



Numerical Modeling of the Effect of Orifices in Stepped Spillways on Flow Energy Dissipation Using the FLOW-3D Model

Mehdi Daryaei¹ | Seyedeh Massomeh Sharifi² | Amirreza Shahriari³ |
SeyedMahmood Kashefipour⁴ | Mohammadreza Zayeri⁵

1. Corresponding Author, Department of Water Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: M.Daryaei@scu.ac.ir
2. Department of Water Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: Massoumeh.Sharifi96@gmail.com
3. Department of Water Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: A-Shahriari@stu.scu.ac.ir
4. Department of Water Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: kashefipour@scu.ac.ir
5. Department of Water Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: M.zayeri@scu.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Oct. 21, 2024

Revised: Dec. 20, 2024

Accepted: Jan. 13, 2025

Published online: May. 2025

Keywords:

Flow Energy Dissipation,
FLOW-3D Numerical Model,
Increased Discharge, Stepped
Spillway With Orifice.

ABSTRACT

Stepped spillways, as one of the most efficient hydraulic structures for energy dissipation, play a crucial role in reducing the destructive energy of water discharged from dam reservoirs. These structures, utilizing their geometric features, contribute to the dissipation of turbulent and supercritical flows. In this research, with the aim of increasing the efficiency of stepped spillways in energy dissipation, the effect of creating orifices on the spillway steps has been investigated. The FLOW-3D software was used for numerical simulation, and the model's accuracy was evaluated using statistical indicators. The simulation results indicate that the RNG turbulence model is capable of simulating turbulent flows over stepped spillways with high accuracy ($R^2=0.96$). Creating orifices on the floor of the steps, compared to the walls, generates greater energy dissipation. The outflow from the floor openings of the stepped spillway causes the water jet to collide with the overflow, resulting in greater energy dissipation. In contrast, wall openings, due to their alignment with the overflow direction, lead to less energy loss. Additionally, increasing the number of orifices led to improved spillway performance. Specifically, creating three orifices in the spillway floor was able to increase energy dissipation by 16% compared to the case without orifices (control). Furthermore, creating three orifices in the floor allows a higher discharge to pass through the spillway and increased the initial depth of the hydraulic jump downstream of the spillway by 40%. These results demonstrate the effectiveness of using orifices as an efficient method for improving the performance of stepped spillways in managing outflows from dams.

Cite this article: Daryaei, M., Sharifi, S. M., Shahriari, A., Kashefipour, S. M., & Zayeri, M., (2025) Numerical Modeling of the Effect of Orifices in Stepped Spillways on Flow Energy Dissipation Using the FLOW-3D Model, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (3), 589-606. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.383840.669816>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.383840.669816>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

In water engineering, controlling and guiding water flow is of paramount importance. One of the primary challenges in this field is managing the high kinetic energy of water during discharge from structures such as dams. This energy can cause severe damage to downstream structures and the environment. Stepped spillways have emerged as one of the most effective hydraulic structures for energy dissipation, which is crucial in reducing the destructive force of water exiting dams.

Stepped spillways, with their unique design, cause water to flow in a step-by-step manner, losing a significant portion of its kinetic energy at each stage. This energy dissipation process results in the formation of a smaller hydraulic jump downstream, consequently allowing for the construction of smaller stilling basins (Chanson, 2002).

While modifying the geometric structure of steps to increase energy dissipation is an effective approach, it faces practical challenges in large-scale implementations due to time and cost constraints. Additionally, the use of elements and structures installed on spillway steps can increase the likelihood of cavitation, potentially causing serious damage to the structure.

This research investigates the impact of creating orifices in spillway steps as a novel and cost-effective approach to enhance energy dissipation in stepped spillways. These orifices can contribute to increased energy dissipation by creating localized flows and enhancing turbulence between steps, while also potentially leading to better and more uniform flow distribution.

Materials and Methods

FLOW-3D is recognized as a powerful tool in hydraulic engineering due to its diverse capabilities, including accurate simulation of multiphase flows and fluid-structure interactions. The FLOW-3D model was calibrated using experimental data from a stepped spillway study conducted at the Hydraulic Laboratory of Shahid Chamran University of Ahvaz by Eslami (2017). The calibration process was based on data obtained from experiments on a simple stepped spillway (without gaps) at various flow rates (25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, and 60 liters per second), with a total of 8 experiments used for model validation.

Following calibration, six additional simulations were performed to investigate the effect of orifices on energy dissipation and flow rate improvement. In these simulations, three 3x3 cm orifices were placed on two spillway steps. The orifice configurations were designed to align with Eslami's (2017) experimental setups: one orifice in the center, two orifices at one-third and two-thirds of the step width, and three orifices at one-quarter, half, and three-quarters of the step width. All experiments with orifices were conducted at an inlet flow rate of 60 liters per second.

Results

The results demonstrate that increasing the number of orifices leads to enhanced interaction between the exiting jets and the main spillway flow, resulting in increased energy dissipation. Placing orifices at lower elevations was found to be more effective due to the higher velocity of exiting jets.

The study revealed that orifices on the step floor have a more significant impact on energy dissipation compared to those on the walls. Energy dissipation increased by 5%, 7%, and 9% for one, two, and three orifices, respectively. This enhanced dissipation is attributed to the upward movement of water jets from floor orifices, which collide with the main spillway flow, causing significant energy reduction and additional energy dissipation. Altogether, the creation of three floor orifices increased energy dissipation by approximately 16% compared to the control case.

Conclusion

This research validates the effectiveness of FLOW-3D in simulating stepped spillway flows with interacting jets from orifices. Using the RNG turbulence model, these flows were modeled with high accuracy ($R^2 = 0.96$ and $KGE = 0.94$).

The findings strongly support the efficacy of incorporating orifices in stepped spillway structures, especially when placed on step floors. The presence of orifices significantly increases energy dissipation, with the effect amplifying as the number of orifices increases. The configuration with three floor orifices showed the highest energy dissipation at 73% and increased the initial jump depth by 40%.

Future research should delve deeper into the phenomenon of intersecting flow interference as an innovative approach to controlling the destructive energy of dam outflows.

Author Contributions

1st Author: assisted in the data analysis, and guided the modeling process. 2nd Author: helping to complete numerical modeling, collecting and analyzing data. 3rd Author: collecting and analyzing data, writing the Persian version of this manuscript. 4th Author: provided expertise in data validation and analysis, 5th Author: helping to complete numerical modeling.

Data Availability Statement

The data presented in this manuscript was collected during the MS thesis program of the 2nd author and are available any time in request.

Acknowledgements

We are grateful to the Research Council of Shahid Chamran University of Ahvaz for financial support (GN: SCU.WH1402.31370).

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The authors declare there is no conflicts of interest.

مدل سازی عددی تأثیر ایجاد روزنه در سرریزهای پلکانی روی استهلاك انرژی جریان با استفاده از مدل FLOW-3D

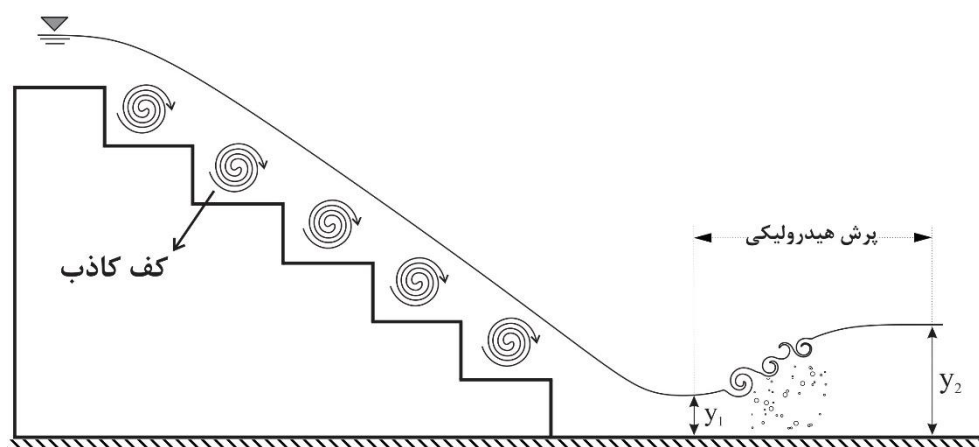
مهدی دریائی^۱ | سیده معصومه شریفی^۲ | امیررضا شهریار^۳ | سید محمود کاشفی پور^۴ | محمدرضا زایری^۵^۱. نویسنده مسئول، گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: M.Daryaei@scu.ac.ir^۲. گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: Massoumeh.Sharifi96@gmail.com^۳. گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: A-Shahriari@stu.scu.ac.ir^۴. گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: kashefipour@scu.ac.ir^۵. گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: M.zayiri@scu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	سرریزهای پلکانی به عنوان یکی از کارآمدترین سازه های هیدرولیکی برای استهلاك انرژی جریان، نقش مهمی در کاهش انرژی مخرب آب خروجی از مخازن سدها دارند. این سازه ها با بهره گیری از ویژگی های هندسی خود، به استهلاك جریان های آشفته و فوق بحرانی کمک می کنند. در این پژوهش، باهدف افزایش کارایی سرریزهای پلکانی در استهلاك انرژی، تأثیر ایجاد روزنه هایی بر روی پله های سرریز بررسی شده است. از نرم افزار FLOW-3D برای شبیه سازی عددی استفاده شد و دقت مدل با شاخص های آماری ارزیابی شد. نتایج شبیه سازی ها حاکی از آن است که مدل آشفتگی RNG با دقت بالایی قادر به شبیه سازی جریان های آشفته بر روی سرریزهای پلکانی است ($R^2 = 0.96$). ایجاد روزنه ها در کف پله ها نسبت به دیواره ها، استهلاك انرژی بیشتری ایجاد می کند. خروج جریان از روزنه های کف پلکان باعث برخورد جت آب به جریان عبوری از سرریز و کاهش بیشتر انرژی می شود. در مقابل، روزنه های دیواره ای به دلیل هم جهت بودن با جریان سرریز، افت انرژی کمتری ایجاد می کنند. همچنین، افزایش تعداد روزنه ها به بهبود عملکرد سرریز منجر شد. به طور مشخص، ایجاد سه روزنه در کف سرریز توانست افت انرژی را نسبت به حالت بدون روزنه (شاهد)، ۱۶ درصد افزایش دهد. علاوه بر این ایجاد سه روزنه در کف دبی بیشتری را از سرریز عبور می دهد و عمق اولیه پرش هیدرولیکی در پایین دست سرریز را ۴۰ درصد افزایش داد. این نتایج نشان دهنده اثربخشی استفاده از روزنه ها به عنوان یک روش کارآمد برای بهبود عملکرد سرریزهای پلکانی در مدیریت جریان های خروجی از سدها است.
واژه های کلیدی: استهلاك انرژی جریان، افزایش دبی عبوری، سرریز پلکانی با روزنه، مدل عددی FLOW-3D.	
استناد: دریائی؛ مهدی؛ شریفی؛ سیده معصومه، شهریار؛ امیررضا، کاشفی پور؛ سید محمود، زایری؛ محمدرضا (۱۴۰۴) مدل سازی عددی تأثیر ایجاد روزنه در سرریزهای پلکانی روی استهلاك انرژی جریان با استفاده از مدل FLOW-3D، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶ (۳)، ۵۸۹-۶۰۶.	
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.	© نویسندگان.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.383840.669816	https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.383840.669816



مقدمه

در مهندسی آب، کنترل و هدایت جریان آب از اهمیت بالایی برخوردار است. یکی از چالش های اصلی در این زمینه، مدیریت انرژی جنبشی بالای آب در هنگام تخلیه از سازه هایی مانند سدها است. این انرژی می تواند به سازه ها و محیط زیست پایین دست آسیب جدی وارد کند. سرریزهای پلکانی به عنوان یکی از مؤثرترین سازه های هیدرولیکی برای استهلاک انرژی جریان، نقش مهمی در کاهش نیروی مخرب آب هنگام خروج از سدها دارند. این سرریزها با طراحی پلکانی خود، باعث می شوند که جریان آب به صورت پله به پله از سرریز عبور کرده و در هر مرحله بخش قابل توجهی از انرژی جنبشی خود را از دست بدهد. این فرآیند استهلاک انرژی، تشکیل پرش هیدرولیکی کوچک تری در پایین دست سرریز را به همراه دارد که به تبع آن، امکان ساخت حوضچه آرامش با ابعاد کوچک تر فراهم می شود (Chanson, 2002). جریان های هیدرولیکی در سرریزهای پلکانی به سه دسته ریزشی، غیر ریزشی و انتقالی تقسیم می شوند (Rajaratnam, 1990). جریان ریزشی در دبی های کم و پله های بلند رخ می دهد. در جریان غیر ریزشی، یک بستر کاذب بین پله ها شکل می گیرد که جریان های گردابی زیر آن باعث استهلاک انرژی می شوند (Chanson and Toombes, 2004). جریان انتقالی نیز حد واسط این دو نوع جریان است و ویژگی های هر دو را به همراه دارد (شکل ۱).



شکل ۱. نمایی از جریان ریزشی در یک سرریز پلکانی و پرش هیدرولیکی در پایین دست

علاقه کنونی به سرریزهای پلکانی عمدتاً به دلیل تکنیک های جایگذاری بتن غلتکی (RCC) است که به طور طبیعی منجر به ایجاد سرریزهای پلکانی می شود. در واقع، RCC امکان ایجاد سرریزهای پلکانی را با هزینه و زمان کمتر فراهم کرده و به همین دلیل محبوبیت این نوع سرریزها افزایش یافته است (Khatursia, 2004). این سرریزها همچنین به بهبود انتقال هوا به آب کمک می کنند (Chanson, 2022; Salmasi et al., 2021).

باوجود مزایای متعدد سرریزهای پلکانی، بهینه سازی عملکرد آن ها همواره مورد توجه محققان و مهندسان بوده است. مطالعات گسترده ای در زمینه بهبود طراحی این سرریزها، افزایش میزان استهلاک انرژی و بهینه سازی الگوی جریان در آن ها صورت گرفته است. بخش قابل توجهی از این مطالعات بر اصلاح هندسه و ویژگی های پله های سرریز متمرکز بوده است.

Roshan et al. (2010)، عملکرد دو مدل فیزیکی سرریز پلکانی با تعداد پله های متفاوت را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که الگوی استهلاک انرژی در این دو مدل متفاوت است. در دبی های پایین، میزان اتلاف انرژی در هر دو مدل تقریباً یکسان بود. اما در شرایط جریان غیر ریزشی و دبی های بالاتر، تفاوت قابل توجهی مشاهده شد. مدل با ۱۲ پله حدود ۱۲ درصد استهلاک انرژی بیشتری نسبت به مدل ۲۳ پله ای از خود نشان داد. Moghaddam et al. (2017) نتایج تحقیق خود را بر روی سرریزهای پلکانی با پله های معکوس شیب دار (در زوایای ۷، ۱۰، و ۱۲ درجه) ارائه کردند. یافته های آن ها نشان داد که استفاده از پله های معکوس شیب دار نسبت به پله های افقی تنها به افزایش اندکی در نرخ استهلاک انرژی منجر می شود.

Ashoor and Riazi (2019) نشان دادند که در سرریزهای پلکانی با پله های غیریکنواخت، اتلاف انرژی تا ۲۰ درصد افزایش می یابد. Zhou et al. (2021) بر توسعه و ارزیابی یک نوع جدید از سرریز پلکانی به نام سرریز پلکانی پرش هیدرولیکی (HJSS) کار کردند و نتیجه گرفتند که این سرریز در مقایسه با سرریز پلکانی سنتی، بهبود عملکرد هیدرولیکی قابل توجهی از جمله افزایش استهلاک

انرژی، عملکرد بهتر در جذب هوا و توزیع فشار منطقی‌تر را فراهم می‌کند. (Ghaderi et al. (2023) با جایگزینی پله‌های ساده با هندسه‌های پیچیده‌تر مانند دوزنقه‌ای و مستطیلی مجزا در سرریزهای پلکانی، به بررسی رفتار جریان پرداختند. شبیه‌سازی‌های عددی نشان داد که این تغییرات هندسی منجر به افزایش قابل‌توجه استهلاک انرژی به میزان ۳۵٪ و ۲۱٪ در مقایسه با سرریزهای پلکانی معمولی، به ترتیب در حالت‌های پله‌های دوزنقه‌ای و مستطیلی شده است.

مطالعات آزمایشگاهی (KC and Crookston (2024) نشان داد که ایجاد لبه‌های مورب در پله‌های سرریز پلکانی تأثیر خوبی بر عملکرد هیدرولیکی و استهلاک انرژی دارند. این لبه‌ها به بهبود هوادهی جریان و کاهش سرعت جریان کمک می‌کنند. با این حال، در این نوع هندسه، برای انتقال به جریان غیرریزشی، نیاز به دبی‌های بیشتری است. نتایج تحقیقی که پله‌های منحنی شکل را جایگزین پله‌های ساده کرده بود نشان داد این هندسه منحنی توانسته تا ۱۰ درصد استهلاک انرژی را نسبت به حالت ساده آن افزایش دهد (Jahad et al., 2024) تحقیقی دیگر، همگرایی دیواره را بر عملکرد سرریزهای پلکانی مورد بررسی قرار داد (Liu et al., 2025).

سرکمریان و احدیان (۱۳۹۶) با استفاده از مدل عددی CFX، به بررسی تأثیر پارامترهای هندسی پلکان‌ها و دبی جریان بر میزان استهلاک انرژی در سرریز پلکانی پرداختند و نتایج نشان داد که افزایش دو برابری ارتفاع پله در شرایط ثابت ماندن شیب سرریز، موجب افزایش ۲۴ درصدی استهلاک انرژی می‌شود.

ناصری و کاشفی پور (۱۴۰۱) در پژوهشی به بررسی تأثیر تخلخل سرریزهای پلکانی گابیونی بر استهلاک انرژی و مشخصات پرش هیدرولیکی پایین‌دست پرداختند. آن‌ها با مقایسه مدل‌های فیزیکی سرریز پلکانی گابیونی با تخلخل‌های مختلف و سرریز پلکانی نفوذناپذیر دریافتند که سرریزهای گابیونی علاوه بر کاهش قابل توجه طول پرش هیدرولیکی، افت انرژی بیشتری نسبت به نوع نفوذناپذیر ایجاد می‌کنند. بیشترین افت انرژی در مدل با تخلخل ۴۵ درصد مشاهده شد که ۸ درصد بیشتر از سرریز نفوذناپذیر بود. همچنین Simões et al. (2024) معادلات بی بعد برای حوضچه آرامش پایین‌دست سرریز پلکانی را بررسی کردند.

امین‌وش و روشنگر (۱۴۰۲)، تأثیر تغییر شیب پیشانی پله‌های سرریز پلکانی با تاج نیم‌دایره‌ای بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش زاویه پیشانی پله نسبت به افق، استهلاک انرژی جریان افزایش می‌یابد.

برخی دیگر از محققان به بررسی تأثیر افزودن سازه‌ها و المان‌های اضافی بر روی پله‌ها پرداختند. این مطالعات نشان می‌دهند که اضافه کردن این المان‌ها می‌تواند جریان را متلاطم‌تر کند و مقاومت بیشتری در برابر آن ایجاد کند که در نهایت منجر به بهبود عملکرد سرریزها و افزایش کارایی آن‌ها در کاهش انرژی جریان می‌شود.

روشنگر و اخگر (۱۳۹۸) با افزودن المان‌های گوه‌ای شکل روی پله‌های سرریز، تأثیر این تغییرات را بر ارتفاع آب در پایین‌دست سرریز، و استهلاک انرژی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که استهلاک انرژی به میزان ۲۵ تا ۴۵ درصد افزایش و عمق ثانویه ۱۵ تا ۳۵ درصد کاهش یافته است. اصغری پری و همکاران (۱۴۰۲) به بررسی اثرات قرارگیری یک مانع متخلخل سه‌بعدی پیوسته بر روی پله‌های سرریز پلکانی پرداختند. نتایج نشان می‌دهند که در رژیم جریان ریزشی، وجود این موانع می‌تواند تا ۵ درصد استهلاک انرژی بیشتری نسبت به حالت شاهد ایجاد کند، اما در رژیم‌های جریان انتقالی و غیر ریزشی، این تأثیر مثبت نیست. قادری و عباسی (۱۴۰۲)، تأثیر استفاده از المان‌های مکعبی شکل روی پله‌های سرریز پلکانی برای افزایش استهلاک انرژی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج شبیه‌سازی با نرم‌افزار FLOW-3D نشان داد که این المان‌ها باعث کاهش سرعت جریان تا ۱۰ درصد، افزایش انرژی جنبشی آشفته تا ۵۴ درصد، و افزایش استهلاک انرژی تا ۶ درصد نسبت به سرریزهای پلکانی ساده می‌شوند. (Moghadam et al. (2020) با شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار FLOW-3D، اثربخشی استفاده از بلوک‌ها در افزایش استهلاک انرژی جریان روی سرریز را تا ۸/۵ درصد تایید کردند. مطالعات آزمایشگاهی و عددی نشان داد که افزودن بفل‌ها در پایین‌دست سرریز پلکانی می‌تواند به بهبود قابل توجه استهلاک انرژی منجر شود (Pujari et al., 2023; Nasralla, 2022).

(Farooq et al. (2024) به مطالعه عددی سرریزهای پلکانی معمولی و سرریزهای پلکانی حوضچه‌دار با استفاده از مدل CFD و روش VOF پرداختند. آن‌ها با بررسی دو نوع سرریز پلکانی معمولی و دو نوع سرریز پلکانی حوضچه‌دار، نشان دادند که سرریزهای حوضچه‌دار عملکرد بهتری در استهلاک انرژی و پایداری جریان دارند. (Crookston et al. (2024) به بررسی استفاده از سرریز لایبرنتی بر تاج سرریز پلکانی پرداختند و نشان دادند که این ترکیب باعث افزایش هوادهی اما کاهش استهلاک انرژی نسبت به سرریزهای پله‌ای با تاج خطی می‌شود.

اگرچه تغییر در ساختار هندسی پله‌ها باهدف افزایش استهلاک انرژی یک راهکار مؤثر و کارآمد محسوب می‌شود، اما در عمل با

چالش هایی روبه رو است. به دلیل تعداد زیاد پله ها در سرریز سدها، پیاده سازی این تغییرات در مقیاس واقعی، فراتر از شرایط آزمایشگاهی، می تواند بسیار زمان بر و پرهزینه باشد. علاوه بر این، استفاده از المان ها و سازه هایی که بر روی پله های سرریز نصب می شوند، احتمال بروز پدیده کاویتاسیون را افزایش داده و می تواند منجر به آسیب های جدی به سازه شود. این مسائل، نیاز به ارائه رویکردهای جدید و کم هزینه تر برای بهبود استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی را آشکار می سازد. هدف این پژوهش بررسی تأثیر استفاده از روزنه ها در پله های سرریز پلکانی به منظور افزایش استهلاک انرژی جریان است. این روزنه ها با ایجاد جریان های متقاطع و آشفتگی موضعی، می توانند به عنوان روشی مؤثر برای بهبود عملکرد سرریزهای پلکانی عمل کنند. با افزایش اختلاط جریان بین پله ها، روزنه ها به کاهش انرژی جریان خروجی کمک کرده و کارایی سرریز را در مدیریت انرژی های مخرب ناشی از جریان های پرانرژی بهبود می بخشد. از طرفی تقسیم جریان بین روزنه ها و سطح سرریز می تواند منجر به توزیع بهتر و یکنواخت تر جریان شود.

در این راستا، از مدل عددی FLOW-3D استفاده شد که تحقیقات متعددی کارایی آن را در شبیه سازی جریان های سرریزهای پلکانی تأیید کرده اند (Güven and Mahmood, 2020; İkinciogulları, 2023; Mohammad Rezapour Tabari and Tavakoli, 2016; Saqib et al., 2022). این نرم افزار به دلیل برخورداری از قابلیت های متنوع، از جمله شبیه سازی دقیق جریان های چندفازی و تعامل سیال با سازه ها، به عنوان یک ابزار قدرتمند در مهندسی هیدرولیک شناخته می شود.

مواد روش ها

معرفی مدل عددی

نرم افزار FLOW-3D یکی از نرم افزارهای پیشرفته در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) است که قابلیت شبیه سازی جریان های مختلف را داراست. در تحلیل جریان های تراکم ناپذیر، FLOW-3D از روش حجم محدود برای حل معادلات ناویر استوکس بر روی یک شبکه محاسباتی استفاده می نماید.

این نرم افزار حرکت جریان را با حل معادلات RANS (میانگین رینولدز ناویر استوکس) توصیف می کند که به صورت معادله (۱) بیان می شود:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left(u_j A_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + G_i + f_i \quad \text{رابطه ۱}$$

در معادله (۱) میانگین سرعت، V_f حجم سیال در هر سلول، A_j مساحت کسری برای جریان باز، P فشار هیدرواستاتیک، ρ دانسیته، G_i شتاب گرانشی و f_i تنش رینولدز هستند. FLOW-3D عملکرد خوبی برای اندازه گیری سطح آب به روش ویژه حجم سیال (VOF) دارد (Hirt and Nichols, 1981). همچنین این مدل قابلیت برقراری ارتباط مایع - مایع و هوا در یک شبکه مستطیلی شکل را دارا می باشد. معادلات پیوستگی و مومنتم برای یک سیال غیر قابل تراکم به صورت معادله (۲) می باشد:

$$\frac{\partial}{\partial x} (u A_x) + \frac{\partial}{\partial y} (v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (w A_z) = 0 \quad \text{رابطه ۲ الف}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left(u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x + F_x \quad \text{رابطه ۲ ب}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left(u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + G_y + F_y \quad \text{رابطه ۲ ج}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left(u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + G_z + F_z \quad \text{رابطه ۲ د}$$

در این معادلات V_f کسر حجم باز با جریان، A_x, A_y, A_z به ترتیب کسر سطوح باز جریان در سه جهت مختصات x, y, z ، پارامتر P معرف فشار، G_x, G_y, G_z و F_x, F_y, F_z به ترتیب ترم های شتاب گرانشی و شتاب ویسکوز را در سه جهت مختصات x, y, z نشان می دهد.

مدل سازی ها

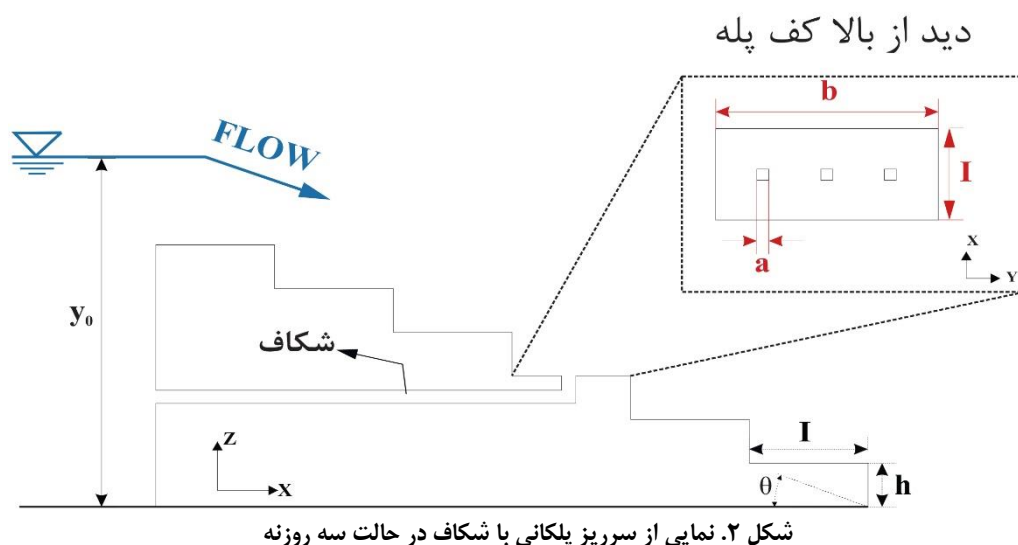
در این پژوهش، برای اطمینان از دقت و صحت شبیه سازی های عددی در نرم افزار FLOW-3D، از داده های آزمایشگاهی به دست آمده از تحقیقات اسلامی (۱۳۹۶) استفاده شد. این داده ها مربوط به آزمایش های انجام شده بر روی سرریز پلکانی ساده (بدون شکاف) در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز بودند. این آزمایش ها در دبی های مختلف (۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵، ۵۰، ۵۵ و ۶۰ لیتر بر ثانیه) انجام شدند و در مجموع، ۸ شبیه سازی برای صحت سنجی مدل عددی مورد استفاده قرار گرفت. در ادامه به عنوان یک راهکار برای افزایش

استهلاک انرژی و بهبود میزان دبی عبوری از سرریز، شش شبیه‌سازی دیگر انجام شد (جدول ۱).

جدول ۱. سناریوهای مورد بررسی در حضور روزنه

تعداد روزنه (n)	موقعیت روزنه	شماره شبیه‌سازی
۳		S1
۲	روزنه در کف	S2
۱		S3
۳		S4
۲	روزنه در دیواره	S5
۱		S6

در این شبیه‌سازی‌ها، سه روزنه با ابعاد 3×3 سانتی‌متر، در دو پله سرریز قرار داده شد. محل قرارگیری روزنه‌ها به گونه‌ای طراحی شد که با حالت‌های آزمایشگاهی اسلامی (۱۳۹۶) هم‌خوانی داشته باشد؛ به این ترتیب که در حالت یک روزنه، در وسط عرض پله قرار داده شد؛ در حالت دو روزنه، در فواصل یک‌سوم و دو سوم عرض پله؛ و در حالت سه روزنه، در فواصل یک‌چهارم، دوچهارم و سه‌چهارم عرض پله‌ها تعبیه شد. تمام شبیه‌سازی‌هایی که در حضور روزنه‌ها انجام شدند، با دبی ورودی ثابت 60 لیتر بر ثانیه صورت گرفتند. پارامترهای مؤثر این مطالعه شامل ویژگی‌های جریان نظیر دبی جریان (Q) و عمق جریان (y) و انرژی جریان (E) و نیز ابعاد هندسی سرریز مانند طول افقی پله (I)، عرض پله (b)، ارتفاع پله (h)، تعداد پله (N)، عرض شکاف (a)، تعداد روزنه (n) و زاویه شیب سرریز (θ) در نظر گرفته شده‌اند (شکل ۲).



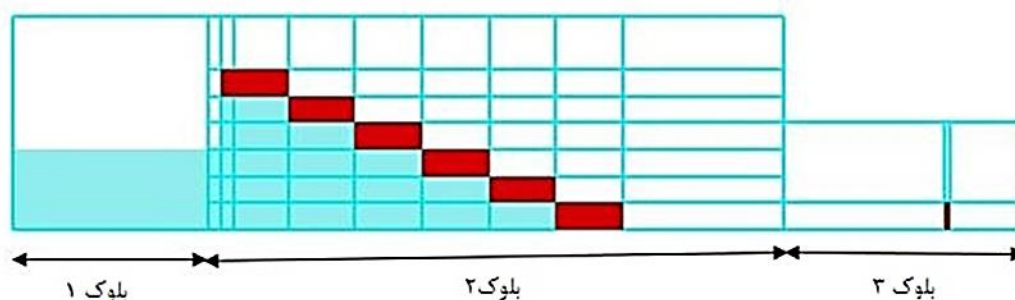
برای تعریف مقاطع مختلف جریان، از اندیس‌های عددی استفاده شده است. اندیس صفر نشان‌دهنده مشخصات جریان در مقطع قبل از ورود به سرریز است. اندیس یک به مقطع اولیه پرش هیدرولیکی اشاره دارد، یعنی نقطه‌ای که پرش هیدرولیکی آغاز می‌شود. اندیس دو نیز مشخص‌کننده مقطع ثانویه پرش، یعنی نقطه‌ای است که پرش هیدرولیکی پایان می‌یابد و جریان به حالت پایدار خود می‌رسد. همچنین y_c عمق آب روی تاج سرریز (عمق بحرانی) می‌باشد. پارامترهای ثابت تحقیق حاضر معادل $N=6$ ، $a=2 \text{ cm}$ ، $h=10 \text{ cm}$ ، $I=25 \text{ cm}$ ، $b=56 \text{ cm}$ ، $\theta=21^\circ$ در نظر گرفته شدند. در رابطه (۳)، درصد استهلاک انرژی به عنوان یکی از پارامتری مهم در سرریزهای پلکانی بیان شده است. این پارامتر نشان‌دهنده میزان کاهش انرژی جنبشی آب هنگام عبور از پله‌های سرریز است. با محاسبه درصد استهلاک انرژی، می‌توان کارایی طرح‌های مختلف سرریز را در کاهش انرژی مخرب جریان مقایسه و ارزیابی کرد.

$$\frac{\Delta E}{E_0} = \frac{E_0 - E_1}{E_0}$$

رابطه (۳)

جزئیات شبیه سازی

شکل ۳، ساختار مش بندی مدل عددی را نمایش می دهد که شامل سه مش بلاک است. متوسط اندازه مش بلاک ۱ برابر با ۰/۰۳۵ متر است. مش بلاک ۲ که مربوط به پله های سرریز است، دارای مش ریزتر با اندازه ای بین ۰/۰۰۹۷ متر است تا بتواند جزئیات بیشتر جریان و تداخلات را در این بخش مهم ممدل سازی کند. در نهایت، مش بلاک ۳ دارای متوسط اندازه مش ۰/۰۱۴ متر است. این توزیع غیر یکنواخت اندازه مش، به بهینه سازی دقت شبیه سازی در بخش های کلیدی کمک کرده و در عین حال از حجم بالای محاسباتی غیر ضروری جلوگیری می کند. درحالی که سرریز پلکانی دارای روزنه بود برای اینکه داده ها قابل اعتماد تر و شکل روزنه به درستی و واضح تر نمایش داده شود مش ریزتری به اندازه ۰/۰۰۵ متر برای مش بلاک ۲ انتخاب شد.



شکل ۳. نمایی از ساختار مش بندی

در تحقیق حاضر برای برقراری تعادل و تثبیت پرش در پنجه سرریز از یک مانع در نزدیکی انتهای بلوک سوم استفاده شد. همچنین، طول فلوم از ۷/۵ متر در شرایط واقعی به ۳ متر در مدل شبیه سازی کاهش یافت. این تصمیم بر اساس مشاهدات اولیه اتخاذ شد که نشان می داد طول فلوم تأثیر قابل توجهی بر پرش هیدرولیکی و پارامترهای مورد مطالعه ندارد. کاهش ۴/۵ متری طول فلوم با هدف بهینه سازی زمان شبیه سازی و کاهش حجم محاسبات صورت گرفت. پس از اجرای مدل و تحلیل داده های به دست آمده، مشخص شد که این تغییر در طول فلوم تأثیر معناداری بر نتایج نداشته است. شرایط مرزی این تحقیق بطور کامل در جدول ۲ تشریح شده است.

جدول ۲. شرایط مرزی شبیه سازی

شماره مش	راستا	نوع مرز	معادلات شرط مرزی
مش بلاک ۱	Y_{min}	Wall	$?p/\gamma_x = 0 = u$
	Y_{max}	Wall	
	X_{min}	Wall	
	X_{max}	Symmetry	$?p/\gamma_x = ?u/\gamma_x = 0$
	Z_{min}	Volume flow rate	$u = u_0, \partial p / \partial x = 0$
مش بلاک ۲	Z_{max}	Symmetry	$?p/\gamma_x = ?u/\gamma_x = 0$
	Y_{min}	Wall	$?p/\gamma_x = 0 = u$
	Y_{max}	Wall	
	X_{min}	Symmetry	$?p/\gamma_x = ?u/\gamma_x = 0$
	X_{max}	Symmetry	
مش بلاک ۳	Z_{min}	Wall	$?p/\gamma_x = 0 = u$
	Z_{max}	Symmetry	$?p/\gamma_x = ?u/\gamma_x = 0$
	Y_{min}	Wall	$?p/\gamma_x = 0 = u$
	Y_{max}	Wall	
	X_{min}	Symmetry	$?p/\gamma_x = ?u/\gamma_x = 0$
مش بلاک ۳	X_{max}	Outflow	$?u/\gamma_x = 0, p = f(x)$
	Z_{min}	Wall	$?p/\gamma_x = 0 = u$
	Z_{max}	Symmetry	$?p/\gamma_x = ?u/\gamma_x = 0$

در مقاله حاضر مدل تلاطم RNG به منظور کالیبراسیون مدل عددی مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت بر اساس نتایج شاخص های آماری در خصوص بررسی دقت، مدل RNG جهت ممدل سازی استفاده گردید. معادلات حاکم برای حل مدل آشفتگی RNG به صورت زیر می باشند:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho K) + \frac{\partial}{\partial X_i}(\rho K U_i) = \frac{\partial}{\partial X_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_K} \right) \frac{\partial K}{\partial X_j} \right] + P_K - \rho \varepsilon \quad \text{رابطه ۴ الف}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial X_i}(\rho \varepsilon U_i) = \frac{\partial}{\partial X_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial X_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{K} P_K - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{K} \quad \text{رابطه ۴ ب}$$

که در روابط فوق انرژی جنبشی تلاطمی (TKE)، ε نرخ اتلاف انرژی، ρ دانسیته، t زمان، X_i مختصات در راستای محور i ، μ ویسکوزیته دینامیکی، μ_t ویسکوزیته دینامیکی متلاطم و P_K معادله انتقال انرژی جنبشی تلاطمی می‌باشد. همچنین پارامترهای $C_{1\varepsilon}$ ، $C_{2\varepsilon}$ ، σ_K ، σ_ε مقادیر ثابت و به ترتیب معادل ۰/۷۱۹۴، ۰/۷۱۹۴، ۰/۱۶۸ و ۱/۴۲ می‌باشند (Yakhov et al. 1992). پارامتر μ_t بر اساس معادله (۵) تعیین می‌شود. در این معادله پارامتر C_μ ثابت و معادل ۰/۰۸۴۵ می‌باشد.

$$\mu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \text{رابطه ۵}$$

شاخص‌های ارزیابی خطا

در این پژوهش، برای مقایسه داده‌های آزمایشگاهی و مدل عددی، از شاخص‌های آماری متنوعی استفاده شد (رابطه ۶). به منظور ارزیابی دقیق، شاخص‌های آماری 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 (Kalateh et al., 2024; Daryae et al., 2021).

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |x_{ip} - x_{im}|}{N_t} \quad \text{رابطه ۶ الف}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ip} - x_{im})^2} \quad \text{رابطه ۶ ب}$$

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{x_{ip} - x_{im}}{x_{ip}} \right|}{N_t} \times 100 \quad \text{رابطه ۶ ج}$$

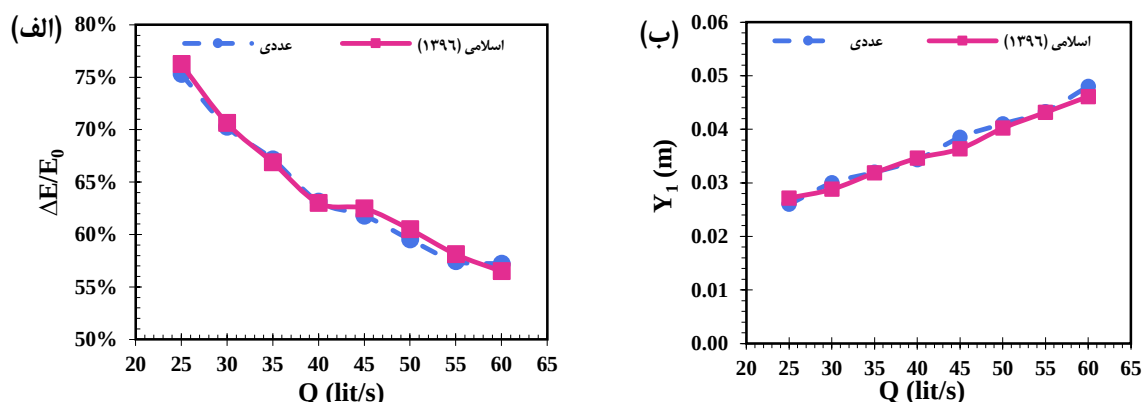
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (x_{ip} - x_{im})^2}{\sum_{i=1}^N (x_{ip} - \bar{x})^2} \quad \text{رابطه ۶ د}$$

$$KGE = 1 - \sqrt{[(R - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2]} \quad \text{رابطه ۶ ه}$$

در روابط بالا، میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده، x_{ip} مقادیر اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی و x_{im} مقادیر محاسبه شده توسط مدل عددی FLOW-3D می‌باشد. همچنین R ضریب همبستگی پیرسون بین مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده، α نسبت انحراف معیار مقادیر عددی به انحراف معیار مقادیر آزمایشگاهی و β نسبت میانگین مقادیر عددی به میانگین مقادیر آزمایشگاهی است. همچنین N_t تعداد داده‌هاست.

نتایج و بحث

در این بخش، هدف بررسی عملکرد مدل عددی FLOW-3D و میزان تطابق خروجی‌های آن با داده‌های واقعی است (اسلامی، ۱۳۹۶). در این پژوهش، تنها مدل آشفتگی RNG مورد استفاده قرار گرفته است. شکل ۴ مقایسه داده‌های عددی و آزمایشگاهی سرریز پلکانی را برای دو پارامتر عمق اولیه پرش و درصد استهلاک انرژی نشان می‌دهد.



شکل ۴. مقایسه داده‌های آزمایشگاهی اسلامی (۱۳۹۶) و مدل عددی؛ (الف) درصد استهلاک انرژی، (ب) عمق اولیه پرش

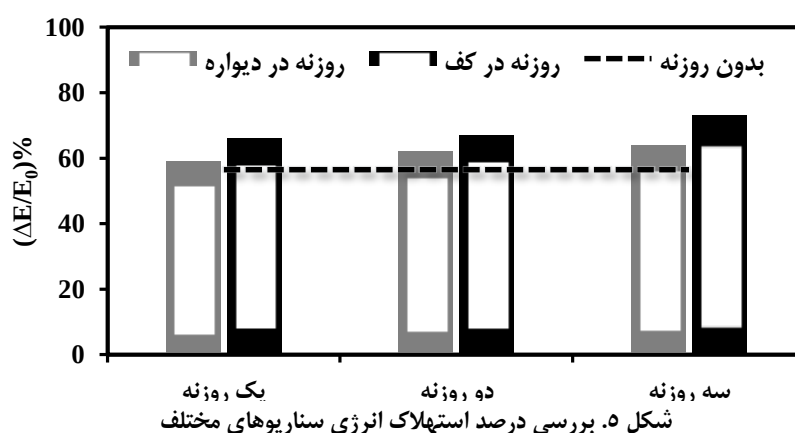
با توجه به شاخص‌های خطای ارائه شده در جدول ۳، نتایج به دست آمده از این مدل نشان دهنده دقت و کارایی مناسب آن در شبیه سازی رفتار جریان است. از آنجایی که مدل RNG توانسته است به خوبی نتایج آزمایشگاهی را پیش بینی کند، به استناد تحقیقات سایر محققین که تأییدکننده این نتایج هستند، از بررسی مدل های آشفتگی دیگر صرف نظر شده است (Ashour & Salah, 2023; Ghaderi et al., 2024; Ikinciogullari, 2023; Roushangar et al., 2022; Sabahi, 2024). همچنین نوروزی و احدیان (۱۳۹۴) و طاهری طلاوری و همکاران (۱۴۰۳) در پژوهش های خود کارایی این مدل را در شرایط مختلف تأیید کرده اند.

جدول ۳. مقایسه داده های عددی و آزمایشگاهی بر اساس شاخص های خطا

parameter	R ²	RMSE	MAE	MAPE	KGE
$\Delta E/E_0$ (-)	۰/۹۳	۰/۴۱	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۰۶	۰/۹۷
y_1 (m)	۰/۹۹	۰/۰۶۹ m	۰/۰۰۰۹ m	۰/۰۰۲	۰/۹۱

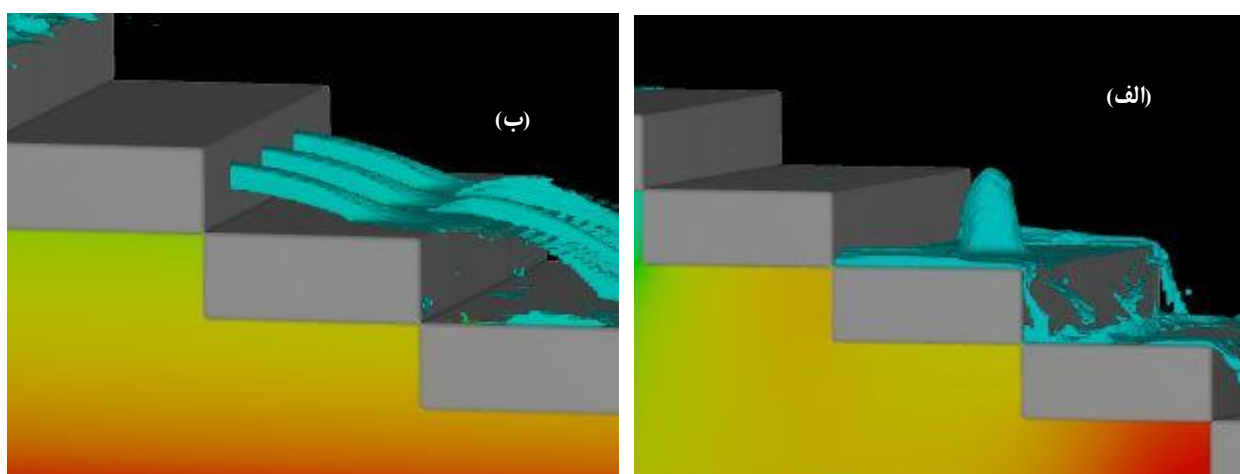
در این تحقیق ابتدا بکارگیری سه روزنه مربعی با ابعاد 1×1 ، 3×3 و 5×5 بررسی شد. نتایج نشان داد روزنه های 1×1 و 3×3 بیشترین استهلاک انرژی را داشتند، اما تفاوت زیادی بین آنها نبود. روزنه 5×5 به تعادل نرسید و پرش هیدرولیکی تثبیت نشد. به دلیل نیاز به مش بندی دقیق تر برای روزنه 1×1 و زمان بر بودن شبیه سازی آن، از روزنه 3×3 استفاده شد که کارایی مشابهی داشت.

در ادامه به منظور بررسی تاثیر تعداد روزنه (n) بر روی میزان استهلاک انرژی جریان در سرریز پلکانی سناریوهایی با $n=1, 2, 3$ و با ابعاد $a=2 \times 2$ cm تعریف شد. برای هر سناریو روزنه ها یک بار روی پله ۲ و ۴ و در کف و یک بار روی پله ۱ و ۳ و در دیواره پلکان طراحی و میزان افت انرژی در این حالات بررسی و در مجموع ۶ سناریو تعریف شد. همان طور که در شکل ۵ مشاهده می شود، در هر دو حالت کارگذاری روزنه در کف و دیواره، با افزایش تعداد روزنه ها از ۱ به ۳، میزان افت انرژی افزایش یافته است. این افزایش برای روزنه های کف ۵ درصد و برای روزنه های دیواره حدود ۷ درصد است. همچنین، ایجاد سه روزنه در کف نسبت به حالت شاهد، افت انرژی را تقریباً ۱۶ درصد افزایش داده است.



شکل ۵. بررسی درصد استهلاک انرژی سناریوهای مختلف

افزایش تعداد روزنه‌ها موجب تشدید برخورد جت‌های خروجی از روزنه با جریان عبوری از روی سرریز می‌شود که نتیجه آن افزایش افت انرژی است. از سوی دیگر، قرارگیری روزنه‌ها در پله‌های بالاتر باعث کاهش سرعت جت‌های خروجی می‌شود؛ بنابراین، روزنه‌ها در پله‌های با تراز پایین‌تر جایگذاری شدند. نتایج نشان می‌دهد که وجود روزنه در کف پلکان نسبت به دیواره تأثیر بیشتری بر استهلاک انرژی دارد. به‌طوری که برای تعداد روزنه‌های ۱، ۲ و ۳، میزان افت انرژی روزنه در کف نسبت به دیواره به ترتیب ۷، ۵ و ۹ درصد افزایش یافته است. با دقت در شکل ۶ مشاهده می‌شود که هنگام خروج جریان از روزنه‌های کف پلکان، جت آب به سمت بالا حرکت کرده و با جریان عبوری از سرریز برخورد می‌کند. این برخورد و تغییر جهت جریان، منجر به کاهش قابل‌توجه انرژی و افزایش استهلاک آن می‌شود. در مقابل، در حالتی که روزنه‌ها در دیواره پلکان قرار دارند، به دلیل هم‌جهت بودن خروج آب با جریان عبوری، میزان افت انرژی کمتر است. همچنین، سرعت جت خروجی در حالت روزنه‌های دیواره نسبت به روزنه‌های کف بیشتر است. علت کم بودن سرعت خروج آب از روزنه‌های کف، نیروی وزن جت آب است که در جهت مخالف نیروی گرانش و به سمت بالا حرکت می‌کند.



شکل ۶. جت تشکیل شده قبل از عبور آب از سرریز؛ (الف) روزنه در کف، (ب) روزنه در دیواره

در ادامه $(q_d)\%$ ، درصد دبی عبوری از روزنه که در رابطه (۷) معرفی شده است، برای سناریوهای این تحقیق مطابق جدول ۴ مورد بررسی قرار گرفت:

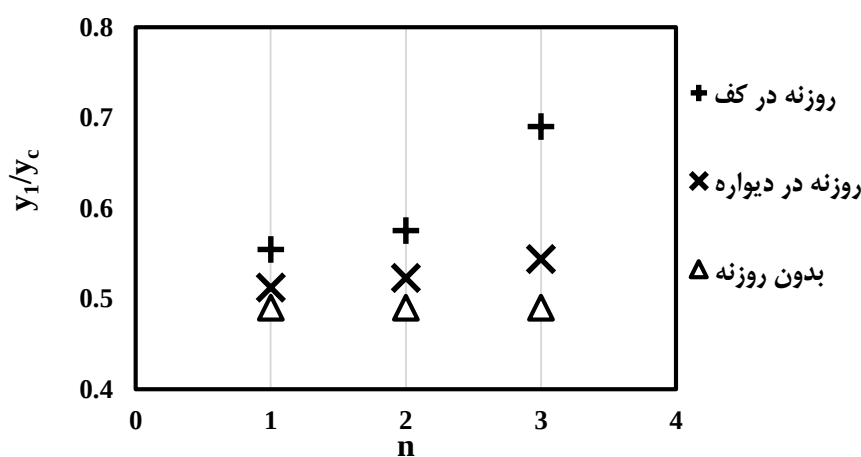
$$q_d = \frac{q}{Q} \times 100 \quad \text{رابطه (۷)}$$

که در رابطه بالا $\sum q$ برابر است با مجموع دبی خروجی از هر روزنه و Q دبی کل ورودی هاباشد. دبی خروجی از روزنه‌ها با استفاده از سرعت خروج جت آب از روزنه محاسبه شد. برای این منظور، سرعت خروج جت در سطح مقطع روزنه ضرب گردید تا دبی خروجی از هر روزنه به دست آید. در جدول ۴ نتایج این محاسبات قرار گرفته است. در این جدول V_{G1} ، V_{G2} ، V_{G3} به ترتیب سرعت جت خروجی از روزنه اول، دوم و سوم است. همچنین Q_{G1} ، Q_{G2} ، Q_{G3} به ترتیب نشان‌دهنده دبی خروجی از روزنه‌های اول و دوم و سوم است. نتایجی که در جدول ۴ نمایش داده شده است نشان می‌دهد که سرعت جت خروجی آب از روزنه در پله ۴ بیشتر از سرعت خروج جت آب در پله ۲ است. این افزایش سرعت را می‌توان به افزایش ارتفاع ستون آب پشت روزنه در پله‌های پایین‌تر نسبت داد. علاوه بر این، مقایسه سرعت جت خروجی در روزنه‌های تعبیه شده در دیواره با روزنه‌های کف نشان می‌دهد که سرعت در روزنه‌های دیواره بیشتر است. این تفاوت را می‌توان به جهت حرکت جت خروجی و تأثیر نیروی وزن بر آن مرتبط دانست. در بررسی عملکرد هیدرولیکی مشخص شد که سرریز پلکانی با سه روزنه بطور میانگین ۲۱/۲ درصد از کل دبی را از طریق روزنه‌ها تخلیه می‌کند. برای حالتی که روزنه‌ها در دیواره جایگذاری شده‌اند به دلیل افزایش سرعت جت خروجی از روزنه، درصد دبی عبوری از روزنه‌ها به ۲۲/۲۳ درصد می‌رسد. در مجموع حضور روزنه در تمام حالات به کاهش بار آبی روی سرریز کمک می‌کند. این یافته‌ها بیانگر این است که سرریز پلکانی با روزنه می‌تواند در زمان سیلاب، با تخلیه دبی بیشتر، هم‌زمان پایداری و تعادل خود را حفظ کند. این امر نشان‌دهنده اثربخشی بالای این ترکیب در مدیریت جریان‌های شدید و مهار انرژی است که در نهایت به افزایش کارایی سازه در شرایط بحرانی می‌انجامد.

جدول ۴. نتایج آزمایش های انجام شده در تحقیق حاضر

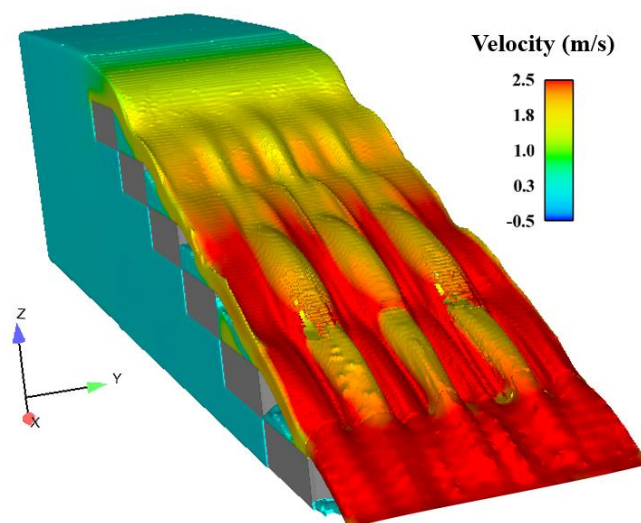
موقعیت روزنه	n	محل روزنه	V_{G1} (m/s)	V_{G2} (m/s)	V_{G3} (m/s)	Q_{G1} (L/s)	Q_{G2} (L/s)	Q_{G3} (L/s)	$(q_d)\%$
روزنه در کف	۳	پله ۲	۱/۵۸	۱/۶۲	۱/۶۱	۱/۴۲	۱/۴۶	۱/۴۵	۲۰/۲۲
		پله ۴	۲/۸۷	۲/۸۹	۲/۹۱	۲/۵۸	۲/۶۰	۲/۶۲	
	۲	پله ۲	۱/۶۱	۱/۶۱	—	۱/۴۵	۱/۴۵	—	۱۳/۷۶
		پله ۴	۲/۹۵	۳/۰۰	—	۲/۶۶	۲/۷۰	—	
	۱	پله ۲	۱/۶۳	—	—	۱/۴۷	—	—	۱۳/۸۶
		پله ۴	۲/۹۴	—	—	۲/۶۵	—	—	
روزنه در دیواره	۳	پله ۱	۱/۹۷	۱/۹۸	۱/۹۷	۱/۷۷	۱/۷۸	۱/۷۷	۲۲/۲۳
		پله ۳	۲/۹۳	۳/۰۴	۲/۹۳	۲/۶۴	۲/۷۴	۲/۶۴	
	۲	پله ۱	۲/۰۲	۲/۱۴	—	۱/۸۲	۱/۹۳	—	۱۵/۵۰
		پله ۳	۳/۰۱	۳/۱۶	—	۲/۷۱	۲/۸۵	—	
	۱	پله ۱	۲/۰۰	—	—	۱/۸۰	—	—	۷/۵۰
		پله ۳	۳/۰۰	—	—	۲/۷۰	—	—	

بررسی نسبت بی بعد عمق اولیه پرش به عمق بحرانی ($\frac{y_1}{y_c}$) نشان می دهد حضور روزنه بطور کلی منجر به افزایش این نسبت می شود (شکل ۷). افزایش عمق اولیه پرش هیدرولیکی می تواند باعث بهبود مشخصات پرش از جمله کاهش طول پرش و غلتابه شود. کاهش طول پرش نیز مزایای قابل توجهی دارد، از جمله کاهش طول حوضچه آرامش که به کاهش هزینه های ساخت و افزایش کارایی سازه منجر می شود. نتایج نشان می دهد همچنین با افزایش تعداد روزنه عمق اولیه پرش افزایش یافته است. برای بهترین حالت قرارگیری روزنه (سه روزنه در کف) عمق اولیه پرش نسبت به حالت شاهد ۴۰ درصد افزایش یافته است. این افزایش برای حالت تک روزنه در کف ۱۳ درصد است که نشان می دهد افزایش تعداد روزنه تاثیر قابل توجهی بر مشخصات پرش هیدرولیکی پایین دست دارد.

شکل ۷. بررسی تغییرات $\frac{y_1}{y_c}$ در شرایط مختلف کارگذاری روزنه

شکل ۷ همچنین نشان می دهد که یک روزنه در کف تأثیر بیشتری بر افزایش عمق اولیه پرش نسبت به حالتی دارد که سه روزنه در دیواره قرار گرفته اند. این نتیجه تأکید می کند که جای گذاری روزنه در کف، به ویژه با افزایش تعداد روزنه ها، بهترین عملکرد را ارائه می دهد. در شکل ۸، شبیه سازی جریان در سرریز پلکانی با سه روزنه در کف پله دوم و سه روزنه در کف پله چهارم نمایش داده شده است. پروفیل سرعت در این حالت، در مقایسه با سرریز پلکانی ساده (بدون روزنه)، که معمولاً دارای پروفیلی یکنواخت در عرض است، تغییرات قابل توجهی را نشان می دهد. حضور روزنه ها موجب ایجاد جریان های موضعی و افزایش اغتشاش در طول مسیر شده است. این اغتشاشات باعث شکل گیری جت های موضعی در خروجی روزنه ها می شود که با جریان عبوری از روی سرریز برخورد کرده و توزیع سرعت را در عرض سرریز به طور محسوسی تحت تأثیر قرار می دهند. این ویژگی ها به افزایش میزان آشفته گی جریان و استهلاک انرژی کمک کرده و عملکرد

هیدرولیکی سرریز را بهبود می‌بخشند.



شکل ۸. نمایی از پروفیل سرعت روی سرریز پلکانی در حضور سه روزنه در کف پلکان (S1)

مقایسه با نتایج سایر محققین

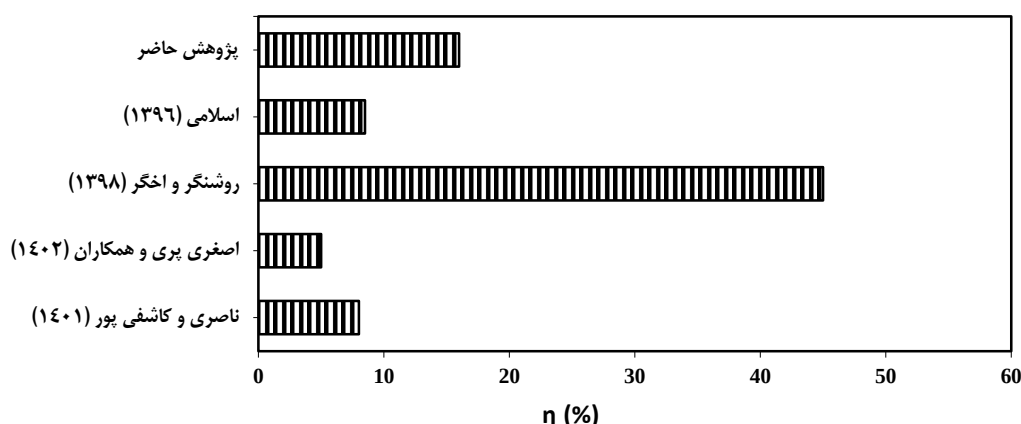
اسلامی (۱۳۹۶) آزمایش‌های گسترده‌ای در زمینه تأثیر شکل، موقعیت و آرایش شکاف‌ها بر روی سرریز پلکانی انجام داد و نتیجه گرفت که بهترین حالت برای استهلاك انرژی، استفاده از شکاف‌های مستطیلی با آرایش پشت سر هم در کف پله‌ها است. در مدل پیشنهادی آن‌ها، ۶ روزنه مستطیلی با ابعاد 7×2 سانتی‌متر در کف سه پله متوالی (پله‌های ۴، ۵ و ۶) قرار گرفتند که منجر به استهلاك انرژی معادل ۶۵ درصد شد.

در مقایسه با این تحقیق، پژوهش حاضر رویکرد متفاوتی را در آرایش روزنه‌ها اتخاذ کرد. در این مطالعه، به‌جای استفاده از سه پله متوالی، ۶ روزنه مستطیلی با ابعاد کوچکتر (3×3 سانتی‌متر) در کف دو پله (پله‌های ۱ و ۳) جایگذاری شد که هر پله دارای سه روزنه بود. نتایج نشان داد که این آرایش توانسته است استهلاك انرژی بیشتری، معادل ۷۳ درصد، ایجاد کند. این افزایش ۸ درصدی در استهلاك انرژی، نسبت به یافته‌های اسلامی (۱۳۹۶)، نشان می‌دهد که کاهش ابعاد روزنه‌ها و تغییر در محل جایگذاری آن‌ها می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر میزان استهلاك انرژی داشته باشد.

این اختلاف عملکرد را می‌توان به چند عامل نسبت داد. اول اینکه، جت‌های خروجی از روزنه‌های کوچک‌تر با شدت بیشتری با جریان عبوری از سرریز تداخل می‌کنند که منجر به افزایش آشفتگی و در نتیجه استهلاك انرژی بالاتر می‌شود. دوم، آرایش پله‌ها و موقعیت روزنه‌ها نیز نقش مهمی در این امر دارند؛ قرارگیری روزنه‌ها در پله‌های ابتدایی‌تر (پله‌های ۱ و ۳) باعث ایجاد تداخل بیشتری در مراحل اولیه جریان و در نتیجه افت انرژی بیشتر می‌شود. در حالی که در آزمایش اسلامی، روزنه‌ها در پله‌های پایینی (پله‌های ۴، ۵ و ۶) قرار داشتند که ممکن است منجر به تداخل کمتر و در نتیجه استهلاك انرژی کمتری شده باشد.

در شکل ۹، میزان افزایش درصد استهلاك انرژی نسبت به حالت شاهد (η) بر اساس نتایج پژوهش‌های مختلف که از راهکارهای متنوعی برای بهبود عملکرد سرریزهای پلکانی استفاده کرده‌اند، نمایش داده شده است. این مقایسه نشان می‌دهد که هر یک از این روش‌ها تا چه اندازه توانسته‌اند به بهبود استهلاك انرژی جریان کمک کنند و تفاوت‌های موجود در کارایی آن‌ها را به‌وضوح نمایان می‌سازد.

نتایج این پژوهش نشان داد که ایجاد سه روزنه در کف سرریز پلکانی می‌تواند استهلاك انرژی را نسبت به حالت بدون روزنه، تا ۱۶ درصد افزایش دهد. این میزان بیشتر از یافته‌های اصغری پری و همکاران (۱۴۰۲) و ناصری و کاشفی‌پور (۱۴۰۱) است که به ترتیب از موانع متخلخل و پوشش گابیونی استفاده کرده‌اند. با این حال، مطالعه‌ی روشنگر و اخگر (۱۳۹۸) نشان داده است که استفاده از المان‌های گوه‌ای می‌تواند استهلاك انرژی را تا ۴۵ درصد افزایش دهد، که نشان‌دهنده کارایی بالاتر این روش است. با این وجود، نوآوری این پژوهش در تمرکز بر ایجاد روزنه‌ها در سرریزهای پلکانی است که به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای افزایش استهلاك انرژی پیشنهاد می‌شود. این رویکرد، بدون نیاز به افزودن المان‌های خارجی، به حفظ ساختار ساده سرریز کمک می‌کند و در عین حال به‌طور چشمگیری استهلاك انرژی را افزایش داده و جریان عبوری را بهبود می‌بخشد. به عبارت دیگر، استفاده از روزنه‌ها، با کمترین تغییرات در ساختار اولیه سرریز، ضمن افزایش استهلاك انرژی، پیچیدگی ساختاری کمتری را ایجاد می‌کند.



شکل ۹. بررسی درصد افزایش استهلاک انرژی در پژوهش های مختلف

نتیجه گیری

یکی از روش های مؤثر برای استهلاک انرژی، تداخل جریان های متقاطع است. در این پژوهش، کارایی مدل عددی FLOW-3D در شبیه سازی جریان سرریز پلکانی، در شرایطی که جت های خروجی از روزنه ها با جریان اصلی سرریز تداخل دارند، ارزیابی شد. شاخص های آماری مختلف سنجش خطا نشان دادند که با استفاده از مدل آشفتگی RNG می توان این جریان ها را با دقت بالایی ممدل سازی کرد ($R^2 = 0.96$ و $KGE = 0.94$). نتایج به دست آمده، اثربخشی قابل توجه استفاده از شکاف ها در ساختار سرریز پلکانی را نشان می دهد، به ویژه هنگامی که روزنه های این شکاف ها در کف پله ها تعبیه می شوند. بررسی ها نشان داد که وجود روزنه ها به طور قابل توجهی میزان استهلاک انرژی جریان را افزایش می دهد، به گونه ای که این میزان با افزایش تعداد روزنه ها بیشتر می شود. این افزایش استهلاک انرژی ناشی از برخورد جت های خروجی از روزنه ها با جریان عبوری است که منجر به افزایش آشفتگی و کاهش انرژی می گردد. در میان آرایش های مختلف، جایگذاری سه روزنه در کف بیشترین میزان استهلاک انرژی را به میزان ۷۳ درصد نشان داد و عمق اولیه پرش را ۴۰ درصد افزایش داد. این افزایش در عمق اولیه پرش، با حضور روزنه ها در کف، می تواند به توزیع مناسب تر انرژی جریان کمک کند. جت های روبه بالا که از روزنه های کف خارج می شوند، برخوردهای شدیدتری با جریان اصلی ایجاد می کنند و در نتیجه استهلاک انرژی بیشتری را موجب می شوند. در مقابل، روزنه های تعبیه شده در دیواره ها، به دلیل هم سو بودن جریان خروجی با جریان اصلی، تأثیر کمتری در کاهش انرژی از خود نشان می دهند.

در مجموع، استفاده از شکاف ها و روزنه های کف به عنوان یک راهکار مؤثر برای افزایش کارایی سرریزهای پلکانی توصیه می شود. این روش می تواند در شرایط سیلابی با بهبود تخلیه جریان و مدیریت بهتر جریان های شدید به کار رود. همچنین، امکان تجهیز این روزنه ها به دریچه های کنترلی، انعطاف پذیری بیشتری برای کنترل جریان فراهم می کند و می تواند به بهبود پایداری و بهره وری سازه های هیدرولیکی در مواجهه با سیلاب ها کمک کند. در پایان، پیشنهاد می شود که تحقیقات آتی به بررسی عمیق تر پدیده تداخل جریان های متقاطع به عنوان یک راهکار و نوآوری نوین برای کنترل انرژی مخرب جریان های خروجی از سدها بپردازند.

سپاس گذاری

بدین وسیله از حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه (GN: SCU.WH1402.31370) در انجام این تحقیق قدردانی می شود.

"هیچ گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

اسلامی، علی. (۱۳۹۶). تأثیر تداخل جریان از شکاف یا منافذ کف و دیواره پلکان بر استهلاک انرژی و مشخصات پرش هیدرولیکی در سرریزهای پلکانی. پایان نامه کارشناسی ارشد. به راهنمایی سید محمود کاشفی پور. اهواز: دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست.

اصغری پری، سید امین؛ رزمخواه، آذین؛ اصغری پری، سیدعلی و کردناییج، مجتبی (۱۴۰۲). بررسی آزمایشگاهی اثر محل قرارگیری مانع متخلخل پیوسته سه بعدی در کف پله سرریز پلکانی بر مشخصات جریان عبوری. *مهندسی منابع آب*، ۱۶ (۵۶)، ۷۹-۹۴.

امین وش، احسان و روشنگر، کیومرث (۱۴۰۲). بررسی عددی تاثیر شیب پیشانی پله سرریز پلکانی ساده و بلوک دار با تاج نیم دایره ای بر پارامترهای هیدرولیکی آن. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۷ (۱)، ۱۰۲-۱۱۶.

روشنگر، کیومرث و اخگر، سمیرا (۱۳۹۸). مطالعه عددی و آزمایشگاهی تاثیر المانهای گوه‌ای شکل برضریب زبری و استهلاک انرژی روی سرریز پلکانی. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۳ (۱)، ۷۸-۸۸.

سرکمریان، سعید و احدیان، جواد (۱۳۹۶). مدل سازی ریاضی افت انرژی در سرریزهای پلکانی با استفاده از مدل عددی ANSYS-CFX. *علوم و مهندسی آبیاری*، ۴۳ (۱)، ۴۳-۵۶.

طاهری طلاوری، طوبی؛ سجادی، سید محسن؛ احدیان، جواد و عزیزی نادیان، حسین (۱۴۰۳). بررسی عددی هیدرولیکی جریان عبوری از دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط جریان مستغرق. *فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب*، ۴ (۳)، ۴۰-۶۰.

قادری، امیر و عباسی، سعید (۱۴۰۲). بررسی عددی توزیع سرعت و الگوی جریان عبوری از پله‌های اصلاح شده سرریز پلکانی. *نشریه هیدرولیک*، ۱۸ (۱)، ۸۱-۱۰۴.

ناصری، راضیه و کاشفی پور، سید محمود (۱۴۰۱). اثر تخلخل سرریز پلکانی گابیونی بر افت انرژی و مشخصات پرش هیدرولیکی پایین دست سرریز. *علوم و مهندسی آبیاری*، ۴۵ (۱)، ۱-۱۷.

نوروزی، سحر و احدیان، جواد (۱۳۹۴). بررسی تأثیر تیغه‌های گرداب‌شکن ۴۵ درجه برضریب تخلیه سرریز نیلوفری با استفاده از مدل FLOW-3D. *علوم و مهندسی آبیاری*، ۴۰ (۱)، ۱۹۱-۲۰۰.

REFERENCES

- Aminvash, E., & Roushangar, K. (2023). Numerical Investigation of the Effect of the Frontal Slope of Simple and Blocky Stepped Spillway with Semi-Circular Crest on Its Hydraulic Parameters. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 17(1), 102-116. (In Persian).
- Ashoor, A., & Riazzi, A. (2019). Stepped Spillways and Energy Dissipation: A Non-Uniform Step Length Approach. *Applied Sciences*, 9 (23), 5071. <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/23/5071>
- Ashour, A., & Salah, E. (2023). Numerical Study of Energy Dissipation in Baffled Stepped Spillway Using Flow-3D. *International Journal of Research in Engineering, Science and Management*, 6 (11), 7-11. <https://journal.ijresm.com/index.php/ijresm/article/view/2847>
- Chanson, H. (2002). *Hydraulics of stepped chutes and spillways*. CRC Press.
- Chanson, H. (2022). Energy dissipation on stepped spillways and hydraulic challenges—Prototype and laboratory experiences. *Journal of Hydrodynamics*, 34(1), 52-62. <https://doi.org/10.1007/s42241-022-0005-8>
- Chanson, H., & Toombes, L. (2004). Hydraulics of stepped chutes: The transition flow. *Journal of Hydraulic Research*, 42(1), 43-54. <https://doi.org/10.1080/00221686.2004.9641182>
- Crookston, B. M., Flake, L. K., & Felder, S. (2024). Flow Nonuniformity and Energy Dissipation in Moderate-Sloped Stepped Chutes with a Labyrinth Crest. *Journal of Hydraulic Engineering*, 150(5), 04024024. <https://doi.org/doi:10.1061/JHEND8.HYENG-13881>
- Daryaei, M., Ahmadi, F., Peykani, P., & Zayeri, M. (2021). Prediction of longitudinal and transverse profiles of pressure flushing cones using artificial intelligence and data pre-processing. *Water Supply*, 22 (2), 1533-1545. <https://doi.org/10.2166/ws.2021.333>
- Eslami, A. (2017). investigating the effect of interference flow on energy dissipation and hydraulic jump characteristics due to the presence of slots or pores in the bed and wall of stepped spillway. *M.Sc. Thesis*. Supervised by Kashfipour, SM. Ahvaz: Shahid Chamran University of Ahvaz, Faculty of Water and Environmental Engineering. (In Persian).
- Farooq, U., Li, S., & Yang, J. (2024). Numerical Analysis of Flow Characteristics and Energy Dissipation on Flat and Pooled Stepped Spillways. *Water*, 16(18), 2600. <https://www.mdpi.com/2073-4441/16/18/2600>
- Ghaderi, A., & Abbasi, S. (2023). Numerical investigation of velocity distribution and flow characteristics over modified steps of stepped spillway. *Journal of Hydraulics*, 18(1), 81-104. (In Persian).
- 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), 1415-1430. <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. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 46 (7), 415. <https://doi.org/10.1007/s40430-024-05004-8>
- Güven, A., & Mahmood, A. H. (2020). Numerical investigation of flow characteristics over stepped spillways. *Water Supply*, 21 (3), 1344-1355. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.283>
- Hirt, C. W., & Nichols, B. D. (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39 (1), 201-225. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0021-9991\(81\)90145-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5)
- Ikinciogullari, E. (2023). Stepped spillway design for energy dissipation. *Water Supply*, 23 (2), 749-763. <https://doi.org/10.2166/ws.2023.016>
- Jahad, U. A., Chabuk, A., Al-Ameri, R., Majdi, H. S., Majdi, A., Al-Ansari, N., & Abed, S. A. (2024). Flow characteristics and energy dissipation over stepped spillway with various step geometries: case study (steps with curve end sill). *Applied Water Science*, 14 (3), 60. <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02110-9>
- Kalateh, F., Aminvash, E., & Daneshfaraz, R. (2024). On the hydraulic performance of the inclined drops: the effect of downstream macro-roughness elements. *AQUA - Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 73 (3), 553-568. <https://doi.org/10.2166/aqua.2024.304>
- KC, M. R., & Crookston, B. (2024). A laboratory study on the energy dissipation of a bevel-faced stepped spillway for embankment dam applications. *Proceedings of the 10th International Symposium on Hydraulic Structures (ISHS) 2024, Zurich, Switzerland*.
- Khatsuria, R. M. (2004). *Hydraulics of spillways and energy dissipators*. CRC press.
- Liu, G., Qian, S., Feng, J., Xu, H., Ma, F., & Zhou, Y. (2025). Inception Line of Air Entrainment for Converging Stepped Spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 151 (1), 06024010.
- Moghadam, M. K., Amini, A., & Moghadam, E. K. (2020). Numerical study of energy dissipation and block barriers in stepped spillways. *Journal of Hydroinformatics*, 23 (2), 284-297. <https://doi.org/10.2166/hydro.2020.245>
- Moghaddam, A. K., Ahmadian, S., & Dashtibadfarid, M. (2017). Static Pressure Analysis in Stepped Chutes with Inclined and Horizontal Steps in Nappe and Skimming Flow Regimes. *International Journal of Science and Engineering Investigations*, 6(65).
- Mohammad Rezapour Tabari, M., & Tavakoli, S. (2016). Effects of Stepped Spillway Geometry on Flow Pattern and Energy Dissipation. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41 (4), 1215-1224. <https://doi.org/10.1007/s13369-015-1874-8>
- Naseri, R., & Kashefipour, S.M. (2022). The Effect of Gabion Stepped Spillway Porosity on Energy Dissipation and Characteristics of Downstream Hydraulic Jump of Weir. *Irrigation Sciences and Engineering*, 45 (1), 1-17. (In Persian)
- Nasralla, T. H. (2022). Energy dissipation in stepped spillways using baffled stilling basins. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 28(3), 243-250. <https://doi.org/10.1080/09715010.2021.1871786>
- Nouroozi, S., & Ahadiyan, J. (2017). Effect of Vortex Breaker Blades 45 Degree on Discharge Coefficient of Morning Glory Spillway Using Flow-3D. *Irrigation Sciences and Engineering*, 40(1), 191-200. (In Persian)
- Pari, S. A. A., Razmkhah, A., Pari, S. A. A., & Kordnaei, M. (2023). Experimental Study of the Effect of the Location of a Continuous Porous Obstacle on the Bottom of a Stepped Spillway on the Characteristics of the Flow. *Water Engineering*, 16(56), 79-94. (In Persian).
- Pujari, S., Kaushik, V., Awasthi, N., Gupta, S. K., & Kumar, S. A. (2023). Application of machine learning approaches in the computation of energy dissipation over rectangular stepped spillway. *H2Open Journal*, 6 (3), 433-448. <https://doi.org/10.2166/h2oj.2023.007>
- Rajaratnam, N. (1990). Skimming Flow in Stepped Spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116 (4), 587-591. [https://doi.org/doi:10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1990\)116:4\(587\)](https://doi.org/doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(1990)116:4(587))
- Roshan, R., Azamathulla, H. M., Marosi, M., Sarkardeh, H., Pahlavan, H., & Ab Ghani, A. (2010). Hydraulics of stepped spillways with different numbers of steps. *Dams and Reservoirs*, 20 (3), 131-136. <https://doi.org/10.1680/dare.2010.20.3.131>
- Roushangar, K., & Akhgar, S. (2019). Numerical and Experimental Study of the Influence of Wedge Elements on Roughness and Energy Dissipation over Stepped Spillway. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 13(1), 78-88. (In Persian)
- Roushangar, K., Akhgar, S., & Shahnazi, S. (2022). The effect of triangular prismatic elements on the hydraulic performance of stepped spillways in the skimming flow regime: an experimental study and numerical modeling. *Journal of Hydroinformatics*, 24 (2), 243-258. <https://doi.org/10.2166/hydro.2022.031>



- Sabahi, N. (2024). A review of numerical simulations on stepped spillways using the k- ϵ turbulence model. *International Journal of Science and Research Archive*, 12(1), 978-989.
- Salmasi, F., Abraham, J., & Salmasi, A. (2021). Effect of stepped spillways on increasing dissolved oxygen in water, an experimental study. *Journal of Environmental Management*, 299, 113600.
- Saqib, N. u., Akbar, M., Pan, H., Ou, G., Mohsin, M., Ali, A., & Amin, A. (2022). Numerical Analysis of Pressure Profiles and Energy Dissipation across Stepped Spillways Having Curved Risers. *Applied Sciences*, 12(1), 448. <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/1/448>
- Sarkamaryan, S., & Ahadiyan, J. (2020). Mathematical modeling of energy loss on Stepped Spillway Using ANSYS-CFX Numerical Model. *Irrigation Sciences and Engineering*, 43(1), 43-56. (In Persian)
- Simões, A. L. A., França, T. I. d. S., Queiroz, L. M., Lima Neto, I. E., Schulz, H. E., Fontes, D. C. H., & Porto, R. d. M. (2024). Dimensionless Equations for Hydraulic Jump Stilling Basins Downstream of Gabion Stepped Chutes. *Journal of Hydraulic Structures*, 51-64.
- Taheri Talavari, T., Sajjadi, S. M., Ahadiyan, J., & Azizi Nadian, H. (2024). Numerical hydraulic and hydrodynamic investigation of flow passing through multiple elliptic lopac gates with Flow 3D software. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 4(3), 40-60. (In Persian)
- Yakhot, V., Orszag, S. A., Thangam, S., Gatski, T., & Speziale, C. (1992). Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 4(7), 1510-1520.
- Zhou, Y., Wu, J., Ma, F., & Qian, S. (2021). Experimental Investigation of the Hydraulic Performance of a Hydraulic-Jump-Stepped Spillway. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 25(10), 3758-3765. <https://doi.org/10.1007/s12205-021-1709-y>