.86
58.00	24.96	-37.69	-104.76	23.42	-13.65	-47.47	2.02	-21.16	-38.85
56.00	24.55	-38.31	-100.76	23.05	-13.61	-47.31	1.94	-21.74	-36.29
54.50	25.86	-35.55	-97.58	24.26	-10.00	-43.86	2.12	-23.23	-37.34
53.50	27.22	-37.79	-101.96	25.53	-6.45	-44.72	2.26	-29.44	-39.56
49.50	30.26	-28.51	-88.65	27.42	2.33	-28.01	3.92	-31.58	-47.37
45.00	29.49	-31.84	-88.20	27.89	4.26	-24.81	2.22	-37.70	-50.79
41.00	30.05	-22.91	-71.99	25.65	-2.42	-30.35	5.92	-20.00	-31.94
40.00	25.23	-29.07	-93.64	19.05	-9.30	-47.14	7.63	-18.09	-31.60
38.00	24.35	-27.86	-99.00	20.47	-8.81	-48.15	4.89	-17.50	-34.33
32.00	26.79	-25.11	-86.05	24.45	9.00	-22.27	3.09	-37.48	-52.16
29.50	29.69	-12.50	-63.10	27.20	18.28	-14.98	3.43	-37.67	-41.84
25.50	23.78	-14.88	-76.43	23.14	17.45	-18.73	0.83	-39.16	-48.60
23.50	17.80	-29.38	-98.26	15.95	-0.85	-43.14	2.20	-28.29	-38.50

جدول ۶- روابط پیشنهادی برای محاسبه پارامترهای پرش در حوضچه‌های واگرا-همگرا

Table 6-Suggested equations for hydraulic jump parameters in divergent-convergent basins

Equation	R ²	RMSE	MAE
$\frac{y_2}{y_1} = -0.473 + 0.884F_1 + 0.037\frac{b_1}{y_1}$	0.973	0.132	0.117
$\frac{L_r}{y_1} = -3.28 + 3.408F_1 + 0.052\left(\frac{b_1}{y_1}\right)$	0.957	0.60	0.52

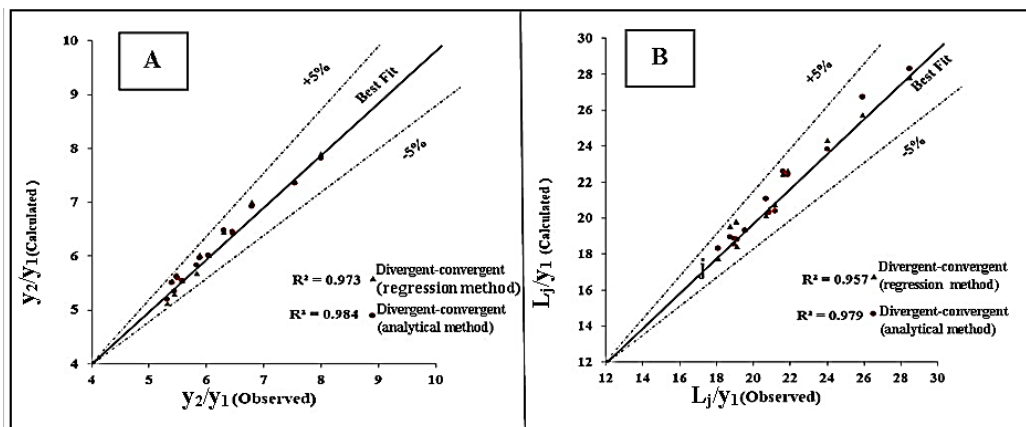


Fig. 6-A comparison between observed and calculated data at divergent-convergent basins a) flow depth ratio, b) jump length ratio

شکل ۶- مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی در حوضچه‌های واگرا-همگرا (الف) نسبت اعماق مزدوج پرش (ب) نسبت طول پرش

$$\frac{L_j}{y_1} = \frac{\left(\frac{y_2}{y_1} - 1\right)(Fr_1^2 + Fr_2^2 - 2)}{2(s_f - s_0)} \quad (12)$$

پارامترهای آماری برای این رابطه برابر با $R^2 = 0.979$ ، $MAE = 0.488$ و $RMSE = 0.659$ می‌باشد. مقایسه روش‌های تحلیل و رگرسیونی در شکل (۶-ب) نشان می‌دهد که دقت

برای تعیین نسبت طول پرش به روش تحلیلی از معادله انرژی استفاده شده است که نتیجه آن بصورت معادله (۱۲) ارائه شده است. در این رابطه با توجه به افقی بودن حوضچه آرامش $S_0 = 0$ و باتوجه به داده‌های آزمایشگاهی، مقدار $S_f = 0.078Fr_1^{2.2}$ (Beirami and Chamani, 2010): به دست می‌آید

رابطه ارائه شده به روش تحلیلی، برای پیش‌بینی نسبت طول پرش (L_j/Y_1) ، از روش رگرسیونی بالاتر می‌باشد.

نتیجه‌گیری

پرش هیدرولیکی به‌عنوان یک پدیده مهم کاهش دهنده انرژی در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی، سرریزها، دریچه‌ها، تندآب‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق خصوصیات پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش واگرا-همگرا بررسی و نتایج آن با حوضچه واگرای تدریجی، حوضچه کلاسیک و همچنین تحقیقات پیشین مقایسه شده است. کلیه آزمایش‌ها در کانالی انجام شده و برای حوضچه واگرا-همگرا از یک تبدیل برای تغییر عرض کانال از ۰/۳ متر به ۰/۴۸ متر و بالعکس استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در حداکثر دبی نسبت عمق جریان (Y_2/Y_1) و نسبت طول پرش (L_j/Y_1) در حوضچه واگرا-همگرا به‌ترتیب به میزان ۳۵/۵ و ۹۵/۷ درصد نسبت به حوضچه‌های کلاسیک کاهش داشته در حالی که مقدار کاهش این مقادیر برای حوضچه واگرای تدریجی به‌ترتیب برابر با ۳۱/۷ و ۶۹/۹ درصد می‌باشد. از طرفی مقدار افت انرژی برای حداکثر دبی در حوضچه‌های واگرا-همگرا و همگرای تدریجی به‌ترتیب ۲۳/۷ و ۱۹/۸ درصد نسبت به حوضچه‌های

کلاسیک افزایش یافته است. همچنین مقایسه نتایج بین حوضچه‌های واگرای تدریجی و واگرا-همگرا نشان می‌دهد که در تبدیل‌های واگرا-همگرا نسبت عمق و طول به‌ترتیب به میزان ۲/۸ درصد و ۱۵/۲ درصد کاهش و مقدار افت انرژی ۴/۸ درصد افزایش یافته است که نشان دهنده عملکرد بهتر حوضچه‌های واگرا-همگرا در مقابل حوضچه‌های واگرای تدریجی می‌باشد. با توجه ابعاد کمتر حوضچه‌های واگرا-همگرا و همچنین میزان افت بیشتر انرژی در آنها می‌توان نتیجه گرفت، در مکان‌های که دارای محدودیت ابعادی هستند، این‌گونه حوضچه‌ها جایگزین بسیار مناسبی برای حوضچه‌های واگرا و کلاسیک می‌باشد. در انتها با استفاده از آنالیز ابعادی و همچنین دو روش رگرسیونی و تحلیلی، معادلاتی برای پیش‌بینی نسبت اعماق مزدوج و طول پرش در حوضچه‌های واگرا-همگرا پیشنهاد شده است.

تقدیر و تشکر

این تحقیق در مرکز تحقیقات آب دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان انجام شده است و نویسندگان از مسئولین مربوطه، به‌خاطر در اختیار قراردادن امکانات، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

References

- 1- Arbbhabhirama, A. and Abella, A.U., 1971. Hydraulic jump within gradually expanding channel. *Journal of the Hydraulics Division*, 97(1), pp.31-42. Doi: 10.1061/JYCEAJ.000286.
- 2- Alhamid, A.A., 2004. S-jump characteristics on sloping basins. *Journal of Hydraulic Research*, 42(6), pp.657-662. Doi: 10.1080/00221686.2004.9628319.
- 3-Bakhmeteff. B. A. 1932. *Hydraulics of Open Channels. 1st ed.; McGraw-Hill: New York, NY, USA.*
- 4- Bremen, R. and Hager, W.H., 1993. T-jump in abruptly expanding channel. *Journal of Hydraulic Research*, 31(1), pp.61-78. Doi: 10.1080/00221689309498860.
- 5-Bélangier. J.B. 1828. *Essai sur la Solution Numérique de Quelques Problèmes Relatifs au Mouvement Permanent des Eaux Courantes* ('Essay on the Numerical Solution of Some Problems relative to Steady Flow of Water'); Carilian-Goeury: Paris, France.
- 6- Beirami, M.K. and Chamani, M.R., 2006. Hydraulic jumps in sloping channels: sequent depth ratio. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(10), pp.1061-1068.
- 7- Beirami, M.K. and Chamani, M.R., 2010. Hydraulic jump in sloping channels: roller length and energy loss. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 37(4), pp.535-543. doi:10.1139/109-175.
- 8- Chanson, H. and Montes, J.S., 1995. Characteristics of undular hydraulic jumps: Experimental apparatus and flow patterns. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(2), pp.129-144. Doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:2(129).
- 9- LUO, C.R., 2008. Analysis and Application of Hydraulic Jump with Downstream Abruptly Expanded Channel Flow. *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, (8), pp.2277-3754.

- 10- Daneshfaraz. R. Aminvash. E. Esmaeli. R. Sadeghfam. R. and Abraham J. 2020. Experimental and numerical investigation for energy dissipation of supercritical flow in sudden contractions. *Journal of Groundwater Science and Engineering*. DOI: 10.19637/j.cnki.2305-7068.2020.04.009.
- 11-Daneshfaraz. R. Aminvash. E. and Najibi. A. 2022. Experimental Study of Hysteretic Behavior of Supercritical Regime on Hydraulic parameters of Flow against Gabion Contraction. doi:10.22059/ijswr.2022.334538.669141.
- 12-Daneshfaraz. R. Majedi Asl. M. Mirzaee. R. and Ghaderi. A. 2019. The S-jump's Characteristics in the Rough Sudden Expanding Stilling Basin. *AUT . Journal of Civil Engineering.*, 4(3) (2020) 349-356 DOI:10.22060/ajce.2019.16427.5586.
- 13- Daneshfaraz, R., Sadeghi, H., Joudi, A.R. and Abraham, J., 2017. Experimental investigation of hydraulic jump characteristics in contractions and expansions. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 35(1), pp.87-98.
- 14- Eshkou, Z., Dehghani, A.A. and Ahmadi, A., 2018. Forced hydraulic jump in a diverging stilling basin using angled baffle blocks. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 144(8), p.06018004. doi: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001328.
- 15- Gul, E., Dursun, O.F. and Mohammadian, A., 2021. Experimental study and modeling of hydraulic jump for a suddenly expanding stilling basin using different hybrid algorithms. *Water Supply*, 21(7), pp.3752-3771. Doi: 10.2166/ws.2021.139.
- 16- Hassanpour, N., Hosseinzadeh Dalir, A., Farsadizadeh, D. and Gualtieri, C., 2017. An experimental study of hydraulic jump in a gradually expanding rectangular stilling basin with roughened bed. *Water*, 9(12), p.945. doi: 10.3390/w9120945.
- 17- Habib, AA, Ali, A.A.M., YM, A.A. and Yk, S., 2012. Estimation of hydraulic jump characteristics in stilling basin with guide walls. *JES. Journal of Engineering Sciences*, 40(6), pp.1599-1609. DOI: 10.21608/JESAUN.2012.114531
- 18- Hager, W.H., 1985. Hydraulic jump in non-prismatic rectangular channels. *Journal of Hydraulic Research*, 23(1), pp.21-35. Doi: 10.1080/00221688509499374.
- 19- Herbrand, K., 1973. The spatial hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Research*, 11(3), pp.205-218. Doi: 10.1080/00221687309499774
- 20- Honar, T., Pourhamzeh, S. 2010. 'An Experimental Study of Convergent Hydraulic Jump in Stilling Basins', *Water and Soil*, 24(5), pp.966- 972. doi: 10.22067/jsw.v0i0.5297 (in Persian).
- 21- Ippen, A.T., 1951. High-velocity flow in open channels: a symposium: mechanics of supercritical flow. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 116(1), pp.268-295. Doi: 10.1061/TACEAT.0006520.
- 22- Kashefipour, S.M. and Bakhtiari, M., 2009. Hydraulic jump in a gradually expanding channel with different divergence angles. In *33rd IAHR Congress. Advances in the Fundamentals of Water Science and Engineering, Vancouver*.
- 23- Matin, M.A., Hasan, M. and Islam, M.A., 2008. Experiment on hydraulic jump in sudden expansion in a sloping rectangular channel. *Journal of Civil Engineering (IEB)*, 36(2), pp.65-77.
- 24- Nikpour, M.R., 2018. Investigation of Hydraulic Jump Turbulence Parameters in Divergent Rectangular Sections using Fluent Model. *Irrigation Sciences and Engineering*, 41(2), pp.61-75. Doi: 10.22055/JISE.2018.13457

-
- 25- Ohtsu, I., Yasuda, Y., Gotoh, H., Hager, W.H., Reinauer, R., Chanson, H. and Montes, J.S., 1997. Discussions and Closure: Characteristics of Undular Hydraulic Jumps: Experimental Apparatus and Flow Patterns. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(2), pp.161-164. Doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1997)123:2(161).
- 26-Roushangar. K. and Ghasempour. R. 2017. Explicit prediction of expanding channels hydraulic jump characteristics using gene expression programming approach. 49 3 pp. 815–830.doi: 10.2166/nh.2017.262.
- 27- Torkamanzad, N., Hosseinzadeh Dalir, A., Salmasi, F. and Abbaspour, A., 2019. Hydraulic jump below abrupt asymmetric expanding stilling basin on rough bed. *Water*, 11(9), p.1756. doi:10.3390/w11091756.
- 28- Varaki, M.E., Kasi, A., Farhoudi, J. and Sen, D., 2014. Hydraulic jump in a diverging channel with an adverse slope. *Iranian Journal of Science and Technology. Transactions of Civil Engineering*, 38(C1), pp.111- 121
- 29- Zare, H.K. and Doering, J.C., 2011. Forced hydraulic jumps below abrupt expansions. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(8), pp.825-835. Doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000369.