

Research Paper

Exploring the Influence of Divergence and Convergence Angles on Hydraulic Jump Characteristics in Divergent-Convergent Transformations: A Laboratory Study

Mohammad Hosein Jafari Abnavi¹, Reza Mohammadpour^{2*}, Mohammad Karim Beirami³

1. PhD Student, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Estahban branch, Iran

2*. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Estahban branch, Iran

3. Associate Professor, Isfahan University of Technology, Iran

Received: 2019/02/20

Revised: 2019/04/04

Accepted: 2020/09/21

Use your device to scan and read the article online



DOI:

10.30495/wej.2021.20612.2126

Keywords:

Divergent basin, hydraulic jump, divergent-convergent transformations, Second depth

Abstract

Introduction: Hydraulic jumps are used as one of the key factors for energy dissipation in the downstream of hydraulic structures such as gates and spillways. This research focuses on studying hydraulic jumps in divergent-convergent basins while considering the influence of the divergence angle.

Methods: All experiments were conducted in a channel with a length of 11, depth of 0.7 and width of 0.48 meters using two basin models, which have a divergence and convergence angle of 8 and 6 degrees, respectively, and vice versa.

Findings: The results show that at the maximum flow rate, the ratio of flow depth y_2/y_1 and flow length L_j/y_1 in the first model is 48.6 and 122.9% respectively and in the second model it is 35.5% and 95.8% respectively has decreased compared to the classic basin. On the other hand, the ratio of energy loss in both models has increased by 26.8 and 23.7 percent, respectively, compared to classic basins. The comparison of the results between the two divergent-convergent basins, showed that increasing the ratio of the angle of divergence to convergence $\frac{\theta_1}{\theta_2}$ will increase the performance of the basins.

Citation: Mohammad Hosein Jafari Abnavi, Reza Mohammadpour, Mohammad Karim Beirami. Exploring the Influence of Divergence and Convergence Angles on Hydraulic Jump Characteristics in Divergent-Convergent Transformations: A Laboratory Study. Water Resources Engineering Journal. 2024; 18(64): 49- 62.

***Corresponding author:** Reza Mohammadpour

Address: Dept. of Civil Engineering, Islamic Azad University, Estahban branch, Iran

Tell: +989173134112

Email: Reza564@gmail.com

Extended Abstract

Introduction

Downstream of hydraulic structures, such as valves, overflows, and spillways, the flow velocity is high, and the flow energy is destructive. Therefore, stilling basins are used to control the energy of the flow associated with the hydraulic jump. During a hydraulic jump, the flow transitions from supercritical to subcritical, resulting in the dissipation of flow energy. The design of basins directly influences energy dissipation and the length of the hydraulic jump. Consequently, various geometric models of stilling basins are employed to optimize these factors. One of the most common types of hydraulic jumps is the classic jump that is formed in a rectangular channel with a horizontal bed. The classic hydraulic jump was investigated by Blanger (4) who presented the equations for calculating the secondary depth of the hydraulic jump according to the equation of continuity and the momentum.

Hassanpour et al. (12) 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. Daneshfraz et al. (5) investigated S-type hydraulic jump in stilling basins with sudden divergence and rough bottom. The results showed that the secondary depth and jump length in the rough bed are reduced by 20 and 16%, respectively, and the secondary depth is reduced by 58.5%. In this type of channels, the energy loss for smooth and rough bed increases by 23.5 and 28.7 percent, respectively, compared to the classical jump.

According to the studies, it can be concluded that most of the researches on hydraulic jump are related to divergent basins and some of them are related to convergent basins. The innovation of this research is to investigate the influence of divergence and convergence angles in divergent-convergent transformations (in supercritical flow it reduces divergence and in subcritical flow convergence reduces the

depth) to investigate the characteristics of hydraulic jump in stilling basins. Experiments were performed on two divergent-convergent basins with different angles and their results were compared with each other. At the end, the rate of decrease and increase of hydraulic jump characteristics in this type of basins was checked with classic basins.

Materials and Methods

All experiments were conducted 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 basins. As shown in Figure (1), the length of the expansion and contraction channel was 65-85 cm and 85-65 cm, respectively. Moreover, the channel width was 30 cm and 48 cm at the first of expansion and contraction, respectively.

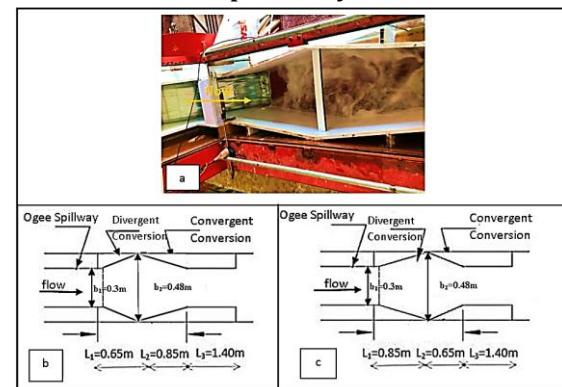


Fig. 1- divergent-convergent channel a) Experimental channel; b) basin model-1; c) basin model-2

Findings

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-convergent basin (model 1) are 5.32 and 18.30, while these values in the divergent-convergent channel (model 2) are 5.83 and 20.83, respectively. On the other hand, the maximum value of ($\Delta E/E_1$) in the model 1 and model 2 are 0.77

and 0.73, respectively. The results show that with increasing the Froude number the flow depth ratio (y_2/y_1) and jump length (L_j/y_1) increase in both basins, but both of these values in the divergent-convergent basin (model 1) are always less than those in the divergent-convergent basin (model 2). For example, for the $Fr_1 = 6.96$, the flow depth ratio in the model 1 is 5.31 and increases to 5.88 in the divergent-convergent basin model 2. Furthermore, for $Fr_1 = 6.96$, the L_j/y_1 is 18.30 and 21.18 in the divergent-convergent (model 1) and model 2, respectively.

Discussion

To evaluate the performance of the divergent-convergent (model 1) and divergent-convergent (model 2) basins, the results were compared to the classic basin. The maximum y_2/y_1 and L_j/y_1 in the divergent-convergent model 1 basin decrease by 48.6% and 122.9%, respectively, compared to the classical basin, while for the divergent-convergent basin model 2 the reduction is 35.5% and it is 95.7%. Furthermore, the energy loss ratio ($\Delta E/E_1$) in model 1 and model 2 has increased by 26.89% and 23.79%, respectively. The results indicate that the performance of divergent-convergent basins (model 1) is much better than divergent-convergent (model 2) and classic basins.

Table 1-The hydraulic jump characteristics

Q (l/s)	Model 1				Model 2			
	Fr1	($\Delta E/E_1$)	(y_2/y_1)	(L_j/y_1)	Fr1	($\Delta E/E_1$)	(y_2/y_1)	(L_j/y_1)
66.10	6.90	0.77	5.32	18.30	6.68	0.73	5.83	20.83
58.00	6.85	0.77	5.31	18.48	6.05	0.71	5.32	18.09
56.00	7.07	0.78	5.31	19.32	6.24	0.72	5.44	19.11
54.50	7.25	0.79	5.38	17.50	6.50	0.73	5.58	19.53
53.50	7.39	0.79	5.38	16.67	6.61	0.75	5.48	19.05
49.50	7.55	0.80	5.62	17.81	6.58	0.74	5.50	18.75
45.00	8.36	0.82	6.15	18.75	6.46	0.74	5.39	18.95
41.00	8.19	0.81	6.03	19.67	6.96	0.75	5.88	21.18
40.00	8.61	0.81	6.20	18.97	7.43	0.76	6.41	21.88
38.00	8.49	0.81	6.07	19.43	7.40	0.76	6.45	21.61
32.00	8.12	0.80	6.15	21.15	6.89	0.74	6.03	20.69
29.50	9.00	0.82	6.73	21.74	7.94	0.78	6.80	24.00
25.50	10.30	0.84	7.70	26.32	8.31	0.78	7.55	25.91
23.50	10.30	0.84	7.80	27.78	8.84	0.79	8.00	28.50

Conclusion

Hydraulic jumps serve as a fundamental element for energy dissipation downstream of hydraulic structures such as spillways. In this research, the effect of divergence and convergence angle on the characteristics of hydraulic jump in divergent-convergent stilling basins has been investigated and the results were compared with each other. Experiments were conducted in a channel

with a length of 11 meters, a width of 0.48 meters and a depth of 0.7 meters. In order to investigate the effect of divergence and convergence angle on hydraulic jump characteristics, from two types of basins with divergence and convergence angle $\theta_1 = 8^\circ$ and $\theta_2 = 6^\circ$ respectively (model 1 and $\frac{\theta_1}{\theta_2} = 1.33$) and $\theta_1 = 6^\circ$ and $\theta_2 = 8^\circ$ respectively (Model 2 and $\frac{\theta_1}{\theta_2} = 0.75$) has

been used. The results show that at the maximum flow rate, the flow depth ratio (y_2/y_1) and the flow length ratio (L_j/y_1) in model 1 are equal to 5.32 and 18.30 respectively and in model 2 equal to 5.83 and 20.83. On the other hand, the ratio of energy loss in models 1 and 2 is equal to 0.77 and 0.73, respectively. Comparing the results obtained with classic basins shows that the ratio of flow depth (y_2/y_1) and flow length (L_j/y_1) in model 1 is 48.6% and 122.9% respectively, and in model 2 it is 35.5 and 95.8 percent have decreased. Also, the energy loss ratio ($\Delta E/E_1$) in models 1 and 2 has increased by 26.8 and 23.7 percent, respectively, compared to classic basins. Considering that the ratio of flow depth and jump length in the divergent-convergent ponds of models 1 and 2 compared to classical ponds is significantly reduced and the energy loss is increased, it can be concluded that this type of basins reduces the dimensions and also increases the performance of the stilling basin. On the other hand, increasing the ratio of divergence to convergence angle $\frac{\theta_1}{\theta_2}$ will increase the performance of diverging-converging basins.

Ethical Considerations compliance with ethical guidelines

The cooperation of the participants in the present study was voluntary and accompanied by their consent.

Funding

No funding.

Authors' contributions

Design and conceptualization: Reza Mohammadpour; Mohammad Karim Beirami.

Methodology and data analysis: Mohammad Hosein Jafari Abnavi; Reza Mohammadpour.

Supervision and final writing: Mohammad Hosein Jafari Abnavi; Mohammad Karim Beirami.

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

مقاله پژوهشی

بررسی آزمایشگاهی تاثیر زاویه واگرایی و همگرایی بر خصوصیات پرش هیدرولیکی در تبدیل‌های واگرا-همگرا

محمد حسین جعفری ابنوی^۱، رضا محمد پور^{۲*}، محمد کریم بیرامی^۳

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

۲. استادیار گروه آب واحد استهبان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان، ایران

۳. دانشیار، بازنشسته دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران

چکیده

مقدمه: پرش هیدرولیکی بعنوان یکی از عوامل مهم جهت استهلاك انرژی جریان در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی نظیر دریچه‌ها و سرریزها مورد استفاده قرار می‌گیرند. نوآوری این تحقیق بررسی پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های واگرا-همگرا با در نظر گرفتن تاثیر زاویه واگرایی می‌باشد.

روش: کلیه آزمایش‌ها در کانالی به طول ۱۱، عمق ۰/۷ و عرض ۰/۴۸ متر با استفاده از دو مدل حوضچه که بترتیب دارای زاویه واگرایی و همگرایی ۸ و ۶ درجه و برعکس انجام شد.

یافته‌ها: یافته‌های پژوهش نشان داد که در حداکثر دبی جریان، نسبت عمق جریان y_2/y_1 و طول جریان L_j/y_1 در مدل نخست به ترتیب به میزان ۴۸/۶ و ۱۲۲/۹ درصد و در مدل بعد به ترتیب به میزان ۳۵/۵ و ۹۵/۸ درصد نسبت به حوضچه کلاسیک کاهش داشته است. از طرفی نسبت افت انرژی در هر دو مدل به ترتیب به میزان ۲۶/۸ و ۲۳/۷ درصد نسبت به حوضچه‌های کلاسیک افزایش یافته است.

نتیجه‌گیری: مقایسه نتایج بین دو حوضچه واگرا-همگرا نشان داد که افزایش نسبت زاویه واگرایی به همگرایی موجب افزایش عملکرد خصوصیات حوضچه‌ها خواهد شد.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۰۱

تاریخ داوری: ۱۳۹۸/۰۱/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۳۱

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



DOI:

10.30495/wej.2021.20612.2126

واژه‌های کلیدی:

حوضچه واگرا، پرش هیدرولیکی، تبدیل‌های واگرا-همگرا، عمق ثانویه پرش

* نویسنده مسئول: رضا محمدپور

نشانی: استادیار گروه آب واحد استهبان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان، ایران.

تلفن: ۰۹۱۷۳۱۳۴۱۱۲

پست الکترونیکی: reza564@gmail.com

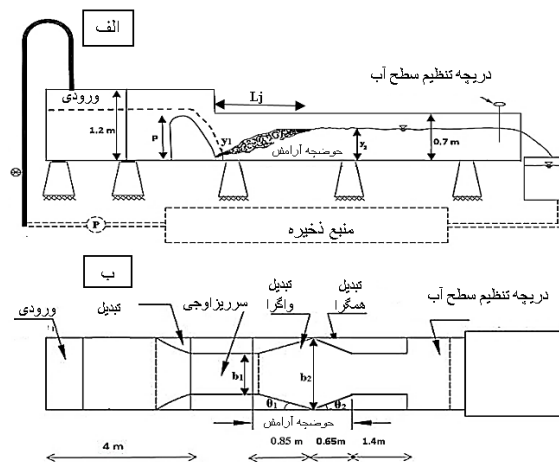
مقدمه

در انتهای سازه‌های هیدرولیکی مانند دریچه‌ها، سرریزها، تندآب‌ها و غیره سرعت جریان بالا بوده و انرژی جریان مخرب می‌باشد. بنابراین برای کنترل انرژی جریان که عموماً با پرش هیدرولیکی همراه است از حوضچه‌های آرامش استفاده می‌شود. در پرش هیدرولیکی جریان از حالت فوق بحرانی به زیربحرانی تبدیل و انرژی جریان مستهلک می‌گردد. طراحی حوضچه‌ها تاثیر مستقیم بر روی افت انرژی و طول پرش هیدرولیکی دارد، از این رو حوضچه‌های آرامش با مدل‌های هندسی متفاوت مورد استفاده می‌شود.

یکی از معمول‌ترین نوع پرش‌های هیدرولیکی پرش نوع کلاسیک است که در کانال مستطیلی با بستر افقی شکل می‌گیرد. پرش هیدرولیک کلاسیک توسط بلانگر (۴) مورد بررسی قرار گرفت که با توجه به معادله پیوستگی و اندازه حرکت رابطه‌ای برای محاسبه عمق ثانویه پرش هیدرولیکی ارائه کرد. در چند دهه اخیر، پرش هیدرولیکی در کانال‌های مستطیلی با مقاطع واگرایی تدریجی و ناگهانی از جمله مواردی بوده که مورد علاقه محققین واقع شده است. نیسی و همکاران (۱۴) مطالعاتی بر روی پرش در حوضچه‌های آرامش واگرایی ناگهانی با بستر زبر و نسبت بازشدگی ۰/۳۳ داشتند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که در چنین مقطعی و در محدوده عدد فرود بین ۲ تا ۱۰ عمق ثانویه پرش نسبت به پرش کلاسیک ۵۳ درصد کاهش و افت انرژی ۲۵ درصد افزایش داشته است. ورکی و همکاران (۱۶) مطالعاتی پیرامون پرش هیدرولیکی در کانال‌های واگرا تدریجی با شیب معکوس بصورت تحلیلی و آزمایشگاهی انجام دادند. آنها روابطی را برای خصوصیات پرش بر اساس پارامترهای شیب کف کانال، زاویه واگرایی و عدد فرود اولیه ارائه کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش توام درجه واگرایی و شیب کف، عمق ثانویه و طول پرش کاهش و افت انرژی افزایش می‌یابد. دانشفراز و همکاران (۵) خصوصیات پرش هیدرولیکی در همگرایی و واگرایی را بصورت آزمایشگاهی بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که در کانال‌های همگرا مقدار عمق ثانویه و طول پرش به ترتیب ۱/۸ و ۲/۵ سانتیمتر افزایش و افت انرژی حدود ۸/۷۴ درصد کاهش داشته است. حسن‌پور و همکاران (۱۲) پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش واگرا با کف زبر را مورد بررسی قرار دادند. این محققین رابطه‌هایی برای اعماق مزدوج، طول و افت انرژی پرش ارائه کردند. این روابط دارای متغیرهایی از جمله عدد فرود اولیه، نسبت واگرایی و زبری کف کانال می‌باشد. نتایج حاصله نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود اولیه عمق ثانویه افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش زبری، عمق ثانویه و طول پرش کاهش می‌یابد. اشکو و همکاران (۱۰) تاثیر بلوک‌های زاویه دار را بر خصوصیات پرش در کانال واگرایی تدریجی با شیب معکوس را بررسی کردند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که بلوک‌ها، نسبت اعماق متوالی و طول پرش را به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. مقایسه دو چیدمان بلوک‌ها نشان داد که استفاده از بلوک‌های بافل در چیدمان همگرا خصوصیات پرش هیدرولیکی را بهبود می‌بخشد و همچنین موثرترین زاویه همگرایی ۳۰ درجه است که نسبت طول و عمق پرش را به ترتیب ۳۵ و ۱۶ درجه کاهش می‌دهد. دانشفراز و همکاران (۶) پرش هیدرولیکی را در

حوضچه‌های آرامش با واگرایی ناگهانی و کف زبر مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که عمق ثانویه و طول پرش در بستر زبر نسبت به بستر صاف به ترتیب ۲۰ و ۱۶ درصد کاهش یافته و همچنین عمق ثانویه به میزان ۵۸/۵ درصد کاهش می‌یابد. در این نوع کانال‌ها افت انرژی برای بستر صاف و زبر به ترتیب ۲۳/۵ و ۲۸/۷ درصد نسبت به پرش کلاسیک افزایش می‌یابد. ترکمن زاد و همکاران (۱۵) خصوصیات پرش هیدرولیکی را در حوضچه آرامش نامتقارن با واگرایی ناگهانی و بستر زبر مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که عمق ثانویه و طول پرش در اینگونه حوضچه‌ها در مقایسه با حوضچه‌های متقارن با بستر افقی کاهش می‌یابد همچنین زبری بستر نقش تعیین کننده‌ای در محل وقوع پرش دارد. از طرفی افت انرژی پرش در حوضچه‌های واگرایی ناگهانی با بستر زبر نسبت به پرش هیدرولیک کلاسیک کارآمدتر بوده است. دزفولی و همکاران (۲) تاثیر زبری بر خصوصیات پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های واگرایی ناگهانی را بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که زبری‌ها موجب کاهش طول پرش به میزان ۱۲ درصد می‌گردد و همچنین طول حوضچه مشابه با حوضچه USBR-II می‌باشد. از طرفی زبری‌ها باعث کاهش طول غلتاب به میزان ۲۰ درصد خواهد شد. دانشفراز و نجیبی (۷) استهلاک انرژی جریان فوق بحرانی در تنگ شدگی ناگهانی به همراه زبری دیواره را بررسی کردند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که با افزایش عدد فرود بالادست، افت انرژی نسبی افزایش می‌یابد. آنها نشان دادند که با افزایش زبری، میزان افت انرژی نسبی به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. حاجی عزیزی و همکاران (۱) ساختار تلاطم پرش هیدرولیکی مستغرق در کانال واگرایی تدریجی با بستر زبر را بررسی کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که با افزایش ارتفاع اجزای زبر، نرخ رشد لایه مرزی افزایش یافته که این خود باعث افزایش تنش برشی و در نهایت افزایش افت انرژی می‌شود. قادری و همکاران (۱۱) خصوصیات پرش هیدرولیکی آزاد و مستغرق را در زبری‌های مختلف بررسی کردند. نتایج نشان داد که مدل عددی به خوبی قادر به شبیه سازی ویژگی‌های پرش آزاد و غوطه ور است. زبری مثلی نسبت به سایر اشکال بیشترین تاثیر را بر طول پرش دارد و بیشترین تنش برشی و افت انرژی در هر دو پرش در زبری مثلی رخ می‌دهد. دانشفراز و همکاران (۸) پرش هیدرولیکی در کانال واگرایی ناگهانی زبر را بررسی کردند. نتایج نشان داد که تنش برشی در بستر ناهموار یک کانال واگرایی ناگهانی بیش از ۱۲ برابر بیشتر از یک کانال منشوری صاف است. همچنین عمق ثانویه و طول پرش S در بستر ناهموار نسبت به بستر صاف به ترتیب ۲۲٪ و ۹-۱۳٪ کاهش یافت. زینی وند و همکاران (۳) مقایسه آزمایشگاهی تاثیر زبری مصنوعی و شیب معکوس بستر در کنترل پرش هیدرولیکی را بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که نوع زبری در افزایش میزان افت انرژی پرش هیدرولیکی موثر می‌باشد. تاثیر همزمان اعمال زبری بستر و ایجاد شیب معکوس می‌تواند میزان افت انرژی در پدیده پرش هیدرولیکی را افزایش دهد. حمیدی‌نژاد و همکاران (۱۳) خصوصیات پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های واگرایی ناگهانی با پله منفی را بررسی کردند. محدوده عدد فرود انتخابی آنها بین ۴/۵-۹ بود. نتایج نشان داد که پرش‌های S نامتقارن بوده و انبساط

واگرا-همگرا به گونه‌ای طراحی شد که واگرایی در ابتدا و همگرایی پس از آن قرار گیرد.



شکل ۱- حوضچه آرامش با تبدیل واگرا-همگرا در انتهای سرریز اوجی (الف) مقطع طولی، (ب) پلان

در این تحقیق، برای بررسی عملکرد حوضچه آرامش، آزمایش‌ها بر روی دو نوع حوضچه واگرا-همگرا انجام شد. مشخصات هر دو حوضچه در جدول ۱ و شکل ۲ نشان داده شده است. شکل ۲-الف تبدیل واگرا-همگرا را در کانال آزمایشگاهی نشان می‌دهد. در شکل ۲-ب جزئیات تبدیل واگرا-همگرا (مدل ۱) نشان داده شده است. در این تبدیل جریان ابتدا وارد یک تبدیل واگرا و سپس همگرا خواهد شد. طول تبدیل‌های واگرا و همگرا به ترتیب $L_1 = 65 \text{ cm}$ و $L_2 = 85 \text{ cm}$ 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 cm خواهد رسید. در این مدل زاویه واگرایی و همگرایی به ترتیب $\theta_1 = 8^\circ$ و $\theta_2 = 6^\circ$ و نسبت زاویه واگرایی به همگرایی برابر با $\frac{\theta_1}{\theta_2} = 1.33$ می‌باشد. در شکل ۲-ج نیز تبدیل واگرا-همگرا (مدل ۲) نشان داده شده است. این مدل برعکس مدل قبل بوده بدین صورت که طول تبدیل‌های واگرا و همگرا به ترتیب $L_1 = 85 \text{ cm}$ و $L_2 = 65 \text{ cm}$ و مقدار زاویه واگرایی و همگرایی به ترتیب $\theta_1 = 6^\circ$ و $\theta_2 = 8^\circ$ درجه و نسبت زاویه واگرایی به همگرایی برابر با $\frac{\theta_1}{\theta_2} = 0.75$ می‌باشد. با توجه به محدودیت‌های کانال آزمایشگاهی و همچنین مطالعات پیشین که معمولاً با زوایای بیش از چهار درجه انجام گرفته (۱۶)، در این تحقیق از دو زاویه شش و هشت درجه استفاده شده است.

ناگهانی باعث افزایش طول پرش و اتلاف انرژی و همچنین کاهش عمق ثانویه می‌شود. آنها نشان دادند که با استفاده از پله منفی، پرش هیدرولیک به شکل متقارن تغییر می‌یابد. همچنین، طول پرش هیدرولیک در مقایسه با کانالها با انبساط ناگهانی و بدون پله، به طور قابل توجهی کاهش داشته و همچنین عمق ثانویه پرش افزایش و افت انرژی کاهش یافته است. دانشفراز و همکاران (۹) خصوصیات پرش هیدرولیکی و افت انرژی در پایین دست سرریزهای پلکانی با پله‌های ناهموار را بررسی کردند. نتایج نشان داد که سرریزهای پلکانی با پله‌های ناهموار نسبت به پله‌های صاف افت انرژی را در حدود ۲۰/۹۷ درصد افزایش می‌دهند.

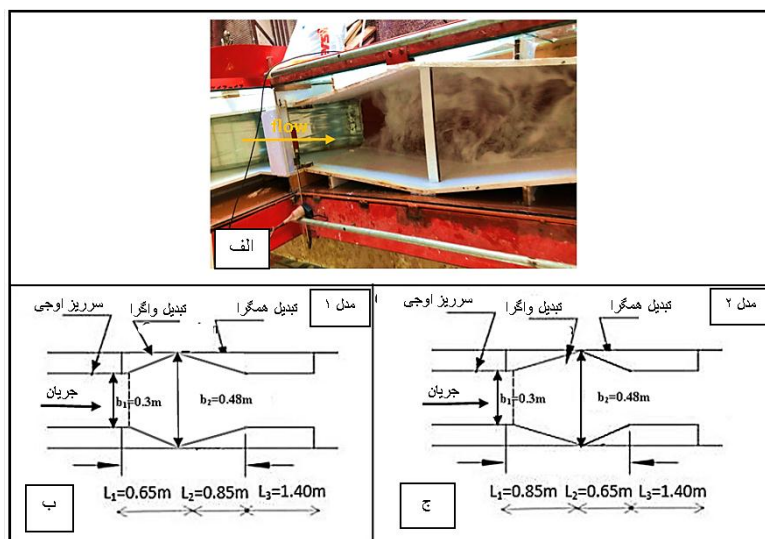
با توجه به مطالعات صورت گرفته می‌توان نتیجه گرفت که اکثر تحقیقات انجام شده بر روی پرش هیدرولیکی مربوط به حوضچه‌های واگرا و تعدادی از آنها مربوط به حوضچه‌های همگرا بوده است. نوآوری این تحقیق بررسی تاثیر زوایای واگرایی و همگرایی در تبدیل‌های واگرا-همگرا (در جریان زیربحرانی و فوق بحرانی تبدیل واگرا و همگرا به ترتیب عمق جریان را کاهش می‌دهد (۴) جهت بررسی خصوصیات پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش به منظور کاهش هزینه و ایجاد حوضچه اقتصادی است. آزمایش‌ها بر روی دو حوضچه واگرا-همگرا با زاویه‌های مختلف انجام شده و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه شده است. در انتها میزان کاهش و افزایش خصوصیات پرش هیدرولیکی در این نوع حوضچه‌ها با حوضچه‌های کلاسیک بررسی شد.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در فلوم مستطیلی واقع در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه آزاد اسلامی-واحد استهبان انجام گرفت. کانال آزمایشگاهی دارای طول ۱۱ متر، عرض ۰/۴۸ متر و ارتفاع ۰/۷ متر می‌باشد. مقطع طولی کانال در شکل ۱-الف نشان داده شده است. برای تشکیل پرش هیدرولیکی از یک سرریز اوجی شکل استاندارد با ارتفاع $p = 0.8$ متر و عرض $L = 0.3$ متر استفاده شد و تبدیل‌های مورد نظر بلافاصله بعد از سرریز نصب شدند. برای کنترل موقعیت و تشکیل پرش هیدرولیکی از یک دریچه در انتهای کانال استفاده شد. لازم به توضیح است که با تنظیم عمق جریان شرایط آزمایش‌ها به گونه‌ای تنظیم شد که شروع پرش هیدرولیکی در انتهای سرریز و ابتدای حوضچه آرامش تشکیل شود. با شروع آزمایش‌ها در ابتدا اعماق جریان برداشت شد برای برداشت اعماق جریان از عمق سنج (Point Gage) با دقت ۰/۱ میلی‌متر استفاده شد به این صورت که در سه نقطه از عرض کانال عمق جریان 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 نقطه‌ای روی سطح آب، بلافاصله پس از آخرین موج غلطان (L_j) اندازه گیری شد (۴). طول پرش هیدرولیکی توسط یک خط کش فلزی که در دیواره کانال نصب شده بود با دقت مناسب اندازه گیری شد. پلان حوضچه آرامش با تبدیل واگرا-همگرا و همچنین سرریز اوجی در شکل ۱-ب نشان داده شده است. حوضچه‌های آرامش

جدول ۱- خصوصیات حوضچه‌های آزمایشگاهی

نوع حوضچه آرامش	عرض ابتدایی $b_1(m)$	عرض ثانویه $b_2(m)$	طول واگرایی $L_1 (m)$	طول همگرایی $L_2 (m)$	θ_1 زاویه واگرایی (Deg.)	زاویه همگرایی θ_2 (Deg.)
واگرا-همگرا-مدل ۱	0.3	0.48	0.65	0.85	8.0	6.0
واگرا-همگرا-مدل ۲	۰,۳	0.48	0.85	0.65	6.0	8.0



شکل ۲- تبدیل واگرا-همگرا (الف) کانال آزمایشگاهی (ب) با زاویه واگرایی ۸ درجه (ج) تبدیل با زاویه واگرایی ۶ درجه

تحلیل ابعادی

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

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

در این رابطه ρ جرم حجمی سیال، μ گرانشی 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 می‌باشد. با توجه به اینکه عمق آب روی سرریز بیشتر از ۵ سانتیمتر بوده اثر کشش سطحی بروی مشخصات هیدرولیکی پرش تاثیری ندارد. با استفاده از نظریه باکینگهام پارامترهای بی بعد بصورت زیر انتخاب شد.

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

که در این رابطه Fr_1 و Re به ترتیب عدد فرود و رینولدز قبل از پرش می‌باشد. با توجه به اینکه در این تحقیق مقادیر عدد رینولدز بین

۹۱۳۰۰ تا ۲۵۶۹۰۰ بوده بنابراین جریان کاملاً آشفته می‌باشد و می‌توان از تاثیر عدد رینولدز چشم پوشی کرد. با توجه به اینکه نسبت $\frac{b_1}{b_2}$ در کلیه آزمایش‌ها ثابت می‌باشد بنابراین، این نسبت را می‌توان از رابطه فوق حذف کرد. در نتیجه می‌توان رابطه نهایی بی بعد را برای نسبت عمق مزدوج، طول و افت انرژی پرش بصورت زیر خلاصه کرد:

$$\frac{y_2}{y_1} = f(Fr_1, \frac{b_1}{y_1}, \frac{\theta_1}{\theta_2}) \quad (3)$$

$$\frac{L_j}{y_1} = f(Fr_1, \frac{b_1}{y_1}, \frac{\theta_1}{\theta_2}) \quad (4)$$

$$\frac{\Delta E}{E_1} = f(Fr_1, \frac{b_1}{y_1}, \frac{\theta_1}{\theta_2}) \quad (5)$$

محدوده پارامترهای برداشت شده در آزمایشگاه در جدول ۲ نشان داده شده است. پارامترهای عمق اولیه پرش هیدرولیکی (y_1)، عمق ثانویه پرش هیدرولیکی (y_2) و طول پرش هیدرولیکی (L_j) برداشت شد. لازم به توضیح است که با جمع آوری این مقادیر میزان سرعت جریان در ابتدا و انتها با استفاده از رابطه پیوستگی بدست آمده و سپس عدد فرود و پارامترها هیدرولیکی پرش محاسبه شد.

جدول ۲- محدوده پارامترهای آزمایشگاهی

Variables	Q (l/s)	Fr ₁	y ₁ (cm)	y ₂ (cm)	V ₁ (m/s)
Range of parameters	23.5-66.1	6.05-10.5	1.8-5	14.2-30	3.6-4.7

نتایج

نسبت عمق جریان و طول پرش در حوضچه واگرا-همگرا مدل ۱ برابر ۵/۳۲ و ۱۸/۳۰ و مدل ۲ بترتیب برابر با ۵/۸۳ و ۲۰/۸۳ بوده است. که نشان دهنده کاهش این پارامترها در مدل ۱ نسبت به مدل ۲ می باشد. از طرفی مقدار $(\Delta E/E1)$ برای حداکثر دبی، در حوضچه واگرا-همگرا مدل ۱ برابر ۰/۷۷ و در مدل ۲ برابر ۰/۷۳ بوده است که نشان دهنده افزایش افت در مدل ۱ می باشد.

جدول ۳ نتایج بدست آمده برای هر دو حوضچه واگرا-همگرا مدل ۱ و مدل ۲ را نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که با کاهش دبی، مقادیر عمق جریان و همچنین طول پرش هیدرولیکی در هر دو حوضچه کاهش می یابد.

جدول ۴ مقادیر پارامترهای جریان از جمله نسبت عمق جریان (y_2/y_1) ، نسبت افت انرژی $(\Delta E/E1)$ و همچنین نسبت طول پرش هیدرولیکی (L_j/y_1) را نشان می دهد. همانگونه که در این جدول نشان داده شده است در حداکثر دبی ($Q = 66.1 \text{ lit/s}$)،

جدول ۳- مقادیر برداشت شده برای حوضچه های واگرا- همگرا

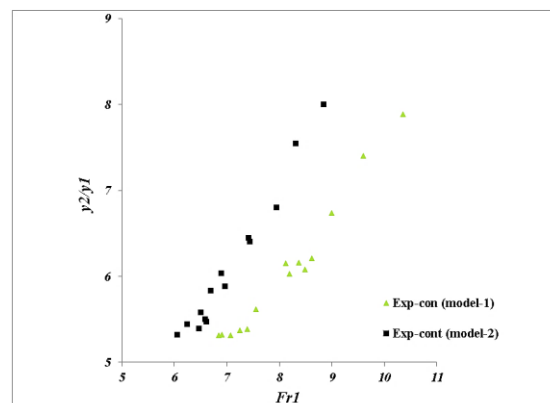
NO	Q (L/s)	Model 1			Model 2		
		y ₁ (m)	y ₂ (m)	L _j (m)	y ₁ (m)	y ₂ (m)	L _j (m)
1	66.1	0.047	0.250	0.860	0.048	0.280	1.000
2	58.0	0.043	0.230	0.800	0.047	0.250	0.850
3	56.0	0.041	0.220	0.800	0.045	0.245	0.860
4	54.5	0.040	0.215	0.700	0.043	0.240	0.840
5	53.5	0.039	0.210	0.650	0.042	0.230	0.800
6	49.5	0.037	0.205	0.650	0.040	0.220	0.750
7	45.0	0.032	0.197	0.600	0.038	0.205	0.720
8	41.0	0.031	0.184	0.600	0.034	0.200	0.720
9	40.0	0.029	0.180	0.550	0.032	0.205	0.700
10	38.0	0.028	0.172	0.550	0.031	0.200	0.670
11	32.0	0.026	0.160	0.550	0.029	0.175	0.600
12	29.5	0.023	0.155	0.500	0.025	0.170	0.600
13	25.5	0.020	0.148	0.500	0.022	0.166	0.570
14	23.5	0.018	0.142	0.500	0.020	0.160	0.570

جدول ۴- پارامترهای مربوط به جریان در حوضچه‌های واگرا-همگرا

Q (l/s)	Model 1				Model 2			
	Fr1	($\Delta E/E1$)	($y2/y1$)	($Lj/y1$)	Fr1	($\Delta E/E1$)	($y2/y1$)	($Lj/y1$)
66.10	6.90	0.77	5.32	18.30	6.68	0.73	5.83	20.83
58.00	6.85	0.77	5.31	18.48	6.05	0.71	5.32	18.09
56.00	7.07	0.78	5.31	19.32	6.24	0.72	5.44	19.11
54.50	7.25	0.79	5.38	17.50	6.50	0.73	5.58	19.53
53.50	7.39	0.79	5.38	16.67	6.61	0.75	5.48	19.05
49.50	7.55	0.80	5.62	17.81	6.58	0.74	5.50	18.75
45.00	8.36	0.82	6.15	18.75	6.46	0.74	5.39	18.95
41.00	8.19	0.81	6.03	19.67	6.96	0.75	5.88	21.18
40.00	8.61	0.81	6.20	18.97	7.43	0.76	6.41	21.88
38.00	8.49	0.81	6.07	19.43	7.40	0.76	6.45	21.61
32.00	8.12	0.80	6.15	21.15	6.89	0.74	6.03	20.69
29.50	9.00	0.82	6.73	21.74	7.94	0.78	6.80	24.00
25.50	10.30	0.84	7.70	26.32	8.31	0.78	7.55	25.91
23.50	10.30	0.84	7.80	27.78	8.84	0.79	8.00	28.50

در شکل ۴ تغییرات نسبت طول پرش ($Lj/y1$) بر حسب عدد فرود 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 حوضچه‌های واگرا-همگرا مدل ۱ از حوضچه‌های واگرا-همگرا مدل ۲ کمتر می‌باشد. بطور مثال برای عدد فرود $Fr1 = 6.96$ این مقدار در مدل ۱ برابر $18/45$ و در مدل ۲ برابر $21/18$ می‌باشد. همانگونه که در جدول ۴ نشان داده شده است، در حداکثر دبی، مقدار نسبی طول پرش ($Lj/y1$) در مدل ۱ برابر $18/30$ و در مدل ۲ برابر $20/83$ می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که طول پرش در حوضچه واگرا-همگرا مدل ۱ نسبت به حوضچه واگرا-همگرا مدل ۲ کاهش یافته است. با توجه به اینکه میزان افت انرژی یکی از پارامترهای مهم در طراحی حوضچه‌های آرامش می‌باشد لذا در شکل ۵ تغییرات افت انرژی نسبت به عدد فرود نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود نسبت افت انرژی در هر دو حوضچه افزایش می‌یابد اما این مقدار در حوضچه‌های واگرا-همگرا مدل ۱ نسبت به حوضچه‌های واگرا-همگرا مدل ۲ بیشتر است. نتایج ارائه شده در جدول ۴ نشان می‌دهد که در حداکثر دبی، میزان افت انرژی ($\Delta E/E1$) در حوضچه واگرا-همگرا مدل ۱ برابر $0/77$ و در حوضچه مدل ۲ برابر $0/73$ بوده که نشان دهنده افزایش افت در مدل ۱ می‌باشد.

در شکل ۳ 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 مدل افزایش می‌یابد. همچنین در تمامی مقادیر عدد فرود، نسبت عمق در حوضچه واگرا-همگرا مدل ۱ کمتر از حوضچه واگرا-همگرا مدل ۲ می‌باشد. بطور مثال برای عدد فرود $Fr1 = 6.96$ این مقدار در مدل ۱ برابر $5/31$ و در مدل ۲ برابر $5/88$ می‌باشد. نتایج حاصله نشان دهنده کاهش نسبت عمق در حوضچه واگرا-همگرا مدل ۱ می‌باشد.



شکل ۳- تغییرات نسبت عمق جریان بر حسب عدد فرود

بعبارت دیگر برای یک عدد فرود ثابت بیشترین مقدار (y_2/y_1) مربوط به پرش هیدرولیک کلاسیک و کمترین آن بترتیب متعلق به حوضچه آرامش واگرا-همگرا مدل ۱ و مدل ۲ می‌باشد می‌توان نتیجه گرفت که حوضچه‌های واگرا-همگرا بهترین تبدیل برای پرش هیدرولیکی با حداقل عمق ثانویه می‌باشد. در انتهای این تحقیق مقایسه میزان در صد کاهش یا افزایش پارامترهای پرش نسبت به حوضچه کلاسیک (مولفه‌های پرش کلاسیک با استفاده از رابطه بلانگر و معادله انرژی محاسبه شده است) در جدول ۵ ارائه شده است. در این جدول مقادیر مثبت و منفی به ترتیب نشان دهنده میزان افزایش و کاهش می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که در حداکثر دبی، مقادیر (y_2/y_1) و (L_j/y_1) در حوضچه واگرا-همگرا مدل ۱ به ترتیب به میزان ۴۸/۶ و ۱۲۲/۹ و در مدل ۲ به ترتیب به میزان ۳۵/۵ و ۹۵/۸ درصد نسبت به حوضچه کلاسیک کاهش داشته‌اند. از طرفی مقدار افت انرژی در مدل ۱ و ۲ به ترتیب ۲۶/۸ و ۲۳/۷ درصد نسبت به حوضچه‌های کلاسیک افزایش یافته است.

برای محاسبه عمق ثانویه پرش با استفاده از روش تحلیلی می‌توان رابطه زیر را نوشت:

$$F_4 = \frac{1}{2} \gamma b_4 y_4^2 \quad (6)$$

$$y_4 = \sqrt{\frac{F_4}{0.5 \gamma b_4}} \quad (7)$$

با توجه به معادله اندازه حرکت رابطه زیر را می‌توان معرفی نمود.

$$\sum F = \rho Q^2 \left(\frac{1}{A_4} - \frac{1}{A_1} \right) \quad (8)$$

$$F_1 - F_2 - F_3 - F_4 = \rho Q^2 \left(\frac{1}{A_4} - \frac{1}{A_1} \right) \quad (9)$$

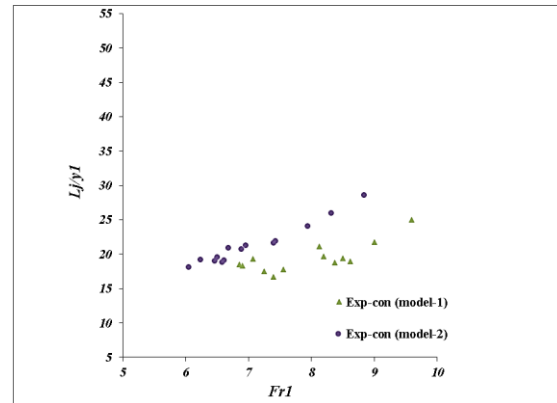
$$F_4 = F_1 - F_2 - F_3 - \rho Q^2 \left(\frac{1}{A_4} - \frac{1}{A_1} \right) \quad (10)$$

که نیروی مومنتوم قبل از حوضچه، F_2 نیروی وارده از دیوار واگرا، F_3 نیروی وارده از دیوار همگرا است که می‌توان بصورت زیر نوشت.

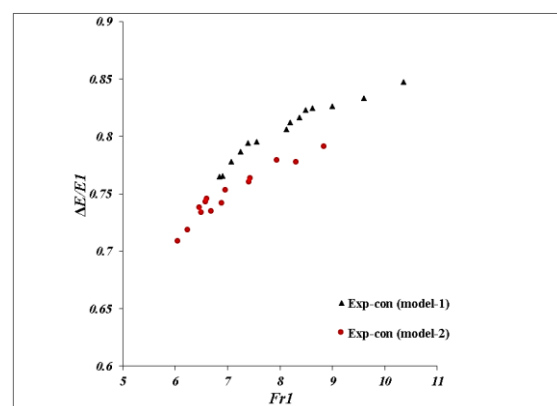
$$F_1 = \frac{1}{2} \gamma b_1 y_1^2 \quad (11)$$

$$F_2 = \frac{1}{2} \gamma \cos \alpha (0.48 + b_1)(y_{2.4} - y_1)^2 \quad (12)$$

$$F_3 = \frac{1}{2} \gamma \cos \beta (0.48 + b_4)(y_4 - y_{2.4})^2 \quad (13)$$

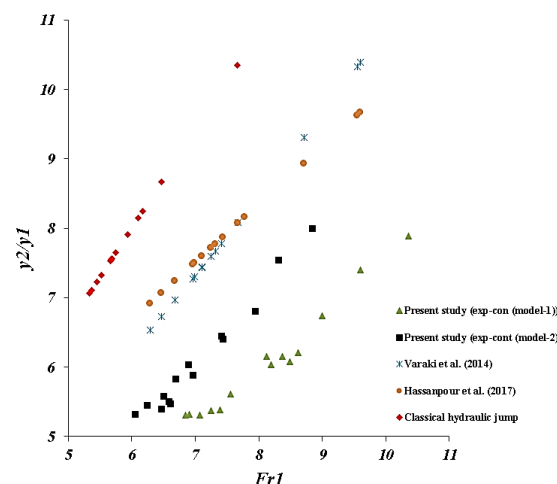


شکل ۴- تغییرات نسبت طول پرش بر حسب عدد فرود



شکل ۵- تغییرات نسبت افت انرژی بر حسب عدد فرود

شکل ۶ مقایسه بین نتایج این تحقیق و محققان پیشین را نشان می‌دهد. با توجه به شکل برای مقادیر مختلف عدد فرود، نسبت عمق جریان (y_2/y_1) در مدل ۱ و ۲ از تمامی مدل‌ها کمتر می‌باشد.



شکل ۶- مقایسه نسبت عمق پرش در تحقیق حاضر و تحقیقات دیگران

که α و β به ترتیب زوایای واگرایی و همگرایی می باشند و $y_{2.4}$ عمق جریان در محل تلاقی دیواره واگرا و همگرا و بخشی از y_4 عمق ثانویه پرش می باشد که بصورت سعی و خطا محاسبه می شود.

$$\sin \alpha = \frac{0.48 - b_1}{2L_1} \quad (14)$$

$$\sin \beta = \frac{0.48 - b_1}{2L_2} \quad (15)$$

جدول ۵- مقایسه عمق ثانویه، طول پرش و افت انرژی در تحقیق حاضر با پرش هیدرولیک کلاسیک

Q (Lit/s)	Variation between divergence-convergence and classic basins (model 1) (%)			Variation between divergence-convergence and classic basins (model 2) (%)		
	y_2/y_1	L_j/y_1	$\Delta E/E1$	y_2/y_1	L_j/y_1	$\Delta E/E1$
66.1	-48.61	-122.90	26.89	-35.51	-95.79	23.79
58.0	-37.88	-100.40	30.54	-37.69	-104.70	24.96
56.0	-41.71	-98.55	30.35	-38.31	-100.70	24.55
54.5	-40.76	-120.50	30.89	-35.55	-97.58	25.86
53.5	-40.14	-130.80	31.68	-37.79	-101.90	27.22
49.5	-25.84	-98.63	34.89	-28.51	-88.65	30.26
45.0	-15.53	-90.18	36.26	-31.84	-88.20	29.49
41.0	-19.84	-85.14	35.18	-22.91	-71.99	30.05
40.0	-31.27	-123.30	30.78	-27.19	-93.64	25.23
38.0	-35.72	-121.30	30.10	-27.86	-99.00	24.35
32.0	-22.68	-81.97	32.64	-25.11	-86.05	26.79
29.5	-13.52	-80.06	33.69	-12.50	-63.10	29.69
25.5	-17.13	-82.85	28.88	-17.13	-76.43	23.78

بحث و نتیجه گیری

برای تنظیم و مهار پرش هیدرولیکی در پایین دست سازه های هیدرولیکی نظیر سرریزها، تندآبها، حوضچه های آرامش با اشکال مختلف مورد استفاده قرار می گیرد. در این تحقیق تاثیر زاویه واگرایی و همگرایی بر خصوصیات پرش هیدرولیکی در حوضچه های آرامش واگرا-همگرا بررسی و نتایج آن با یکدیگر مقایسه شده است. آزمایش ها در کانالی به طول ۱۱ متر، عرض ۰/۴۸ متر و عمق ۰/۷ متر انجام گرفت. جهت بررسی عملکرد زاویه واگرایی و همگرایی بر خصوصیات پرش هیدرولیکی، از دو نوع حوضچه به ترتیب با زاویه واگرایی و همگرایی $\theta_1 = 8^\circ$ و $\theta_2 = 6^\circ$ (مدل ۱ و $\frac{\theta_1}{\theta_2} = 1.33$) و $\theta_1 = 6^\circ$ و $\theta_2 = 8^\circ$ (مدل ۲ و $\frac{\theta_1}{\theta_2} = 0.75$) استفاده شده است. نتایج نشان می دهد که در حداکثر دبی، نسبت عمق جریان (y_2/y_1) و نسبت طول جریان (L_j/y_1) در مدل ۱ به ترتیب برابر ۵/۳۲ و ۱۸/۳۰ و در مدل ۲ به ترتیب برابر با ۵/۸۳ و ۲۰/۸۳ می باشد. از طرفی نسبت افت انرژی در مدل های ۱ و ۲ به ترتیب برابر با ۰/۷۷ و ۰/۷۳ می باشد. مقایسه نتایج بدست آمده با حوضچه های کلاسیک نشان می دهد که نسبت عمق جریان (y_2/y_1) و طول

جریان (L_j/y_1) در مدل ۱ به ترتیب به میزان ۴۸/۶ و ۱۲۲/۹ درصد، و در مدل ۲ به ترتیب به میزان ۳۵/۵ و ۹۵/۸ درصد کاهش داشته است. همچنین نسبت افت انرژی $(\Delta E/E1)$ در مدل های ۱ و ۲ به ترتیب ۲۶/۸ و ۲۳/۷ درصد نسبت به حوضچه های کلاسیک افزایش یافته است. با توجه به به اینکه نسبت عمق جریان و طول پرش در حوضچه های واگرا-همگرا مدل ۱ و ۲ نسبت به حوضچه های کلاسیک به طور چشمگیری کاهش و افت انرژی افزایش یافته است میتوان نتیجه گرفت که این نوع حوضچه ها موجب کاهش ابعاد و همچنین افزایش عملکرد حوضچه های آرامش می گردد. از طرفی افزایش نسبت زاویه واگرایی به همگرایی $(\frac{\theta_1}{\theta_2})$ موجب افزایش عملکرد حوضچه های واگرا-همگرا خواهد شد.

پیشنهادهای

نتایج نشان داد در حوضچه های آرامش واگرا-همگرا نسبت عمق جریان (y_2/y_1) و طول پرش (L_j/y_1) نسبت به حوضچه های کلاسیک کاهش یافته و همچنین نسبت افت انرژی $(\Delta E/E1)$ می

یابد. با توجه به اینکه استفاده از این نوع حوضه ها کاهش طول حوضچه شده فرسایش در پایین دست حوضچه ها نیز کاهش می یابد بنابراین پیشنهاد می شود بجای استفاده از حوضچه های کلاسیک از این نوع حوضچه ها استفاده گردد تا علاوه بر اقتصادی شدن طرح، فرسایش در پایین دست نیز کنترل گردد.

ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

همکاری مشارکت کنندگان در تحقیق حاضر به صورت داوطلبانه و با رضایت آنان بوده است.

حامی مالی

این تحقیق در مرکز تحقیقات آب دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان انجام شده است. نویسندگان این مقاله از مسئولین مربوطه جهت مساعدت و استفاده تجهیزات آزمایشگاهی تشکر و قدردانی می نمایند.

مشارکت نویسندگان

طراحی و ایده پردازی: رضا محمدپور؛ محمد کریم بیرامی
روش شناسی و تحلیل داده ها: محمد حسین جعفری ابنوی؛ رضا محمدپور
نظارت و نگارش نهایی: محمد حسین جعفری ابنوی؛ محمد کریم بیرامی

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

References

- Haji azizi, S., Farsadizadeh d, Abbaspour a, Arvanaghi H. 2022. Experimental study of turbulent structure of submerged hydraulic jump in channel with gradually divergent side walls and rough bed. J Iranian Water Researches Journal." 16(3). [In Persian].
- Noralah Dezfouli MH, kamanbedast aa, Masjedi A, Heidarnejad M, Purmohammadi MH. 2022. "Determine the effect of roughness on hydraulic jump characteristics in divergent stilling basin %J Journal of Marine Science and Technology." 21(1): 81-91.
- Zeinivand, M., Sajadi SM, Haghighi Nejad M, Asghari Pari SA, Shafai Bejestan M. 2023. Laboratory evaluation of artificial roughness and adverse slope effect in control of hydraulic jump. J Water Resources Engineering." 16(57): 19-30.
- Chow. V.T. Open channel hydraulics. McGraw-Hill, New York, 1959.
- Daneshfaraz R, Sadeghi H, Joudi AR, Abraham J. 2017. Experimental investigation of hydraulic jump characteristics in contractions and expansions. Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences. 35(1):87-98.
- Daneshfaraz R, MajediAsl M, Mirzaee R, Ghaderi A. 2020. The S-jump's characteristics in the rough sudden expanding stilling basin. AUT Journal of Civil Engineering. 4(3):349-56.
- Daneshfaraz R, Najibi A. 2021. Experimental investigation of supercritical flow energy dissipation in sudden contraction with wall roughness. Journal of Hydraulics. 16(4):79-92.
- Daneshfaraz R, MajediAsl M, Mirzaee R, Tayfur G. 2021. Hydraulic jump in a rough sudden symmetric expansion channel. AUT Journal of Civil Engineering. 5(2):245-56.
- Daneshfaraz R, Sadeghi H, Ghaderi A, Abraham JP. 2024. Characteristics of hydraulic jump and energy dissipation in the downstream of stepped spillways with rough steps. Flow Measurement and Instrumentation. 96:102506.
- Eshkou Z, Dehghani A, Ahmadi A. 2019. Experimental Investigation of the Characteristics of Hydraulic Jump in a Diverging Stilling Basin with an Adverse Slope Using Baffle Blocks. Jwss. 23 (3) :299-311.
- Ghaderi A, Dasineh M, Aristodemo F, Ghahramanzadeh A. 2020. Characteristics of free and submerged hydraulic jumps over different macroroughnesses. Journal of Hydroinformatics. 22(6):1554-72.
- Hassanpour N, Hosseinzadeh Dalir A, Farsadizadeh D, Gualtieri C. 2017. An experimental study of hydraulic jump in a gradually expanding

- rectangular stilling basin with roughened bed. *Water*. 9(12):945.
13. Hamidinejad AE, Heidarpour M, Ghadampour Z. 2023. Hydraulic Jump Control Using Stilling Basin with Abruptly Expanding and Negative Step. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. 47(6):3885-94.
 14. Neisi K, Shafai Bejestan M, Ghomshi M, Kashefipour S. 2014. Investigation of Hydraulic Jump Characteristics at Roughened Bed of Sudden Expansion Stilling Basin. *Irrigation Sciences and Engineering*. 37(2):83-93.
 15. Torkamanzad N, Hosseinzadeh Dalir A, Salmasi F, Abbaspour A. 2019. Hydraulic jump below abrupt asymmetric expanding stilling basin on rough bed. *Water*. 11(9):1756.
 16. Varaki ME, Kasi A, Farhoudi J, 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):111.