

Numerical Investigation of Step Edge Geometry Effects on Hydrodynamic Flow Behavior in Stepped Spillways Using FLOW-3D

Elham Karimzadeh¹, Mahdi Mollazadeh^{1*}

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Birjand University, Birjand, Iran.

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 24 March 2026

Revised 30 April 2026

Accepted 08 May 2026

Published online 23 September 2026

Keywords:

Stepped spillway

FLOW-3D

RNG model

Energy dissipation

Step edge geometry

ABSTRACT

Objective: This study aims to numerically examine the effect of three different step edge shapes: plain, grated, and circular types, on the complex hydrodynamic characteristics of flow over a ten-step spillway. It also seeks to assess energy dissipation, velocity distribution, and pressure variations for each configuration to determine the most suitable geometry for stable flow conditions.

Methods: Three-dimensional numerical simulations were carried out using FLOW-3D. The Volume of Fluid method along with the RNG $k - \varepsilon$ turbulence model was applied. Simulations were performed at a constant discharge of 0.09 m³/s. The numerical outcomes were compared with reliable experimental data for validation. The comparison showed good agreement, with an average relative error ranging from 5% to 8%.

Results: The meshed-edge spillway creates the highest energy dissipation by reducing the flow velocity by 15 to 20 percent compared to the simple edge. Although the positive pressure on the horizontal face of the meshed-edge steps increased by 16.4% compared to the simple-edge spillway, spillways with simple and circular edges exhibit more stable behavior against negative pressures on the vertical faces of the steps. Therefore, they are safer options for conditions where flow stability and the prevention of structural fatigue or cavitation risk are priorities.

Conclusions: Despite its higher energy dissipation capacity, the grated edge is not recommended because it generates strong fluctuations that increase the likelihood of cavitation and structural damage. The plain edge is suggested as the best practical option due to its acceptable hydraulic performance, flow stability, simpler construction, and lower cost.

*Corresponding author, E-mail: mollazadeh.mahdi@birjand.ac.ir

Cite this article: Karimzadeh, E., & Mollazadeh, M. (2026). Numerical Investigation of Step Edge Geometry Effects on Hydrodynamic Flow Behavior in Stepped Spillways Using FLOW-3D. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 5(3), 187-209. <https://doi.org/10.22034/nawee.2026.579642.1211>



© The Author(s).

Publisher: Gonbad Kavous University.

DOI: <https://doi.org/10.22034/nawee.2026.579642.1211>

Introduction

Stepped spillways are widely used in hydraulic engineering because their stepped geometry can substantially enhance energy dissipation along the spillway chute and consequently reduce the hydraulic load imposed on downstream energy dissipation structures. The hydraulic performance of stepped spillways is strongly influenced by their geometric characteristics, including step height, step length, spillway slope, and step-edge configuration. Previous investigations have demonstrated that modifications to step geometry can alter flow separation, recirculation zones, turbulence generation, pressure distribution, air entrainment, and energy dissipation. In particular, local pressure reductions near step edges may become important from a structural safety perspective because sufficiently low pressures can increase the potential for cavitation. Despite extensive research on stepped spillways, relatively limited attention has been given to the influence of modified step-edge geometries, particularly perforated or grated and circular edges, on the three-dimensional hydraulic characteristics of the flow. Such modifications may enhance energy dissipation by increasing local turbulence and flow resistance; however, enhanced turbulence may simultaneously intensify pressure fluctuations and local negative pressures. Therefore, an appropriate step-edge configuration should provide a balance between energy dissipation and hydraulic and structural stability. The objective of the present study was to numerically investigate the effects of three step-edge configurations, namely plain, grated, and circular edges, on the hydrodynamic behavior of flow over a ten-step spillway. The effects of the different configurations on velocity distribution, pressure characteristics, energy dissipation, and residual flow energy were evaluated. Particular attention was given to the occurrence of negative pressure on the vertical faces of the steps because of its potential relationship with cavitation risk. The ultimate objective was to identify a practically suitable step-edge configuration that provides satisfactory hydraulic performance while maintaining flow stability and structural safety.

Materials and Methods

Three-dimensional numerical simulations were conducted using FLOW-3D. The computational model employed the Volume of Fluid method to capture the air-water free surface and the RNG turbulence model to simulate the turbulent flow field. The FAVOR approach available in FLOW-3D was used to represent the complex geometry of the stepped spillway within a structured computational grid. The spillway consisted of ten steps, with a step height of 0.10 m and a step length of 0.20 m. The overall spillway height was 1.0 m, and the spillway slope was approximately 26.57 degrees. A constant discharge of 0.09 m³/s was considered for the main numerical simulations. The hydraulic regime of the investigated spillway was evaluated using established theoretical and experimental criteria based on the normalized critical flow depth and step geometry. The resulting conditions corresponded to the non-skimming flow regime considered in the present investigation. The numerical model was initially developed for the plain rectangular step-edge configuration and subsequently modified to represent the grated and circular edge configurations. A mesh sensitivity analysis was performed using four computational grid scenarios with different cell sizes and numbers of computational cells. The results indicated that further refinement beyond the selected computational grid did not produce a significant improvement in the numerical predictions. Therefore, a grid with a cell size of approximately 1.05 cm and about 520,000 cells were selected as an appropriate compromise between computational accuracy and computational cost. Different turbulence models were also evaluated. The RNG turbulence model provided better agreement with the experimental data than the alternative two-equation turbulence model and was therefore selected for the subsequent simulations. The numerical model was validated against experimental measurements reported by Felder and Chanson. The comparison was performed for the plain

step-edge configuration at a discharge of $0.09 \text{ m}^3/\text{s}$. Dimensionless velocity distributions were compared at steps 8, 9, and 10 using several statistical performance indicators, including the coefficient of determination, root mean square error, mean absolute error, mean absolute percentage error, and Kling–Gupta efficiency. The obtained results demonstrated satisfactory agreement between the numerical and experimental data, with MAPE values of 8.7%, 7.6%, and 5.9% at steps 8, 9, and 10, respectively. The corresponding KGE values were 0.942, 0.963, and 0.938, confirming the capability of the numerical model to reproduce the principal characteristics of the flow. Following model validation, three step-edge configurations were investigated: a plain rectangular edge representing the reference configuration, a grated edge containing regularly distributed openings, and a circular edge with rounded geometry. All configurations were examined under the same discharge condition to isolate the effect of step-edge geometry. Velocity distributions were extracted at selected cross sections near the downstream end of the spillway and in the downstream region. Pressure distributions were evaluated separately on the horizontal and vertical faces of the steps. Relative energy dissipation and residual energy were also calculated to quantitatively compare the hydraulic performance of the three configurations.

Results and Discussion

The numerical results demonstrated that step-edge geometry has a significant influence on the hydrodynamic characteristics of the flow. Among the three configurations, the grated edge generated the greatest reduction in flow velocity. The enhanced flow resistance and local turbulence associated with the openings in the grated edge promoted greater energy dissipation. On average, the circular and grated configurations reduced the flow velocity by approximately 9% and 17.5%, respectively, compared with the plain-edge configuration. The grated configuration therefore exhibited the most effective velocity reduction and energy dissipation performance. The temporal analysis of velocity at two representative locations showed that the numerical flow field approached a stable condition after approximately 15 s. The grated configuration exhibited stronger temporal fluctuations than the plain and circular configurations, which can be attributed to enhanced local turbulence and flow disturbances generated around the openings. Although these fluctuations contributed to greater energy dissipation, they also indicated a less stable hydraulic environment. The pressure analysis revealed important differences among the three configurations. On the horizontal faces of the steps, positive pressures were observed for all configurations, with no negative pressure detected. The maximum positive pressure generally occurred at approximately two-thirds of the step width. Compared with the plain-edge configuration, the average positive pressure on the horizontal faces increased by approximately 11.9% for the circular configuration and 16.4% for the grated configuration. The increased positive pressure reflects the stronger interaction between the flow and the modified step edges. A different behavior was observed on the vertical faces. Pressure generally decreased toward the step edge, and negative pressures were observed for the grated configuration. This finding is particularly important from the perspective of hydraulic safety because persistent or sufficiently intense negative pressures can increase the potential for cavitation. In contrast, the plain and circular configurations exhibited more stable pressure behavior and were less susceptible to pronounced negative pressures on the vertical step faces. Thus, although the grated edge improved energy dissipation, its hydraulic behavior involved a greater potential for undesirable pressure conditions. The analysis of energy dissipation further confirmed the superior energy-dissipating capability of the modified edge configurations. Both grated and circular edges produced higher energy dissipation than the plain edge because their geometries enhanced flow resistance, turbulence, and recirculation. At the investigated flow condition and a critical-depth-to-step-height ratio of approximately 1.5, the grated and circular configurations increased energy dissipation by approximately 9.9% and

4.3%, respectively, compared with the plain-edge configuration. The grated configuration therefore provided the highest energy dissipation among the tested alternatives. The residual energy results were consistent with the energy-dissipation analysis. Under identical hydraulic conditions, the grated and circular configurations produced lower dimensionless residual energy than the plain configuration. For example, at a critical-depth-to-step-height ratio of approximately 1.17, the dimensionless residual energy for the plain configuration was about 3.12, whereas the corresponding value for the grated configuration was approximately 2.51. This reduction confirms the effectiveness of the grated geometry in transferring a larger proportion of the incoming flow energy into turbulence and other dissipative mechanisms along the stepped chute. However, the results demonstrate that maximum energy dissipation does not necessarily correspond to the most desirable overall hydraulic design. The grated edge produced the highest energy dissipation and the greatest velocity reduction, but it also generated stronger fluctuations and negative pressures on the vertical faces of the steps. These characteristics may increase the potential for cavitation and structural fatigue, particularly under more severe hydraulic conditions. The circular configuration provided an intermediate hydraulic response, with lower velocities and greater energy dissipation than the plain configuration while maintaining more stable pressure behavior than the grated configuration.

Conclusions

The three-dimensional numerical investigation demonstrated that modification of step-edge geometry can substantially influence flow velocity, pressure distribution, energy dissipation, and residual energy in stepped spillways. The validated FLOW-3D model successfully reproduced the experimental velocity distributions, with MAPE values below 9% and KGE values close to unity, supporting its suitability for investigating the tested configurations. The grated step-edge configuration exhibited the highest hydraulic energy-dissipation capacity. At the investigated hydraulic condition, it increased energy dissipation by approximately 9.9% compared with the plain-edge configuration and reduced the average flow velocity by approximately 17.5%. Nevertheless, the grated configuration also generated stronger flow fluctuations and negative pressures on the vertical faces of the steps. Consequently, its higher energy-dissipation efficiency should be considered together with the increased potential for cavitation and structural damage. The circular configuration provided an intermediate performance between the grated and plain configurations. Although it improved energy dissipation and reduced flow velocity relative to the plain edge, its additional hydraulic benefit was relatively limited compared with the increased construction complexity. Considering the combined effects of energy dissipation, velocity reduction, pressure stability, cavitation potential, construction simplicity, and cost, the plain step-edge configuration represents the most practical overall option among the investigated geometries. The results indicate that step-edge modification should therefore be selected according to the specific design priorities of a project rather than solely on the basis of maximum energy dissipation.

Author Contributions

First Author: Writing the original draft of the manuscript, performing software/statistical analyses and validating the results.

Second Author: Supervision, editing, and reviewing the manuscript, Consultation and reviewing the manuscript.

Data Availability Statement

Data supporting the reported results are available on request from the corresponding author.

Ethical Considerations

The authors adhered to all principles of research ethics in conducting and publishing this scientific study, and all authors confirm compliance with ethical standards.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

During the preparation of this work, the authors used the Chat gpt tool to write part of the text. After using this tool, the authors reviewed and edited the content as needed and take full responsibility for the content of the publication.



بررسی عددی تأثیر هندسه لبه پله بر رفتار هیدرودینامیکی جریان در سرریزهای پلکانی با استفاده از FLOW-3D

الهام کریم زاده^۱، مهدی ملازاده^{۱*}

^۱گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	هدف: هدف این پژوهش، بررسی عددی تأثیر سه هندسه مختلف لبه پله ساده، مدور و مشبک بر رفتار هیدرودینامیکی جریان و میزان استهلاک انرژی در یک سرریز پلکانی با ده پله است. به علاوه برای ارزیابی استهلاک انرژی، پروفیل‌های سرعت و نوسانات فشار مرتبط با هر طراحی لبه انجام شده است تا هندسه بهینه برای پایداری جریان شناسایی شود.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۱۲/۲۴	مواد و روش‌ها: از شبیه‌سازی عددی سه بعدی در نرم‌افزار FLOW-3D با استفاده از روش حجم سیال (VOF) و مدل آشفتگی (RNG) $k-\epsilon$ بهره گرفته شد. شبیه‌سازی‌ها برای دبی ۰/۰۹ مترمکعب بر ثانیه انجام و نتایج با داده‌های آزمایشگاهی اعتبارسنجی گردید که میانگین خطای مطلق (MAPE) بین ۵ تا ۸ درصد را نشان داد.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۱۰	نتایج: سرریز لبه‌دار مشبک با کاهش ۱۵ تا ۲۰ درصدی سرعت جریان نسبت به لبه ساده، بیشترین استهلاک انرژی را ایجاد می‌کند. با وجود اینکه میزان فشار مثبت در وجه افقی پله‌های لبه‌دار مشبک نسبت به سرریز پلکانی لبه‌دار ساده ۱۶/۴ درصد افزایش یافته است ولی سرریزهای دارای لبه ساده و مدور رفتار پایداری در برابر فشارهای منفی در وجه قائم پله‌ها از خود نشان می‌دهند و برای شرایطی که پایداری جریان و جلوگیری از خستگی سازه یا خطر پدیده کاویتاسیون در اولویت است، گزینه‌های ایمن‌تری محسوب می‌شوند.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۸	نتیجه‌گیری: گرچه سرریز لبه‌مشبک بالاترین نرخ استهلاک انرژی را دارد، به دلیل ایجاد نوسانات شدید که ریسک کاویتاسیون و خستگی سازه را افزایش می‌دهد گزینه مطلوبی نیست. سرریز پلکانی لبه ساده به دلیل عملکرد هیدرودینامیکی مناسب، پایداری جریان، سادگی ساخت و هزینه کمتر به عنوان گزینه عملی بهینه پیشنهاد می‌شود.
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱	

کلیدواژه‌ها:

سرریز پلکانی

FLOW-3D

مدل RNG

استهلاک انرژی

هندسه لبه پله

*نویسنده مسئول. E-mail: mollazadeh.mahdi@birjand.ac.ir

استناد: کریم‌زاده، ا؛ ملازاده، م. (۱۴۰۵). بررسی عددی تأثیر هندسه لبه پله بر رفتار هیدرودینامیکی جریان در سرریزهای پلکانی با استفاده از FLOW-3D. *رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست*، ۵ (۳)، ۱۸۷-۲۰۹. <https://doi.org/10.22034/nawee.2026.579642.1211>



مقدمه

سرریزها از جمله سازه‌های حیاتی در سدسازی هستند که وظیفه تخلیه ایمن سیلاب‌های احتمالی، کنترل تراز مخزن و حفاظت از بدنه سد را بر عهده دارند. در دهه‌های اخیر، سرریزهای پلکانی به دلیل قابلیت بالای استهلاک انرژی جنبشی جریان در طول تندآبراه، جایگزین مناسبی برای سرریزهای صاف سنتی شده‌اند. این سازه‌ها با ایجاد آشفتگی شدید و هوادهی جریان، بخش قابل توجهی از انرژی را قبل از ورود به حوضچه آرامش مستهلک می‌کنند و در نتیجه ابعاد و هزینه‌های ساخت سازه‌های پایاب را کاهش می‌دهند (Felder & Chanson, 2014; Chanson et al., 2002). مطالعات آزمایشگاهی گسترده‌ای بر روی سرریزهای پلکانی انجام شده است. علاوه بر این، ارزیابی‌ها نشان داده‌اند که رژیم‌های مختلف جریان وابستگی شدیدی به هندسه پله‌ها دارند. درک دقیق انتقال بین این رژیم‌ها و تأثیر متقابل آن بر پدیده کاویتاسیون، زمینه‌ساز توسعه مدل‌های فیزیکی و عددی پیشرفته‌تر برای طراحی بهینه این سازه‌ها شده است. با پیشرفت روش‌های محاسباتی، شبیه‌سازی عددی به ابزار قدرتمندی برای تحلیل جریان‌های پیچیده دوفازی در سرریزهای پلکانی تبدیل شده است.

Boes and Hager (2003) و Ohatsu et al. (2004) نشان دادند که جریان روی سرریزهای پلکانی به شدت تحت تأثیر هوادهی است و هندسه پله‌ها نقش کلیدی در تعیین نقطه شروع هوادهی، توسعه لایه مرزی آشفته و تعیین نقطه شروع هوادهی ایفا می‌کند. (Tabbara et al. (2005 از مدل VOF برای شبیه‌سازی جریان استفاده کردند و در این شبیه‌سازی نشان دادند که اگرچه توانایی روش کسر حجمی سیال (VOF) در ردیابی سطح آزاد آب به اثبات رسید، اما به دلیل محدودیت‌های پردازشی در آن زمان، ساختار گردابه‌های سه‌بعدی و جریان‌های ثانویه در گوشه‌ی پله‌ها با جزئیات کامل تحلیل نشد و تأثیر تغییرات ظریف هندسی در لبه‌ها مورد بررسی قرار نگرفت. در فاصله سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۸، تمرکز به سمت تحلیل جزئیات هیدرولیکی جلب شد. (Amador et al. (2006 و Bombardelli et al. (2011 با استفاده از مدل‌سازی‌های سه‌بعدی و مشاهدات آزمایشگاهی نشان دادند که ناحیه در حال توسعه جریان دارای نوسانات فشار شدیدی است که می‌تواند منجر به آسیب‌های سازه‌ای شود. (Dermawan & Legono (2011 با آزمایش بر روی سرریز با شیب ۴۵ درجه نشان دادند که افت نسبی انرژی با افزایش y/h کاهش می‌یابد. (Felder et al. (2012 مطالعه آزمایشگاهی جامعی بر روی پیکربندی‌های مختلف پله‌ای انجام دادند و داده‌های دقیقی از توزیع سرعت، غلظت هوا و استهلاک انرژی ارائه کردند که مرجع اعتبارسنجی بسیاری از مدل‌های عددی شد. (Bung (2013 روش‌های غیرتهاجمی برای اندازه‌گیری زبری سطح آب-هوا در جریان‌های خودهواده توسعه داد. (Felder & Chanson (2014 اثر تخلخل حفره پله را بر هوادهی و استهلاک انرژی بررسی کردند و نشان دادند که افزایش تخلخل می‌تواند استهلاک انرژی را تا ۱۵ درصد افزایش دهد. همزمان با پیشرفت توان محاسباتی در بازه سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۷، Bai et al. (2017 و Toro and Chanson (2016 تأثیر شیب و اشکال مختلف پله را بررسی کردند و دریافتند که تغییرات جزئی در هندسه محلی، بدون نیاز به تغییرات عمده در سازه، تأثیر چشمگیری بر بهبود راندمان استهلاک انرژی دارد. (Wan et al. (2018 خطر کاویتاسیون هیدرولیکی در سرریزهای با جریان پرسرعت را با روش‌های عددی پیش‌بینی کردند. آن‌ها نشان دادند که در سرعت‌های بالای جریان، افت فشارهای موضعی در مجاورت لبه پله‌ها می‌تواند به شکل‌گیری هسته‌های کاویتاسیون منجر شود. (Chanson & Zhang (2022 روش‌های جریان نوری محلی را برای اندازه‌گیری سرعت در جریان‌های سطح آزاد پرسرعت اعتبارسنجی کردند و تأثیر رژیم‌های مختلف جریان بر میزان استهلاک انرژی و توزیع فشار را مورد ارزیابی قرار دادند. (Ikinciogullari (2021 با شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار Flow3D، عملکرد استهلاک انرژی سرریزهای پلکانی دوزنقه‌ای را با چهار پیکربندی مختلف بررسی کرد و نشان داد که این هندسه می‌تواند استهلاک انرژی را تا ۳۰٪ نسبت به سرریز پلکانی کلاسیک افزایش دهد. با این حال، تصریح شد که اگرچه حجم بتن مصرفی در این سرریزها کمتر است، هزینه کارگری و اجرای این نوع پله‌ها دشوارتر و زمان‌برتر از سرریزهای پلکانی کلاسیک است.

یکی از چالش‌های مهم در شبیه‌سازی عددی سرریزهای پلکانی، انتخاب شرایط مرزی مناسب در ورودی و خروجی دامنه محاسباتی است. اکثر مطالعات در این زمینه عمدتاً از شرایط مرزی سرعت یا فشار استفاده کرده‌اند، اما مقایسه سیستماتیک دقت این شرایط مرزی در سرریزهای پلکانی و اثرات هندسه این پله‌ها بر توزیع سرعت و فشار کمتر مورد توجه قرار گرفته

است. در سال‌های اخیر، تمرکز پژوهشگران به سمت ارزیابی دقیق‌تر تغییرات هندسی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی معطوف شده است. (Teng et al. (2021 مدل‌های مختلف آشفتگی در نرم‌افزار FLOW-3D را برای سرریزهای پلکانی مقایسه کردند و نتیجه گرفتند که مدل آشفتگی $k - \epsilon$ بهترین تطابق را با داده‌های آزمایشگاهی برای تخمین فشار موضعی روی لبه پله‌ها دارد. (Ghaderi et al. (2021 با شبیه‌سازی عددی نرم‌افزار Flow-3D، مدل آشفتگی $k - \epsilon$ پیکربندی‌های مختلف سرریز پلکانی حوضچه‌دار را بررسی کردند و نشان دادند پله‌های تخت بهترین عملکرد استهلاک انرژی را دارند، اما در میان پیکربندی‌های حوضچه‌دار، حالت شکاف‌دار با حدود ۵.۸٪ بهبود کارایی نسبت به حالت ساده، بهترین عملکرد را نشان داد. همچنین وجود حوضچه در لبه‌ی پله‌ها با کاهش فشارهای منفی روی سطح قائم پله، ریسک وقوع کاویتاسیون را نسبت به پله‌ی تخت کاهش می‌دهد. علاوه بر این، (Zhang et al. (2022 نشان دادند که تغییر زاویه و هندسه لبه پله‌ها می‌تواند گردابه‌های محبوس در گوشه پله‌ها را تقویت کرده و افت انرژی موضعی را افزایش دهد، اما این تغییرات نیازمند بررسی دقیق پتانسیل کاویتاسیون است. در همین راستا، (Valero et al. (2023 بر اهمیت شبکه‌بندی ناحیه نزدیک به لبه پله تأکید کرده و گزارش دادند که نوسانات فشار کاویتاسیونی و نقاط بحرانی تنها با استفاده از شبکه‌های بسیار ریز در روش VOF قابل شناسایی هستند. (Ghaderi et al. (2023 به بررسی عددی و آزمایشگاهی تأثیر پیکربندی‌های کنگره‌ای با فرم‌های دوزنقه‌ای و مستطیلی بر نرخ استهلاک انرژی پرداختند. ایشان با استفاده از مدل عددی مبتنی بر OpenFOAM و حل گر InterFOAM، عملکرد این پیکربندی‌ها را در رژیم جریان رویه‌ای با سرریز پلکانی متعارف مقایسه کردند. نتایج نشان داد که تغییر شکل کنگره‌ها به فرم دوزنقه‌ای و مستطیلی، توانمندی سرریزها را در اتلاف انرژی به میزان زیادی افزایش می‌دهد؛ به‌طوری‌که در نسبت $y_0/h=1.45$ نرخ استهلاک انرژی برای پیکربندی‌های دوزنقه‌ای و مستطیلی به‌ترتیب با ۳۴/۷ و ۲۱/۱ درصد افزایش نسبت به نمونه متعارف همراه بوده است. همچنین، تحلیل توزیع فشار و انرژی جنبشی آشفتگی نشان داد که اگرچه پیکربندی دوزنقه‌ای عملکرد بهتری در افزایش انرژی جنبشی آشفتگی داشته است، اما نوع مستطیلی مقادیر فشار منفی شدیدتری را در نیمه بالایی وجه قائم پله‌ها ایجاد می‌کند که این امر اهمیت ملاحظات سازه‌ای و پدیده کاویتاسیون را در طراحی‌های کنگره‌ای بیش از پیش نمایان می‌سازد.

(Ghaderi et al. (2024 با استفاده از مدل عددی OpenFOAM و اعتبارسنجی آن با نتایج مدل فیزیکی، مشخصه‌های هیدرولیکی جریان، نرخ استهلاک انرژی و انرژی باقیمانده در پایین‌دست سرریز پلکانی با پیکربندی‌های کنگره‌ای دایره‌ای را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که ترکیب سرریز پلکانی با پیکربندی‌های کنگره‌ای دایره‌ای، نسبت به سرریز پلکانی متعارف، موجب افزایش استهلاک انرژی می‌شود؛ به‌طوری‌که در دبی ثابت و $y_0/h=1.68$ ، نرخ استهلاک انرژی برای فرم‌های دو، سه و چهار سیکله به‌ترتیب ۴/۷، ۲۸ و ۱۸/۳ درصد افزایش یافت. همچنین، در میان پیکربندی‌های بررسی‌شده، فرم سه سیکله بیشترین نرخ استهلاک انرژی را نشان داد و در عین حال فشار منفی کمتری را در نیمه بالایی وجه قائم پله نسبت به سایر آرایش‌ها ایجاد کرد. اخیراً نیز (Zhai et al. (2024 با بررسی هیدرودینامیک جریان روی سرریزهای پلکانی اصلاح‌شده، گزارش دادند که تغییر هندسه لبه پله علاوه بر افزایش استهلاک انرژی، می‌تواند نقطه شروع هوادهی را به سمت بالادست منتقل کند که این پدیده به طور طبیعی از سازه در برابر خسارات کاویتاسیون محافظت می‌کند. بر اساس یافته‌های اداره‌ی ایالات متحده آمریکا (USBR) بافل‌ها با جدا کردن جت عبوری از روی سرریز و در نتیجه ایجاد آشفتگی در جریان، می‌توانند به‌طور مؤثر انرژی جنبشی را از بین ببرند. (Iranpour et al., 2024)

مرور منابع حاکی از آن است که تغییر هندسه و فرم لبه‌های سرریز پلکانی می‌تواند در بهبود عملکردشان تأثیرگذار باشد. با این وجود تاکنون اثر پلکان‌ها با لبه مستطیلی مشبک و لبه مدور در بهبود عملکرد این سرریزها مورد بررسی قرار نگرفته است. از این رو در این تحقیق برای اولین بار جهت افزایش و بهبود عملکرد هیدرولیکی جریان، به ارزیابی سه‌بعدی پارامترهای هیدرولیکی اعم از استهلاک انرژی، سرعت و فشار جریان در سرریزهای پلکانی با لبه مشبک و مدور و مقایسه آن با سرریز پلکانی لبه‌دار ساده با بهره‌گیری از نرم‌افزار FLOW-3D پرداخته شده است.

مواد و روش ها

نرم افزار و روش عددی

در این تحقیق، از نرم افزار FLOW-3D برای شبیه سازی سه بعدی جریان روی سرریزهای پلکانی استفاده شد. این نرم افزار بر اساس روش حجم محدود (FVM)^۱ و الگوریتم FAVOR^۲ برای مدل سازی هندسه های پیچیده طراحی و توسعه یافته است. همان طور که ماجدی اصل و همکاران (۲۰۲۶) گزارش کردند، استفاده نرم افزار Flow3D از الگوریتم FAVOR (نمایش جزء سطح/حجم مانع) امکان بازنمایی دقیق هندسه های پیچیده سازه ای را در یک شبکه محاسباتی ساختاریافته فراهم می کند؛ قابلیت هایی که در پژوهش حاضر نیز شبیه سازی قابل اعتماد اغتشاشات موضعی جریان در اطراف هندسه های اصلاح شده لبه پله را پشتیبانی کرد. الگوریتم FAVOR امکان استفاده از شبکه منظم مستطیلی را برای هندسه های پیچیده فراهم می کند، به طوری که کسری از حجم و سطح هر سلول که توسط جسم جامد اشغال شده محاسبه می شود. این روش نسبت به شبکه های تطبیق یافته با مرز (body-fitted grids) مزایای زیر را دارد:

- سادگی تولید شبکه برای هندسه های پیچیده مانند سرریزهای پلکانی با تعداد زیاد پله
- کاهش خطاهای عددی ناشی از تغییر شکل شبکه در گوشه ها و لبه های تیز
- سرعت بالاتر در مراحل پیش پردازش و تولید شبکه

علیرغم محدودیت مدل سازی دقیق هواگیری، برای ردیابی سطح آزاد جریان دوفازی هوا-آب، روش حجم سیال (VOF)^۳ به کار گرفته شد که توسط Hirt (1981) توسعه یافته است. در این روش، یک تابع نشانگر به نام کسر حجمی (F) تعریف می شود که مقدار آن در سلول های پر از آب برابر ۱، در سلول های پر از هوا برابر ۰ و در سلول های حاوی سطح آزاد بین ۰ و ۱ است. روش VOF برای جریان های با سطح آزاد پیچیده مانند سرریزها دقت بالایی دارد و قادر به مدل سازی پدیده های پیچیده ای مانند جدایش جریان، برخورد جت و هوادهی است (Tabbara, 2004). به منظور شبیه سازی میدان سرعت جریان از معادلات حاکم بر حرکت سیال تراکم ناپذیر لزج در حالت آشفته استفاده شد. این معادلات شامل معادلات پیوستگی و مومنوم در دستگاه مختصات کارتزین به شرح زیر است:

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + R \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = \frac{R_{SOR}}{\rho} \quad (۱)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \quad (۲)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \quad (۳)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \quad (۴)$$

که در آن، V_F کسر حجمی فضای باز به جریان، ρ چگالی سیال، R_{SOR} برابر چگالی چشمه است. u, v, w اجزای سرعت در جهت های x, y, z هستند. A_x, A_y, A_z برابر مساحت کسری محیط به جریان در جهت های x, y, z هستند. G_x, G_y, G_z شتاب های بدنه، f_x, f_y, f_z شتاب های ناشی از لزجت هستند. نرم افزار FLOW-3D کل میدان جریان را بصورت حجم کنترل های مجزا در نظر می گیرد و از معادلات حاکم بر جریان سیال روی هر حجم کنترل انتگرال گرفته و با استفاده از طرح های مختلف انفصال، معادلات منفصل می شوند. به منظور اطمینان از پایداری جریان در مدل پژوهش حاضر، نمودار شکل ۱ تغییرات زمانی متوسط انرژی جنبشی را تا رسیدن جریان به حالت همگرا نشان می دهند. همگرایی این کمیت در دامنه محاسباتی، نشان دهنده پایداری میدان جریان و برقراری تعادل نسبی در تبادلات انرژی است و بنابراین مبنای مناسبی برای آغاز استخراج نتایج و محاسبه

1. Finite Volume Method
2. Fractional Area Volume Obstacle Representation
3. Volume of Fluid

پارامترهای هیدرولیکی فراهم می‌کند. بر این اساس، تمامی نتایج ارائه‌شده در این پژوهش پس از شکل‌گیری جریان یکنواخت و اطمینان از شرایط شبه‌پایدار برداشت شده‌اند.



شکل ۱- نمودار تغییرات زمانی متوسط انرژی جنبشی سیال

رابطه‌های تئوری تشخیص رژیم جریان

برای شناسایی نوع رژیم جریان حاکم بر سرریزهای پلکانی، روابط آزمایشگاهی و نظری متعددی به کار گرفته شده است. عوامل مؤثر در تعیین نوع جریان در سرریزهای پلکانی شامل مقدار دبی عبوری از سطح بدنه و شکل هندسی پله‌ها است. یافته‌های پژوهشگران بسیاری نظیر Rajaratnam (1990)، Peyras et al (1991) و Chanson (1994) نشان می‌دهد که نوع جریان به عمق بحرانی نرمال‌شده (y_c/H) و مختصات بی‌بعد پله (H/L) وابسته است، که y_c عمق بحرانی جریان، H و L به ترتیب ارتفاع و عرض پله‌ها هستند. بر این اساس، در ادامه روابط تجربی برخی از پژوهشگران که تحت این شرایط رژیم جریان غیر ریزشی ایجاد می‌شود، ارائه می‌گردد:

$$\begin{array}{lll} \frac{y_c}{H} \geq 0.8 & 0.4 \leq \frac{H}{L} \leq 0.9 & \text{Rajaratnam (1990)} \quad (5) \\ \frac{y_c}{H} \geq 1.01 - 0.37 \left(\frac{H}{L} \right) & & \text{Peyras et al. (1991)} \quad (6) \\ \frac{y_c}{H} \geq 1.05 - 0.465 \left(\frac{H}{L} \right) & 0.2 \leq \frac{H}{L} \leq 1.25 & \text{Chanson (1994)} \quad (7) \end{array}$$

با توجه به رابطه‌های ۵ تا ۷ و جدول ۱، رژیم جریان حاکم بر مدل‌های سرریزهای پلکانی از نوع غیر ریزشی خواهد بود.

جدول ۱- مشخصه‌های هیدرولیکی و نوع رژیم جریان شکل گرفته روی سرریز پلکانی مطالعه حاضر

رژیم جریان	y_c/H	H/L	عرض پله $L(m)$	ارتفاع پله $H(m)$	عمق بحرانی $y_c=(q^2/g)^{1/3}$	دبی (مترمکعب بر ثانیه)
غیرریزشی	۰/۸۴	۰/۵	۰/۲	۰/۱	۰/۰۸	۰/۰۴
غیرریزشی	۱/۱۷	۰/۵	۰/۲	۰/۱	۰/۱۲	۰/۰۶۵
غیرریزشی	۱/۳۴	۰/۵	۰/۲	۰/۱	۰/۱۳	۰/۰۸
غیرریزشی	۱/۵۰	۰/۵	۰/۲	۰/۱	۰/۱۴۵	۰/۰۹
غیرریزشی	۱/۶۵	۰/۵	۰/۲	۰/۱	۰/۱۶	۰/۱۰۵
غیرریزشی	۱/۶۸	۰/۵	۰/۲	۰/۱	۰/۱۷	۰/۱۱۳

آنالیز ابعادی

با توجه به نتایج بررسی‌های انجام شده توسط محققان، مهم‌ترین پارامترها در جریان عبوری از روی سرریز پلکانی عبارتند از:

الف: مشخصات سیال شامل گرانشی دینامیکی (μ)، چگالی (ρ) و شتاب گرانش زمین (g)

ب: مشخصات هیدرولیکی جریان شامل عمق جریان (y)، سرعت جریان (V)

پ: مشخصات هندسی سرریز شامل ارتفاع پله (h)، عرض پله (l)، تعداد پله (N_0)، ارتفاع سرریز (H_{spillway}) و عرض سرریز (W)
میزان استهلاک انرژی ($\eta\%$) برای هر پله از سرریز پلکانی به صورت زیر قابل تعریف است:

$$\eta\% = \frac{\Delta H}{H_0} = \frac{H_0 - H}{H_0} \quad (8)$$

در این رابطه $H_0 = \Delta Z + Y + \left(\frac{V_0^2}{2g}\right)$ ، هد جریان در بالادست و $H = y \cos \theta + \left(\frac{V^2}{2g}\right)$ هد آب در پائین دست سرریز قبل از پرش، $V = \frac{Q}{(y \times w)}$ و $V_0 = \frac{Q}{(Y \times W)}$ می باشد. در صورتی که $W \gg y$ باشد که در آن y عمق جریان در پائین دست و W عرض مقطع است، استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی به تعداد پله ها (N_0)، مشخصات هندسی پله شامل ارتفاع پله (h)، عرض پله (l) و دبی جریان عبوری (Q) بستگی دارد (Christodoulou, 1993)؛ که می توان عمق بحرانی را تابعی از دبی جریان عبوری از سرریز پلکانی بیان نمود. از این رو پارامترهای مختلف موجود در سرریز پلکانی لبه دار این تحقیق، به صورت رابطه (۹) با هم در ارتباط هستند.

(۹)

$$f(H_{\text{spillway}}, N_0, N_e, l, h, V, y, L_T, W, g, \rho, \mu) = 0$$

با استفاده از تئوری پی باکینگهام و انتخاب پارامترهای p ، y ، V به عنوان پارامترهای تکراری، می توان استهلاک نسبی انرژی را تابعی از پارامترهای بی بعد زیر در نظر گرفت.

$$\frac{\Delta H}{H_0} = f\left(\frac{y_e}{h}, \frac{y_e}{l}, \frac{L_r}{W}, Re, Fr, N_0\right) \quad (10)$$

اگر فرض شود که در آبراهه های روباز نیروی لُزجت سیال در مقایسه با نیروی اینرسی ناچیز می باشد (Chow, 1959) و با توجه به این که تعداد پله های سرریز پلکانی لبه دار در این تحقیق برای همه مدل ها یکسان می باشد، می توان از عدد رینولدز جریان و تعداد پله ها صرف نظر کرد.

مشخصات مدل فیزیکی و هندسه سرریز

به منظور اعتبارسنجی نتایج عددی، از یک مدل فیزیکی آزمایشگاهی مشابه با مدل عددی استفاده شد که بر اساس آزمایش های (Felder & Chanson (2011 طراحی شده بود. این مدل یک سرریز پلکانی با لبه مستطیلی است که در آزمایشگاه هیدرولیک ساخته و آزمایش شده است. شکل ۲ نمای کلی سرریز و شکل ۳ جزئیات نصب لبه ها را نشان می دهد. مشخصات سرریز پلکانی لبه دار مستطیلی با ۱۰ پله به صورت زیر است:

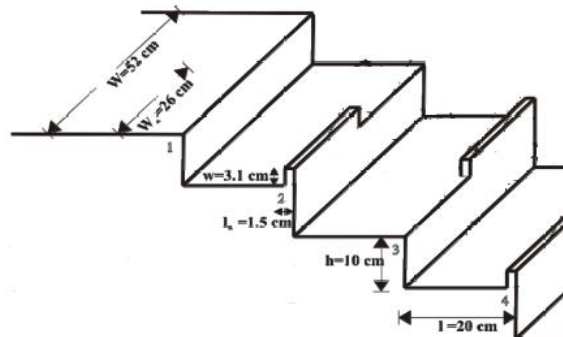
- طول تاج سرریز: ۱۰۱ سانتی متر
- ارتفاع هر پله: ۱۰ سانتی متر
- طول هر پله: ۲۰ سانتی متر
- ارتفاع کل سرریز: ۱۰۰ سانتی متر
- شیب سرریز: ۲۶/۵۷ درجه

لبه های مستطیلی:

- ضخامت: ۱/۳ سانتی متر
- ارتفاع: ۱/۵ سانتی متر
- طول: ۲۶ سانتی متر
- محل نصب: لبه خارجی هر پله (عمود بر جهت جریان)
- هدف: افزایش استهلاک انرژی تا (۱۵-۲۰) درصد

جنس مواد:

- سرریز: ورق فلزی گالوانیزه (ضخامت ۲ میلی‌متر، ضریب زبری حدود ۰/۰۱)
- دیواره‌های جانبی: پلکسی‌گلاس شفاف (۱۰ میلی‌متر)



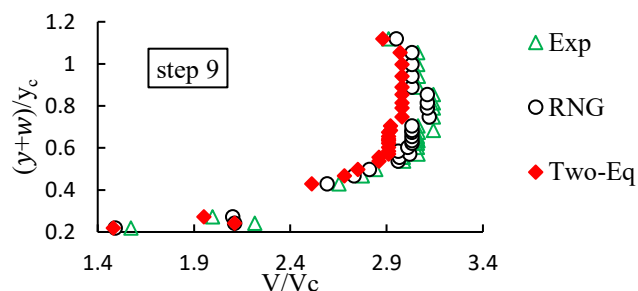
شکل ۲- سرریز پلکانی لبه دار



شکل ۳- سرریز پلکانی استفاده شده در آزمایشگاه فیلدر و همکاران (۲۰۱۱)

مش‌بندی و انتخاب مدل آشفتگی

اندازه سلول‌های شبکه محاسباتی تأثیر مستقیم بر دقت و هزینه محاسباتی دارد. به منظور تحلیل حساسیت شبکه و بررسی تعداد مش بهینه، مدل در چهار حالت مش‌بندی ارزیابی شد که برابر ارزیابی بعمل آمده، شبکه ریزتر از سناریوی (۳) با اندازه مش ۱/۰۵ سانتی‌متر و تعداد مش ۵۲۰۰۰۰، تغییری در دقت نتایج ایجاد نمی‌کند که حکایت از کفایت اندازه مش دارد. برای حل معادلات آشفتگی و شبیه‌سازی الگوی جریان در نرم افزار FLOW-3D، دو مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ (RNG) و Two-equation $k-\varepsilon$ مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به شکل (۴) و درصد میانگین خطای مطلق (MAPE) ارائه شده در جدول (۲) می‌توان گفت که مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ (RNG) نسبت به مدل آشفتگی Two-equation $k-\varepsilon$ برای شبیه‌سازی عددی الگوی جریان بروی سرریز پلکانی از دقت بالاتری برخوردار است. البته ارجحیت مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ (RNG) برای شبیه‌سازی عبور جریان بر روی سرریز پلکانی در تحقیقات بسیار از محققین Ghaderi et al. (2023) و Ghaderi et al. (2024) بررسی شده، که نتایج این تحقیقات نیز مصداق این موضوع است. در این تحقیق، پارامترهای مقایسه شامل سرعت بی‌بعد ($\frac{v}{v_c}$) در راستای افقی و عمق بی‌بعد ($\frac{y+w}{y_c}$) در راستای قائم هستند.



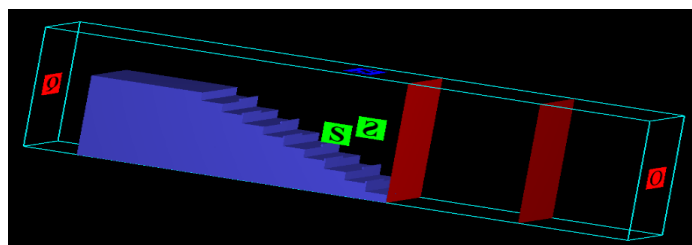
شکل ۴- مقایسه مدل‌های آشفتگی در نرم افزار FLOW-3D

جدول ۲- مشخصات سلول ها و پارامتر خطا در چهار سناریو شبکه بندی مدل عددی

سناریو	سایز مش (سانتی‌متر)	تعداد مش	مدل آشفتگی	درصد میانگین خطای مطلق
۱	۳/۲	۴۷۰۰۰	RNG	۱۱/۲
			Two-Eq	۱۳/۲۱
۲	۱/۲	۱۵۶۰۰۰	RNG	۹/۵۶
			Two-Eq	۱۱/۴۳
۳	۱/۰۵	۵۲۰۰۰۰	RNG	۷/۶
			Two-Eq	۹/۹۲
۴	۰/۹۵	۷۹۵۰۰۰	RNG	۷/۵۸
			Two-Eq	۹/۹

شرایط اولیه و مرزی

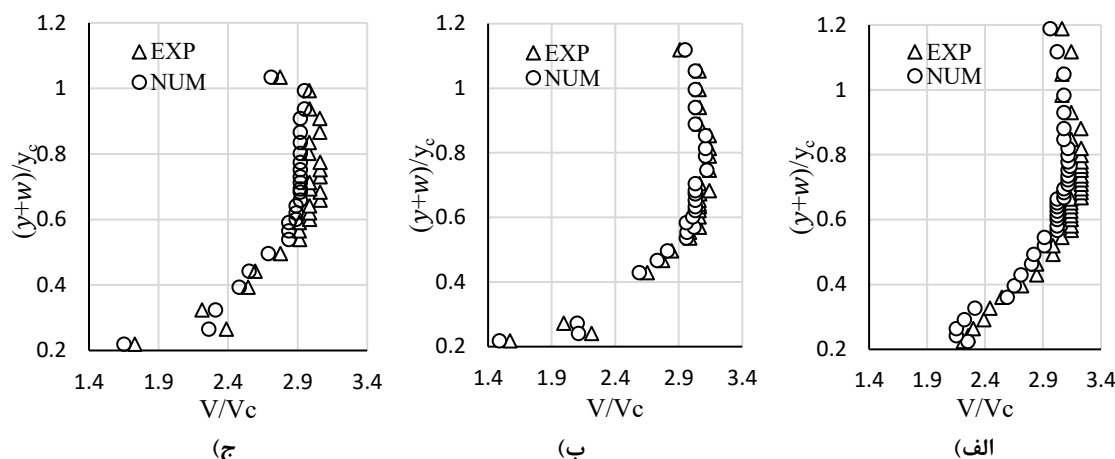
برای شبیه‌سازی جریان روی سرریز پلکانی، شرایط مرزی مناسب در نرم‌افزار FLOW-3D تعریف شد (شکل ۵). به منظور افزایش سرعت در زمان انجام محاسبات، ابتدا برای مدل شرایط اولیه (ثانیه صفر) لحاظ گردید که مخزن بالادست به صورت پر از آب در حالت سکون (با توزیع فشار هیدرواستاتیک) و محدوده روی پله‌ها و پایین‌دست به صورت خشک در نظر گرفته شد تا جریان به مرور زمان شکل گرفته و به شرایط ماندگار برسد. در ادامه برای ورودی سرریز از شرط مرزی دبی جریان (Volume flow rate)، برای سطح آزاد کانال از شرط مرزی (Specified Pressure) همراه با $\text{Fluid fraction}=0$ و در پایین‌دست سرریز، شرط مرزی جریان خروجی (Outflow) برای خروج آزاد جریان و جلوگیری از اثرات بازگشتی استفاده شد. دیواره‌های جانبی و کف کانال نیز با شرط مرزی دیوار (Symmetry) مدل‌سازی شدند که کلیه گرادیان‌های عمود بر مرز صفر بوده و هیچ جریانی از آن عبور نمی‌کند.



شکل ۵- نمایش شرایط مرزی سرریز پلکانی لبه دار مستطیلی با استفاده از نرم افزار FLOW-3D

صحت‌سنجی مدل عددی

به منظور ارزیابی دقت مدل عددی، نتایج شبیه‌سازی با داده‌های آزمایشگاهی (Felder & Chanson (2011) مقایسه شد. شکل (۶) مقایسه‌ای از توزیع سرعت در سرریز پلکانی لبه‌دار ساده بین مدل عددی و مدل آزمایشگاهی برای دبی ۰/۰۹ متر مکعب بر ثانیه را نشان می‌دهد.



شکل ۶- تغییرات عمق بدون بعد در برابر سرعت بدون بعد روی سرریز پلکانی لبه‌دار ساده به روش عددی و آزمایشگاهی: (الف) پله هشتم، (ب) پله نهم، (ج) پله دهم

در این پژوهش، برای مقایسه داده‌های آزمایشگاهی و مدل عددی، از شاخص‌های آماری متنوعی استفاده شد. به منظور ارزیابی دقیق، شاخص‌های شناخته‌شده‌ای مانند MAE، MAPE، RMSE و R^2 به کار گرفته شدند. علاوه بر این شاخص آماری KGE که ترکیبی از بایاس، همبستگی و واریانس داده‌هاست، جهت افزایش دقت کالیبراسیون مدل مورد استفاده قرار گرفت (رابطه‌های ۱۱ تا ۱۵).

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{x_{ip} - x_{im}}{x_{ip}} \right|}{N_t} \times 100 \quad (11)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |(x_{ip} - x_{im})|}{N_t} \quad (12)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ip} - x_{im})^2} \quad (13)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_{ip} - x_{im})^2}{\sum_{i=1}^n (x_{ip} - \bar{x})^2} \quad (14)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{[(R - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2]} \quad (15)$$

در روابط بالا $\bar{x}$ میانگین داده های اندازه گیری شده، x_{ip} مقادیر اندازه گیری شده آزمایشگاهی و x_{im} مقادیر محاسبه شده توسط مدل عددی FLOW-3D می باشد. همچنین R ضریب همبستگی پیرسون بین مقادیر مشاهده شده و پیش بینی شده، α نسبت انحراف معیار مقادیر عددی به انحراف معیار مقادیر آزمایشگاهی و β نسبت میانگین مقادیر عددی به میانگین مقادیر آزمایشگاهی است. N_t نیز تعداد داده ها است. با توجه به شاخص های خطای ارائه شده در جدول ۳، نتایج به دست آمده از این مدل نشان دهنده دقت و کارایی آن در شبیه سازی رفتار جریان است. مقادیر MAPE برای سه پله مورد بررسی به ترتیب ۸/۷ درصد، ۷/۶ درصد و ۵/۹ درصد بود که معرف تطابق خوب نتایج عددی با آزمایشگاهی است. این میزان خطا در محدوده قابل قبول مطالعات مشابهه (Bombardelli et al., 2011; Cheng et al., 2006) قرار دارد و صحت مدل سازی عددی را برای شبیه سازی جریان روی سرریزهای پلکانی تأیید می کند.

جدول ۳- مقایسه داده های عددی و آزمایشگاهی سرعت بی بعد جریان (V/V_c) بر اساس شاخص های خطا

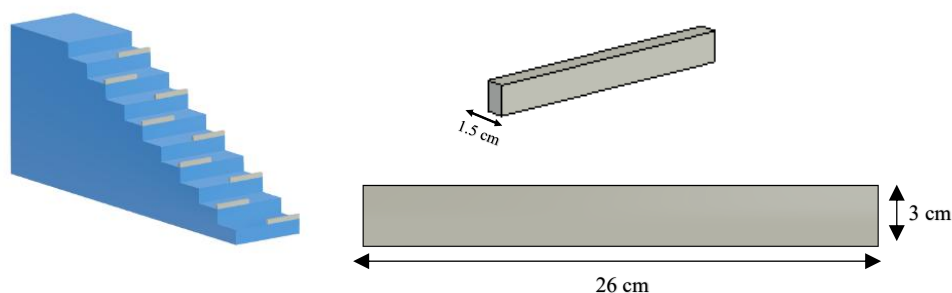
شماره پله	R^2	RMSE	MAPE	MAE	KGE
پله ۸	۰/۹۱۶	۰/۰۸۹	۸/۷	۰/۰۶۶	۰/۹۴۲
پله ۹	۰/۹۵۵	۰/۰۶۸	۷/۶	۰/۰۵۳	۰/۹۶۳
پله ۱۰	۰/۹۳	۰/۰۹۴	۵/۹	۰/۰۷۲	۰/۹۳۸

سناریوهای شبیه سازی و هندسه های مورد بررسی

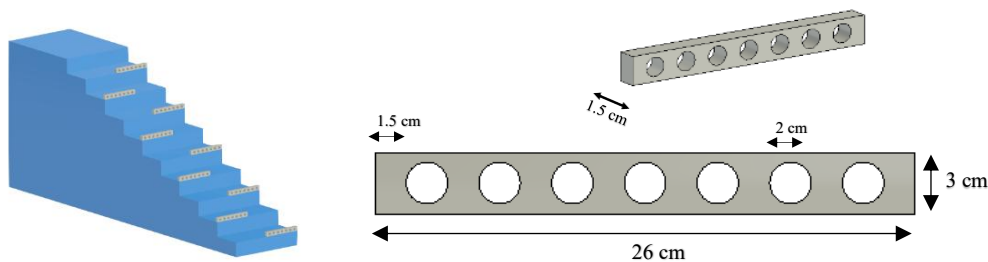
پس از اطمینان از صحت مدل سازی با نرم افزار FLOW-3D، برای بررسی تأثیر تغییر هندسه لبه بر پارامترهای هیدرولیکی جریان، سه پیکربندی مختلف لبه روی پله های سرریز با دبی ثابت ۰/۰۹ مترمکعب بر ثانیه شبیه سازی شد. شکل های ۷ تا ۹ نمای سه بعدی سرریز پلکانی با سه نوع لبه با ابعاد (۲۶*۳*۱/۵) سانتی متر را نشان می دهد.

- پلکان ها با لبه ساده (شکل ۷): لبه با مقطع مستطیلی (۲۶*۳*۱/۵) سانتی متر به عنوان حالت پایه
- پلکان ها با لبه مشبک (شکل ۸): لبه با سوراخ های منظم برای افزایش آشفستگی و هوادهی جریان
- پلکان ها با لبه مدور (شکل ۹): لبه با گوشه های گرد برای کاهش جدایش جریان

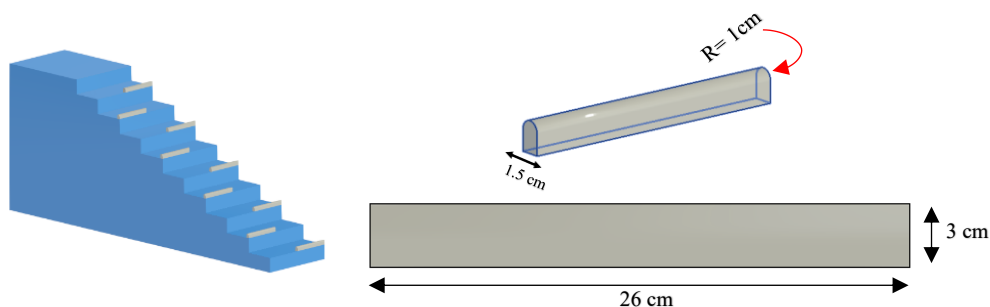
برای مقایسه کمی، مقادیر سرعت در دو مقطع عرضی استخراج شد که مقطع اول در فاصله ۲/۸ متری از ابتدای سرریز (محل پله آخر) و مقطع دوم در فاصله ۴ متری (در طول مسیر جریان بعد از سرریز) می باشد؛ این دو مقطع برای تحلیل رفتار جریان در انتهای سرریز و ناحیه پایاب انتخاب شدند. نتایج این سه حالت در بخش بعد ارائه و مقایسه می شود.



شکل ۷. سرریز پلکانی لبه دار ساده



شکل ۸. سرریز پلکانی لبه‌دار مشبک

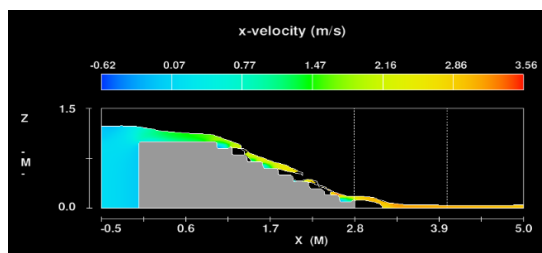


شکل ۹. سرریز پلکانی لبه‌دار مدور

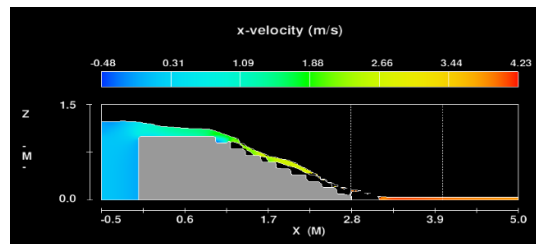
نتایج و بحث

سرعت جریان

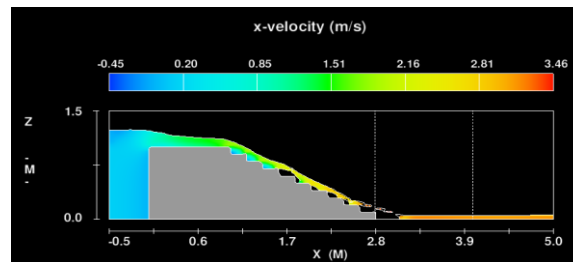
توزیع سرعت در طول سرریز پلکانی یکی از پارامترهای کلیدی برای ارزیابی عملکرد هیدرولیکی و استهلاک انرژی است. سرعت بالای جریان در کف پله‌ها می‌تواند منجر به فرسایش و آسیب به سازه شود، در حالی که کاهش سرعت نشان‌دهنده استهلاک مؤثر انرژی است. شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ نیم‌رخ سرعت جریان را در یک مقطع مشخص از سرریز برای سه نوع لبه ساده، مشبک و مدور نشان می‌دهند. این مقایسه به درک تأثیر هندسه لبه بر رفتار جریان و توانایی استهلاک انرژی کمک می‌کند.



شکل ۱۰- پروفیل توزیع سرعت در کف حوضه آرامش سرریز پلکانی لبه دار

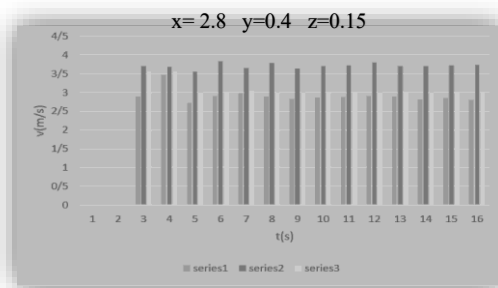


شکل ۱۱- پروفیل توزیع سرعت در کف حوضه آرامش سرریز پلکانی لبه دار مشبک

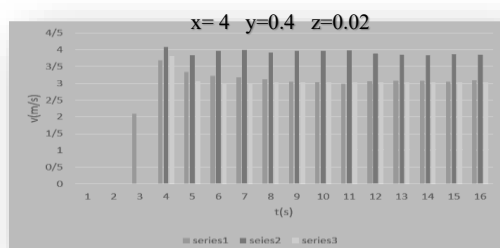


شکل ۱۲- پروفیل توزیع سرعت در کف حوضه آرامش سرریز پلکانی لبه دار مدور

نتایج نشان می‌دهد که هندسه لبه سرریز تأثیر قابل توجهی بر توزیع سرعت دارد. در لبه ساده (شکل ۱۰)، سرعت جریان در نزدیکی کف پله‌ها مقدار بیشتری دارد، که نشان‌دهنده استهلاک انرژی کمتر و جریان پرنرژی‌تر است. در مقابل، لبه مشبک (شکل ۱۱) به دلیل ایجاد اغتشاش بیشتر و افزایش مقاومت جریان، سرعت را به طور محسوسی کاهش می‌دهد. این کاهش سرعت نشان‌دهنده استهلاک انرژی بیشتر و کنترل بهتر جریان است. لبه مدور (شکل ۱۲) رفتاری میانه دارد و سرعت آن کمتر از لبه ساده است، اما به اندازه لبه مشبک استهلاک انرژی ایجاد نمی‌کند. مقایسه این سه پروفیل نشان می‌دهد که لبه مشبک مؤثرترین هندسه برای کاهش سرعت و استهلاک انرژی است. این یافته با اصول هیدرولیک سرریزهای پلکانی همخوانی دارد، جایی که افزایش زبری و اغتشاش منجر به کاهش انرژی جنبشی جریان می‌شود. از سوی دیگر، لبه ساده و مدور به دلیل سطح صاف‌تر، جریان را با سرعت بیشتری به پایین‌دست منتقل می‌کنند، که ممکن است نیاز به حوضچه آرامش بزرگ‌تری داشته باشد. برای بررسی رفتار دینامیکی جریان و اطمینان از همگرایی مدل عددی، تغییرات سرعت در طول زمان برای هر سه مدل در دو موقعیت مشخص ثبت شد. شکل‌های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب نمودار سرعت بر حسب زمان را در موقعیت $y=0.4$ $x=2.8$ و $z=0.15$ ، $z=0.02$ ، $y=0.4$ ، $x=4$ برای سرریزهای پلکانی با لبه ساده، مشبک، و مدور نشان می‌دهند.



شکل ۱۳- مقایسه مقادیر سرعت نسبت به زمان برای سه سرریز پلکانی لبه دار ساده (series1)، پلکانی لبه دار مشبک (series2) و پلکانی لبه دار مدور (series3)

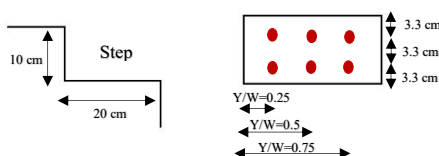


شکل ۱۴- مقایسه مقادیر سرعت نسبت به زمان برای سه سرریز پلکانی لبه‌دار ساده (series1)، پلکانی لبه‌دار مشبک (series2) و پلکانی لبه‌دار مدور (series3)

شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان می‌دهند که در هر دو موقعیت بررسی شده، جریان پس از ۱۵ ثانیه به حالت پایدار می‌رسد. لبه مشبک در هر دو حالت نوسانات بیشتری دارد که ناشی از آشفتگی موضعی در فضاهای خالی شبکه است. لبه مدور به دلیل افزایش زبری، سرعت کمتری نسبت به لبه ساده نشان می‌دهد. این نتایج همگرایی مدل عددی و قابلیت اعتماد شبیه‌سازی را تأیید می‌کند. خروجی نتایج حاکی از آن است به طور میانگین در بین سرریزهای پلکانی، فرم‌های لبه‌دار مدور و لبه سوراخ‌دار مشبک نسبت به سرریز پلکانی لبه‌دار به ترتیب ۱/۹٪ و ۱۷/۵٪ کاهش سرعت را تجربه کرده‌اند. علاوه بر این، نتایج این پژوهش مبنی بر کاهش سرعت جریان در هندسه لبه مشبک، با مشاهدات فیزیکی صورت گرفته در مطالعات پیشین (Felder & Chanson, 2014؛ Daneshfaraz et al., 2021 و Gonzalez & Chanson, 2008) مبنی بر افزایش استهلاک انرژی در زبری‌های مصنوعی همخوانی کامل دارد.

فشار جریان

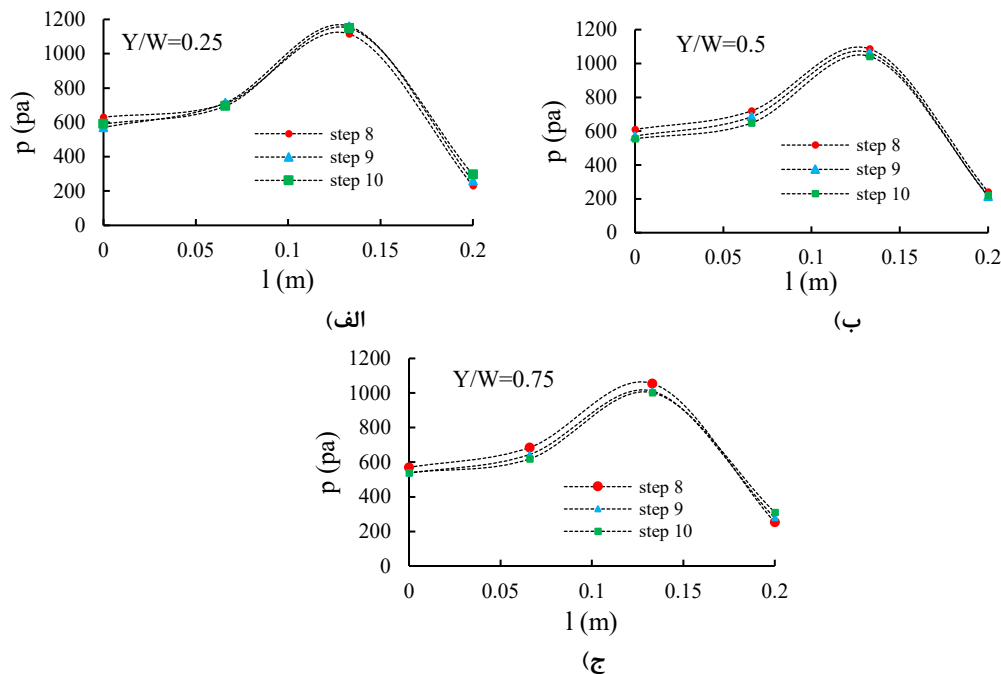
بحث فشار جریان در سرریزها معمولاً از بعد فشارهای منفی مورد توجه طراحان سرریزها قرار دارد. از آنجا که توسعه فشارهای منفی تا مقادیر کمتر از فشار بخار اشباع منجر به رخداد پدیده کاویتاسیون در سرریزها به دلیل سرعت بالای جریان و زبری کف می‌گردد، از این رو بررسی فشار بر روی وجوه مختلف پله‌های سرریز شامل وجوه افقی و قائم پله‌ها اهمیت می‌یابد. معمولاً در وجه افقی پله‌ها به دلیل برخورد جریان با کف فشارهای مثبت محتمل است. با این وجود در وجه قائم و خصوصاً در نیمه بالایی وجوه قائم پله‌ها و در ناحیه کاویتای شکل گرفته بین وجوه قائم و افقی پله‌ها، فشار مقادیر کاهشی بخود می‌گیرند و این موضوع در مواردی با فشارهای منفی نیز همراه هستند. به دلیل احتمال رخداد کاویتاسیون در مواقع وقوع فشارهای منفی، طبیعتاً پیکربندی‌هایی که کمترین فشار منفی در وجه قائم پله را در بین مدل‌های لبه‌دار به همراه داشته باشند، از مطلوبیت بالاتری برخوردارند. در شکل ۱۵ محل برداشت نقاط فشار جریان در وجه‌های افقی و قائم مدل‌های سرریز پلکانی نشان داده شده است.



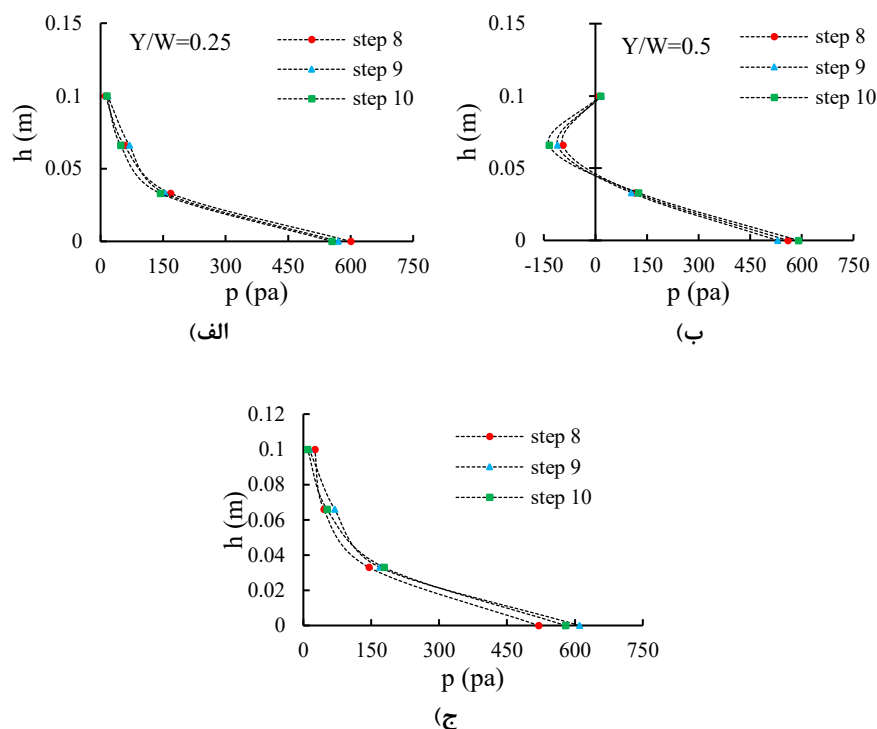
شکل ۱۵- محل برداشت نقاط فشار جریان در وجه‌های افقی و قائم مدل‌های سرریز پلکانی

جهت مشاهده دقیق تغییرات فشار در جریان بر روی پیکربندی‌های مختلف، گراف‌های فشار در وجه افقی و قائم پله‌ها در محورهای مختلف سرریز ارائه شده است (شکل‌های ۱۶ و ۱۷). گراف‌های فشار در وجه افقی برای پله‌های ۸، ۹ و ۱۰ نشان می‌دهد که در محورهای مختلف سرریز، موقعیت بیشینه فشار جریان در تمامی مدل‌ها، تقریباً در دو سوم عرض پله‌ها (۱۳ سانتی‌متری عرض پله‌ها) رخ داده و بر روی هیچ‌کدام از وجوه افقی مدل‌های سرریز پلکانی فشار منفی وجود ندارد. میزان فشار مثبت در وجه

افقی پله‌ها، به طور میانگین در فرم‌های لبه‌دار مدور و لبه سوراخ‌دار مشبک نسبت به سرریز پلکانی لبه‌دار به ترتیب ۱۱/۹٪ و ۱۶/۴٪ افزایش یافته است. در وجه قائم پله نیز در همه پیکربندی‌ها با حرکت به سمت لبه پله، مقادیر مثبت فشار روند کاهشی بخود گرفته است. در همه محورها، پیکربندی لبه سوراخ‌دار مشبک در وجه قائم دارای فشار منفی بوده که این پیکربندی را نسبت به فرم‌های لبه‌دار مدور و لبه مستطیلی از لحاظ احتمال کاویتاسیون و خرابی ناشی از آن به مطلوبیت پائین‌تری قرار می‌دهد.



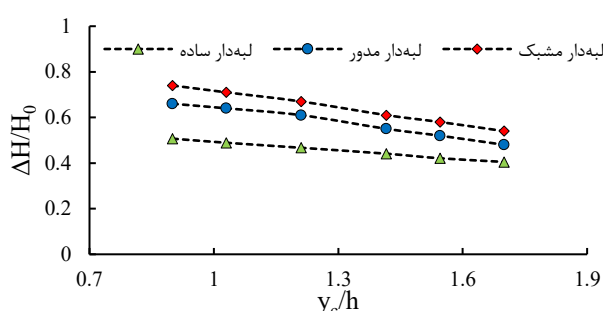
شکل ۱۶- میزان‌های فشار در وجه افقی پله‌های مدل سرریز پلکانی لبه‌دار: (الف) لبه‌دار ساده، (ب) لبه‌دار مشبک، (ج) لبه‌دار مدور



شکل ۱۶- مقادیر فشار در وجه قائم پله‌های مدل سرریز پلکانی لبه‌دار: (الف) ساده، (ب) مشبک و (ج) مدور

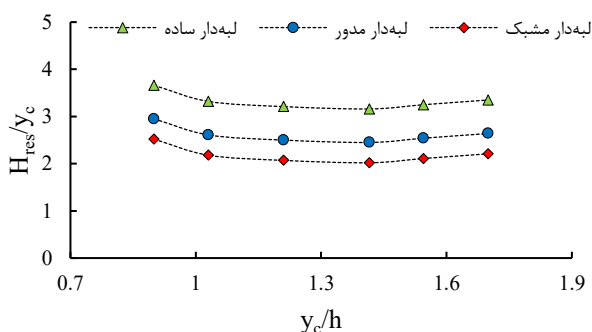
ارزیابی میزان استهلاک انرژی در هندسه‌های مختلف

در سرریزهای پلکانی، زبری ایجاد شده توسط پله‌ها عامل اصلی افت انرژی است. تغییر در هندسه لبه پله‌ها مستقیماً بر ساختار گردابه‌ها، میزان آشفتگی و هوادهی جریان تأثیر می‌گذارد. بهره‌گیری از پله‌ها در بدنه سرریز از جمله ایده‌های اولیه طراحان برای این موضوع بود. مسئله مورد اهمیت، افزایش اثر این پله‌ها در میزان استهلاک انرژی جریان است. طرح‌های مختلفی از گذشته به منظور افزایش کارایی پله‌ها در نرخ استهلاک انرژی از سوی محققان پیشنهاد گردیده است. بهره‌گیری از اثر لبه‌دار کردن سرریز پلکانی در راستای همین موضوع است. به این منظور در این تحقیق اثر سرریزهای پلکانی با فرم‌های لبه‌دار ساده، مدور و مشبک بر نرخ استهلاک انرژی ($\Delta H/H_0$) و مقدار انرژی باقی‌مانده (H_{res}) مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل (۱۷) مقادیر درصد استهلاک انرژی نسبی را برای فرم‌های مختلف سرریزهای پلکانی با فرم‌های لبه‌دار ساده، مدور و مشبک نشان داده است.



شکل ۱۷- مقایسه میزان استهلاک انرژی نسبی در هندسه‌های مختلف سرریزهای پلکانی لبه‌دار

بررسی نتایج حاکی از آن است که سرریزهای پلکانی لبه‌دار مشبک و مدور با توجه به هندسه خاص که منجر به ترکیب مکانیزم‌های استهلاک در رژیم جریان ریزشی (برخورد جریان با کف در هر پله) و همچنین توام شدن با جریان‌های چرخشی رژیم غیرریزشی می‌باشد، نرخ استهلاک بالاتری را نسبت به فرم لبه‌دار ساده بدست داده‌اند. در بین پیکربندی‌های پلکانی لبه‌دار نیز فرم مشبک بالاترین نرخ استهلاک را بدست داده است که دلیل این موضوع را می‌توان در شکل‌گیری کامل جریان‌های چرخشی در محل تلاقی وجه قائم و افقی پله و همچنین برخورد جریان با کف در هر پله اشاره نمود. به طور مثال برای شرایط جریان یکسان و دبی ۰/۰۹ متر مکعب بر ثانیه، سرریزهای پلکانی لبه‌دار مشبک و مدور نسبت به سرریز پلکانی لبه‌دار ساده در $y_c/h=1.5$ بطور متوسط به ترتیب ۹/۹٪ و ۴/۳ درصد استهلاک انرژی بیشتری بدست داده‌اند. شکل (۱۸) ارتفاع بی بعد شده باقی‌مانده (H_{res}/y_c) یا انرژی باقی‌مانده جریان را بصورت تابعی از نسبت عمق بحرانی به ارتفاع پله (y_c/H) نشان می‌دهد.



شکل ۱۸- مقایسه مقادیر انرژی باقی‌مانده در هندسه‌های مختلف سرریزهای پلکانی لبه‌دار

مشاهده می شود در شرایط جریان یکسان، مقادیر انرژی باقیمانده بی بعد شده برای سرریز پلکانی لبه دار ساده بیشتر از مدل های پلکانی لبه دار مدور و مشبک است، به طوری برای نسبت بی بعد $(y/h=1.17)$ مقدار انرژی باقیمانده بی بعد شده برای سرریز پلکانی لبه دار ساده برابر $(H_{res}/y_c=3.12)$ است در حالی که همین مقدار برای سرریز پلکانی لبه دار مشبک برابر $(H_{res}/y_c=2.51)$ است.

نتیجه گیری

استفاده از سرریزهای پلکانی از دهه های قبل به منظور کنترل هرچه بهتر انرژی مخرب جریان بر روی سرریزها و کاهش ابعاد حوضچه های آرامش و هزینه های جانبی ناشی از آن مورد توجه مهندسان هیدرولیک قرار گرفته است. در طی این سال ها، طرح ها و پیکربندی های مختلفی به منظور بهبود عملکرد این نوع سرریز توسط محققان ارائه گردید. در این پژوهش، عملکرد هیدرودینامیکی سه هندسه مختلف برای لبه پله های سرریز (ساده، مشبک و مدور) با استفاده از مدل سازی سه بعدی در نرم افزار FLOW-3D مورد بررسی قرار گرفت. شاخص های آماری خطا نشان دادند که بیشترین درصد خطای به دست آمده از مقایسه نتایج توزیع سرعت بین داده های آزمایشگاهی (Chanson & Felder (2011 و نتایج مدل آشفتگی $k-\epsilon$ (RNG) مربوط به پله شماره ۸ $(R^2=0.916)$ و $KGE=0.942$ بود که نشانگر سازگاری قابل قبول بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی می باشد. نتایج نشان داد که تغییر هندسه لبه می تواند بر پارامترهای هیدرولیکی جریان اعم از سرعت، توزیع فشار، میزان استهلاك انرژی اثرگذار باشد. بر اساس تحلیل ها، سرریز لبه دار مشبک به دلیل ایجاد افت سرعت بیشتر در کف حوضچه، بیشترین استهلاك انرژی را نسبت به ساده و مدور به خود اختصاص می دهد به طوری که در شرایط جریان یکسان و دبی 0.09 متر مکعب بر ثانیه نسبت به سرریز پلکانی لبه دار ساده در $y/h=1.5$ به مقدار $9/9$ درصد استهلاك انرژی بیشتری داشته است. نتایج نشان داد اگرچه میزان فشار مثبت در وجه افقی پله های لبه دار مشبک نسبت به سرریز پلکانی لبه دار ساده $16/4$ درصد افزایش یافته است ولی در مقابل، سرریزهای دارای لبه ساده و مدور رفتار پایدارتری در برابر فشارهای منفی در وجه قائم پله ها از خود نشان می دهند و برای شرایطی که پایداری جریان و جلوگیری از خستگی سازه یا خطر پدیده کاویتاسیون در اولویت است، گزینه های ایمن تری محسوب می شوند. از آنجا که هندسه مدور مزیت هیدرولیکی متمایزی نسبت به لبه صاف ارائه نمی دهد و ساخت آن نیز پیچیده تر است، می توان نتیجه گرفت که انتخاب نوع لبه باید تابع اهداف طراحی پروژه باشد. با این وجود، در حالت کلی سرریز پلکانی با لبه های ساده به دلیل ایجاد تعادل بهینه میان استهلاك انرژی مناسب، کنترل شاخص کاویتاسیون (لبه پله ها) و سهولت در اجرا به عنوان کارآمدترین گزینه پیشنهاد می گردد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: نگارش پیش نویس اولیه مقاله، انجام تحلیل های نرم افزاری و آماری، و اعتبارسنجی نتایج.
نویسنده دوم: نظارت بر پژوهش، ویرایش و بازبینی مقاله، ارائه مشاوره علمی و بررسی و بازبینی مقاله.

حامی مالی

این پژوهش هیچ گونه کمک هزینه یا حمایت مالی خاصی از سوی سازمان ها و نهادهای دولتی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

در فرایند تهیه این مقاله، نویسندگان برای نگارش بخشی از متن از ابزار ChatGPT استفاده کرده‌اند. پس از استفاده از این ابزار، نویسندگان محتوای تولیدشده را حسب نیاز بررسی و ویرایش کرده‌اند و مسئولیت کامل محتوای منتشرشده را بر عهده دارند.

منابع

- ایرانپور، ع.، اگدرنژاد، ا.، و حیدرنژاد، م (۱۴۰۳). بررسی عددی استهلاك انرژی در سرریزهای کلیدپیانویی بافل دار. رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست، ۳(۱)، ۵۵-۷۰.
- ماجدی اصل، م؛ مومنی، م.ر.، نیکمهر، س.، امیدپورعلویان، ت. (۱۴۰۵). بررسی آزمایشگاهی و عددی دبی جریان در فلوام‌های SMBF با استفاده از Flow3D و مقایسه با روابط انرژی. رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست، ۵(۱)، ۲۰-۲۰.
- Amador, A., Sánchez-Juny, M., Dolz, J., 2006. Developing flow region and pressure fluctuations on steeply sloping stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(7), pp.749-752. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2006\)132:7\(749\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:7(749))
- Bai, R., Zhang, J., Zhao, M., 2017. Numerical study of flow characteristics over stepped spillways with different step shapes. *Water Science and Engineering*, 10(1), pp.67-75. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2017.03.003>
- Boes, R. M., Hager, W. H., 2003. Two-phase flow characteristics of stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(9), pp.661-670. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2003\)129:9\(661\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:9(661))
- Bombardelli, F. A., Meireles, I., Matos, J., 2011. Laboratory measurements and multi-block numerical simulations of the mean flow and turbulence in the non-aerated region of skimming flows. *Environmental Fluid Mechanics*, 8(5), pp. 463-480. <https://doi.org/10.1007/s10652-010-9188-5>
- Bung, D., 2013. Non-intrusive detection of air-water surface roughness in self-aerated chute flows. *Journal of Hydraulic Research*, 51(3), pp. 322-329. <https://doi.org/10.1080/00221686.2013.777372>
- Chanson, H., 1994. Hydraulics of skimming flow over stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 120(5): 584-593. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1994\)120:5\(584\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1994)120:5(584))
- Chanson, H., Toombes, L., 2002. Air-water flows on stepped chutes: experimental investigation of self-aeration and turbulence. *International Journal of Multiphase Flow*, 28(11), pp. 1737-1761. [https://doi.org/10.1016/S0301-9322\(02\)00043-3](https://doi.org/10.1016/S0301-9322(02)00043-3)
- Cheng, X., Chen, Y., Luo, L., 2006. Numerical simulation of air-water two-phase flow over stepped spillways. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 49(6), pp. 674-684. <https://doi.org/10.1007/s11431-006-2035-7>
- Chow, V.T., 1959. Open-channel hydraulics. McGraw-Hill, New York.
- Christodoulou, G. C., 1993. Energy dissipation on stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 119(5).
- Dermawan, V., Legono, D., 2011. Residual Energy and Relative Energy Loss on Stepped Spillway. *Journal of Applied Technology in Environmental Sanitation*, 1(4).
- Felder, S., Chanson, H. 2011. Energy dissipation down a stepped spillway with nonuniform step heights. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(11), pp.1543-1548. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000455](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000455)
- Felder, S., Guenther, P., Chanson, H., 2012. Air-water flow properties and energy dissipation on stepped spillways: A physical study of several pooled stepped configurations. Report CH 87/12, School of Civil Engineering, The University of Queensland, Brisbane, Australia.
- Felder, S., & Chanson, H. 2014. Effects of step pool porosity upon flow aeration and energy dissipation on a stepped spillway. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(4), p.04014002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000858](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000858)
- Ghaderi, A., Abbasi, S., & Di Francesco, S. (2021). Numerical Study on the Hydraulic Properties of Flow over Different Pooled Stepped Spillways. *Water*, 13(5), 710. <https://doi.org/10.3390/w13050710>

- Ghaderi, D., Ebrahimnezhadian, H., Mollazadeh, M. 2023. A three-dimensional study of flow characteristics over different forms of stepped-labyrinth spillways in the skimming flow regime. *AQUA-Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 72(8), pp.1415-1430. [https://doi: 10.2166/aqua.2023.030](https://doi.org/10.2166/aqua.2023.030)
- Ghaderi, D., Ebrahimnezhadian, H., Mollazadeh, M. 2024. Three-dimensional analysis of the performance of circular stepped spillways in the skimming flow regime. *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng*, 46, p. 415. <https://doi.org/10.1007/s40430-024-05004-8>
- Gonzalez, C. A., & Chanson, H. 2008. Physical modeling of stepped spillways with macro-roughness. *Journal of Hydraulic Research*, 46(2), pp. 226-238. <https://doi.org/10.1080/00221686.2008.9521858>
- Hirt, C.W., Nichols, B.D., 1981. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39(1), pp. 201-225. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(81\)90145-5](https://doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5)
- Ikinciogullari, E. (2021). Energy dissipation performance of the trapezoidal stepped spillway. *Journal of Engineering Research*, 11(2A), 131–142. <https://doi.org/10.36909/jer.13649>
- Iranpour, A., Egdernezhad, A & Heidarnejad, M. (2024) Numerical investigation of energy losses in baffled piano key weirs. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 3(1), 55-70. <https://doi.org/10.22034/nawee.2024.451817.1069> (In Persian).
- Majedi Asl, M., Momeni, M. R., Nikmehr, S & Omidpour Alavian, T. (2026) Laboratory and Numerical Investigation of Flow Rate in SMBF Flumes Using Flow3D and Comparison with Energy Equations. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 5(1), 1-20. <https://doi.org/10.22034/nawee.2025.517806.1152> (In Persian).
- Ohatsu, I., Yasuda, Y., Takahashi, M. 2004. Flow characteristics of stepped channel chutes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(9), 860-870. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2004\)130:9\(860\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:9(860))
- Peyras, L., Royet, P., Degoutte, G., 1991. Flow and energy dissipation over stepped gabion weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(5), pp. 707-717. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1992\)118:5\(707\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1992)118:5(707))
- Rajaratnam, N., 1990. Skimming flow in stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(4), pp. 587-591. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1990\)116:4\(587\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1990)116:4(587))
- Tabbara, M., 2004. Numerical simulation of flow over stepped spillways. In: Proceedings of the 4th International Conference on Fluvial Hydraulics, River Flow 2004, Napoli, Italy.
- Tabbara, M., Chatila, J., Awwad, R., 2005. Computational simulation of flow over stepped spillways. *Computers & Structures* 83 (27-28), pp.2215-2224. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2005.04.005>
- Teng, P., Yang, J., Pfister, M., 2021. Studies on the turbulence models for the flow over stepped spillways. *Journal of Hydraulic Research*, 59(4), pp. 636-648. <https://doi.org/10.1080/00221686.2020.1818306>
- Toro, M., Chanson, H. 2016. Energy dissipation and flow patterns on stepped spillways: effects of step geometry. *Journal of Hydraulic Research*, 54(4), pp.374-386. <https://doi.org/10.1080/00221686.2016.1147500>
- Valero, D., Bung, D. B., Crookston, B. M., 2023. Energy dissipation and cavitation potential on stepped spillways: the role of mesh resolution in CFD. *Journal of Hydraulic Engineering*, 149(2), pp. 04022031. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0002041](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0002041)
- Wan, X., Zhang, Y., Li, J., 2018. Numerical simulation of cavitation characteristics over high-speed stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering* 144(5), p.04018012. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001452](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001452)
- Zhai, Y., Liu, H., Wang, Y., 2024. Hydrodynamic characteristics and aeration inception on modified stepped spillways. *International Journal of Multiphase Flow*, 172: 104689. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2023.104689>
- Zhang, G., Chanson, H., Wang, H., 2022. Micro-pressure fluctuations and flow separation on step edges of a steep stepped chute. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 130: 110515. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2021.110515>