

Numerical Investigation of Labyrinth Stepped Spillways Performance on Energy Dissipation of Skimming Flow

Amir Ghaderi ¹, Saeed Abbasi ^{2*}

1- Ph.D. Candidate, Water and Hydraulic Structure, Engineering Faculty, University of Zanjan

2- Assistant Professor, Engineering Faculty, University of Zanjan

*abbasi.saeed@znu.ac.ir

Received: 17 June 2018, Accepted: 21 July 2019  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: In designing spillways, chutes and stilling basins the dimension of stilling basin will reduce if the energy of the flow dissipates along the chute or spillway. One of the most characteristics of stepped spillways is dissipation of energy along the spillway. Stepped spillways are able to increase the energy dissipation according to their form and geometry. The main problem is to increase the effectivity of the steps on energy dissipation. The aim of this research is to introduce and propose a new form of stepped spillways in order to achieve a higher level of flow energy dissipation during its transport to the downstream.

Methodology: In this research hydraulic of the passing flow over stepped spillway is investigated under effect of geometric alteration and change of steps shape to some triangular, trapezoidal and rectangular labyrinths with equal ratio of $L_T/W=1.85$ (effective length to the spillway width) utilizing FLOW-3D for a skimming flow of the range of $0.84 \leq y_c/h \leq 1.69$. All the models utilized in this paper are sketched using AutoCAD® and transmitted into FLOW-3D for simulation. According to using CFD technic, the governing equations are Navier-Stokes equations and continuity equation. This CFD package solves the incompressible Reynolds Navier-Stokes equations using finite volume technic on a meshed domain in order to three-dimensional analysis of the flow. The VOF method was used to simulate the free surface of the flow and the RNG k- ϵ model was used for the turbulence modeling. The VOF is a finite volume method in which the desired region is divided into finer elements and/or control volumes. When the flow has a free surface, some elements are not filled with fluid and some of these cells are partially filled. An appropriate method for defining the condition of the cells is to introduce a parameter (F) that shows part of the element that is filled with fluid. This quantity is named the function of fluid volume. The RNG k- ϵ model is a two-equation model in which the first equation declares the energy in turbulence (k is turbulent kinetic energy) and the second equation defines the dissipation of turbulent kinetic energy (ϵ is dissipation in turbulence). The RNG k- ϵ turbulence model is used because of its ability in the simulation of high computational mesh flows and less dependence to empirical constants in the related equations and also its good performance in flow separation regions.

Results and discussion: The results of velocity distribution achieved from FLOW-3D is compared and validated with experimental results of Felder et al. (2012) for steps no. 8, 9 and 10. Also, different models are performed and simulated to select an appropriate and optimal mesh. According to mesh sensitivity analysis and optimum mesh size selection, finally the coarser mesh was selected to be 1.9 cm (868,271 mesh elements) and the finer mesh was

selected to be 0.8 cm (1,336,622 mesh elements). Totally 2,204,893 mesh elements with a relative error of 6.07% were utilized for simulation and modeling. At the first stage, the results showed that the maximum error of velocity distribution between experimental data of Felder et al. (2012) and numerical simulation of FLOW-3D for the step no. 8 is 8.58% that indicated good accordance between the numerical and experimental results. At the second stage, it was seen that interference of flow blades because of passing over labyrinth shape of the steps is the superiority of this type of labyrinth stepped spillways. Also, the trapezoidal labyrinth shape shows a better performance in achieving the highest energy dissipation.

Conclusion: In the same flow conditions, the rectangular, triangular and trapezoidal shape labyrinth spillway were more effective in velocity reduction by 4.62%, 12.21%, and 23.76% and in energy dissipation by 5.6%, 13.1% and 17% than standard stepped spillways respectively. This is because of flow interference and increasing the resistance against the flow in these types of stepped spillways. The water in the skimming flow regime passes over the spillway as a continuous later. In this state, the steps act as some excrescences against the flow. So, the most part of the flow energy in this regime will be dissipated via some rotary flows beneath the false bed. Reshaping the steps as labyrinths, will increase the recirculating region and will produce more rotating flows than the standard stepped spillways. These types of spillways have fewer amounts of the residual head than that for flat stepped spillways. The residual head ratio in these spillways is $H_{res}/y_c \approx 2.57$ and in standard stepped spillways is $H_{res}/y_c \approx 4.32$. Finally, these types of spillways can be introduced as the next generation of stepped spillways in increasing their efficiency and hydraulic performance.

Keywords: Labyrinth Stepped Spillways, Energy Dissipation, Flow Interference, Residual Energy, FLOW-3D.

بررسی عددی عملکرد سرریزهای پلکانی - کنگره‌ای روی استهلاک انرژی جریان‌های غیرریزشی

امیر قادری^۱، سعید عباسی^{۲*}

۱- دانشجوی دکترای عمران، گرایش آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان
۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه زنجان

*abbasi.saeed@znu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۲۷، پذیرش: ۱۳۹۸/۰۴/۳۰، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: یکی از بارزترین ویژگی‌های سرریزهای پلکانی، استهلاک انرژی جریان در طول سرریز در اثر انتقال به پایین دست می‌باشد. هدف از این تحقیق یافتن و معرفی شکل جدیدی از سرریزهای پلکانی برای دستیابی به بیشترین سطح از استهلاک انرژی جریان در انتقال به پایین دست سرریز می‌باشد. در این تحقیق هیدرولیک جریان عبوری از سرریز پلکانی تحت تأثیر تغییر و اصلاح شکل هندسی پله‌ها به شکل کنگره‌هایی از دوزنقه، مثلثی و مستطیلی به کمک مدل FLOW-3D بررسی شده است. نتایج نشان داد که ایجاد تداخل تیغه‌های جریان در اثر عبور آب از روی شکل کنگره‌ای پله‌ها نکته‌ی قوت این نوع از سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای می‌باشد. همچنین شکل کنگره‌ای دوزنقه‌ای عملکرد بهتری برای دستیابی به بیشترین میزان استهلاک انرژی از خود نشان می‌دهد. در شرایط جریان یکسان، سرریز پلکانی-کنگره‌ای مستطیلی، مثلثی و دوزنقه‌ای به ترتیب به میزان ۴/۶۲، ۱۲/۲۱ و ۲۳/۷۶ درصد در کاهش سرعت جریان و ۵/۶، ۱۳/۱ و ۱۷ درصد در استهلاک انرژی بیشتر نسبت به سرریز پلکانی متعارف مؤثر بودند. که علت این امر تداخل خطوط جریان و افزایش مقاومت در برابر جریان و همچنین افزایش ناحیه فرآیند گردش دوباره و ایجاد جریان چرخشی بیشتر در این نوع از سرریزهای پلکانی جدید می‌باشد. این نوع از سرریزها در مقایسه با سرریزهای پلکانی متعارف کمترین هد باقی‌مانده را دارد. نسبت هد باقی‌مانده در این سرریزها به طور میانگین برابر $H_{res}/y_c \approx 2/57$ و در سرریزهای پلکانی متعارف برابر $H_{res}/y_c \approx 4/32$ می‌باشد. در نهایت می‌توان از این سرریزها به عنوان نسل جدیدی از سرریزهای پلکانی در جهت افزایش بازده و عملکرد هیدرولیکی آنها نام و بهره برد.

کلید واژگان: سرریز پلکانی-کنگره‌ای، استهلاک انرژی، تداخل تیغه‌های جریان، انرژی باقی‌مانده، FLOW-3D.

۱- مقدمه

برای کاهش سرعت جریان در انتقال به پایین دست سد از طریق افزایش بازده استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی می‌باشد. تحقیقات مختلفی توسط Sorensen (1985)، Peyras et al., (1992)، Rice and Kadavy (1996) انجام و تأثیر الگوی جریان، هندسه‌ی پله و شیب سرریز بر روی میزان استهلاک انرژی بررسی شده است. Rajaratnam (1990) روشی تقریبی برای پیش‌بینی مشخصات جریان لغزشی روی سرریزهای پلکانی ارائه کرد. بنابر نتایج مطالعات وی، هنگامی که عمق بحرانی بزرگتر از $0/8$ برابر ارتفاع پله باشد، جریان حاکم بر سرریز پلکانی از نوع لغزشی است. Chanson (2001) بررسی‌های آزمایشگاهی زیادی پیرامون

در طراحی سرریزها، تنداب‌ها و حوضچه‌های آرامش اگر انرژی جریان در طول تنداب یا سرریز مستهلک شود، باعث کاهش ابعاد و اندازه‌ی حوضچه‌ی آرامش می‌شود و یکی از گزینه‌هایی که می‌تواند این ویژگی را برای طراح فراهم سازد سرریز پلکانی است. سرریزهای پلکانی باتوجه به شکل و هندسه‌ای که دارند، برای هدررفت انرژی آب، کاهش قدرت فرسایشی آن و نیز کاهش هزینه‌ی سازه‌های مستهلک کننده‌ی انرژی پایین دست سرریز سدهای بزرگ استفاده شوند (Khatsuria, 2005). در سال‌های اخیر محققان در صدد افزایش کارایی این سرریزها برآمده و تحقیقات زیادی را در این زمینه انجام داده‌اند که از جمله‌ی آنها، تلاش

Morovati et al. (2013), Daneshfaraz et al. (2016), Moayeri et al. (2016), Haji Azizi et al. (2016), Ghaderi et al. (2020a) و (2013) دینامیک سیال‌های محاسباتی به شبیه‌سازی جریان عبوری از سرریزهای پلکانی پرداخته‌اند. با توجه به اینکه نقش عمده‌ی سرریزهای پلکانی استهلاک انرژی جریان در زمان انتقال آب از بالادست به پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی می‌باشد، در این مقاله با استفاده از روش دینامیک سیال‌های محاسباتی شکل جدیدی از سرریزهای پلکانی با عنوان سرریز پلکانی-کنگره‌ای معرفی و عملکرد هیدرولیکی این نوع از سرریزها به ویژه در بخش استهلاک انرژی ارزیابی شده است.

۲- تئوری تحقیقات

۲-۱- رابطه‌های تئوری تشخیص رژیم جریان

معیارهای مؤثر در به وجود آمدن انواع جریان در سرریزهای پلکانی شامل هندسه‌ی پله‌ها (طول پله l و ارتفاع پله h) و میزان دبی عبوری از روی سرریز Q می‌باشند؛ با این حال محققان دیگر معیارهای دیگری را نیز ارائه داده‌اند (Rajaratnam, 1990). همچنین (Rajaratnam (1990), Peyras et al. (1991), Chanson (1994) و Mondardo et al. (1995) نشان داده که نوع رژیم جریان وابسته به عمق بحرانی نرمال شده (y_c/h) و مختصات بدون بعد پله (h/l) می‌باشد که در آن y_c عمق بحرانی جریان، h و l به ترتیب ارتفاع و عرض پله می‌باشند. بر این مبنا در زیر رابطه‌های تجربی برخی از محققان که رژیم جریان غیرریزشی تحت آن شرایط ایجاد می‌شود، ارائه شده است.

$$\frac{y_c}{h} \geq 0.8, 0.4 \leq \frac{h}{l} \leq 0.9 \quad \text{Rajaratnam (1990)} \quad (1)$$

$$\frac{y_c}{h} \geq 1.01 - 0.37 \left(\frac{h}{l} \right) \quad \text{Peyras et al. (1991)} \quad (2)$$

$$\frac{y_c}{h} \geq 1.05 - 0.465 \left(\frac{h}{l} \right), \quad \text{Chanson (1994)} \quad (3)$$

تشخیص جریان و استهلاک انرژی روی سرریزهای پلکانی انجام داده است و رابطه‌هایی را برای تعیین نوع جریان و میزان انرژی هدر شده روی این سرریزها ارائه داده است. Gonzalez and Chanson (2007) مشخصات جریان عبوری از سرریز پلکانی در شیب‌های تنداب مختلف سرریز برای سدهای خاکی را به صورت تجربی بررسی کردند. آنان در بررسی خود نمودارهای طراحی جدیدی برای طراحی سرریزهای پلکانی در مشخصات هندسی مختلف سرریز ارائه نمودند.

Felder and Chanson (2009) بررسی‌هایی را روی سرریز پلکانی با زاویه تنداب $21/8$ درجه برای دو نوع ارتفاع پله‌ی ۵ و ۱۰ سانتی‌متر انجام دادند. از مقایسه‌ی نتایج به دست آمده با نتایج بررسی‌های پیشین مشخص شد که ارتفاع باقی‌مانده در انتهای سرریز با شیب تنداب $21/8$ درجه کمتر از سرریز با زاویه شوت $15/9$ درجه می‌باشد.

(Felder et al., (2012a,b), Hamedi et al., (2011), Palermo et al., (2014), Nohani et al., (2015). به ترتیب تأثیر شیب معکوس، تأثیر هندسه‌ی پله‌های سرریز، تأثیر ایجاد لبه در انتهای پله‌های سرریز و اثر زبری در سطح پله‌های سرریز پلکانی را در جهت افزایش میزان استهلاک انرژی در پایین‌دست آن بررسی کردند. همچنین Heydari (2011), Orojlo et al. (2011), Jem et al. (2014), Marvdashti et al. (2008), Beheshti et al. (2015) و Kanaan et al. (2016) به ترتیب تأثیر شیب بر تعداد پله‌های سرریز پلکانی، استهلاک انرژی روی سرریز دنداندار بلوکی، ارزیابی استهلاک انرژی جریان دو فاز روگذر سرریز پلکانی به کمک گودال آب‌شستگی پایین‌دست، توزیع فراسنجه‌های آشفته‌گی جریان دو فاز آب و هوا روی سرریزهای پلکانی و اثر دیواره‌های قوس‌دار بر فراسنجه‌های هیدرولیکی جریان در سرریز پلکانی را مورد ارزیابی قرار دادند. در سال‌های اخیر تحقیقاتی به منظور ارزیابی و ارتقای مدل‌سازی عددی با استفاده از الگوریتم‌های دینامیک سیال‌های محاسباتی^۱ انجام گرفته شده است. دینامیک سیال‌های محاسباتی برای شبیه‌سازی جریان در سازه‌های هیدرولیکی استفاده می‌شود. محققانی مانند Tongratoke et al. (2009), Nikseresht, Tabbara et al. (2005), Chen et al. (2002)

¹ CFD

بنابر رابطه‌های ۱ تا ۳، جدول ۱ و شکل ۱ نوع رژیم جریان ایجاد شده روی سرریز پلکانی این تحقیق به صورت غیرریشی می‌باشد.

$$0.2 \leq \frac{h}{l} \leq 1.25$$

جدول ۱ مشخصات هیدرولیکی و نوع رژیم جریان ایجاد شده روی سرریز پلکانی-کنگره‌ای

Table 1 Hydraulic characteristics and regime of the flow produced on stepped spillway

Discharge (m ³ /s)	$y_c=(q^2/g)^{1/3}$ (m)	Step height, h (m)	Step width, l (m)	h/l	y_c/h	Regime of the flow on spillway
0.040	0.08	0.10	0.20	0.50	0.84	Skimming
0.065	0.12	0.10	0.20	0.50	1.17	Skimming
0.080	0.13	0.10	0.20	0.50	1.34	Skimming
0.095	0.15	0.10	0.20	0.50	1.50	Skimming
0.105	0.16	0.10	0.20	0.50	1.65	Skimming
0.113	0.17	0.10	0.20	0.50	1.69	Skimming

ت: در نتیجه ایجاد تغییرپذیری‌های هندسی در شکل پله‌های سرریز پلکانی بصورت کنگره‌ای می‌توان فراسنجه‌های هندسی طول مؤثر پله‌های سرریز پلکانی-کنگره‌ای L_T را نیز در نظر گرفت؛ $(L_T = N_c \times l_c)$ که در آن N_c : تعداد چرخه کنگره‌ای و l_c : طول هر چرخه کنگره‌ای می‌باشد (شکل ۲).

دیگر فراسنجه‌های سرریز پلکانی-کنگره‌ای به دلیل یکسان بودن در همه‌ی مدل‌ها ارائه نشده است. با توجه به شکل ۳، میزان استهلاك انرژی برای هر پله از سرریز پلکانی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Delta H = H_0 - H \quad (4)$$

در این رابطه $H_0 = \Delta Z + Y + \left(\frac{V_0^2}{2g}\right)$ ارتفاع (انرژی) آب در بالادست سرریز و $H = y \cos \theta + \left(\frac{V^2}{2g}\right)$ ارتفاع (انرژی) آب پیش از پرش، $V_0 = Q/(Y \times W)$ و $V = Q/(y \times W)$ می‌باشد.

در صورتی که $W \gg y$ باشد استهلاك انرژی در سرریزهای پلکانی به تعداد پله (N_c) ، مشخصات هندسی پله شامل ارتفاع پله (h) و عرض پله (l) و دبی جریان عبوری (Q) بستگی دارد (Christodoulou, 1993)؛ که می‌توان عمق بحرانی را تابعی از دبی جریان عبوری از سرریز پلکانی بیان کرد $(y_c = ((Q/W)^2/g)^{1/3})$. بنابراین فراسنجه‌های مختلف در سرریز پلکانی-کنگره‌ای این تحقیق به صورت تابع مندرج در رابطه‌ی ۵ به هم مرتبط می‌باشد:

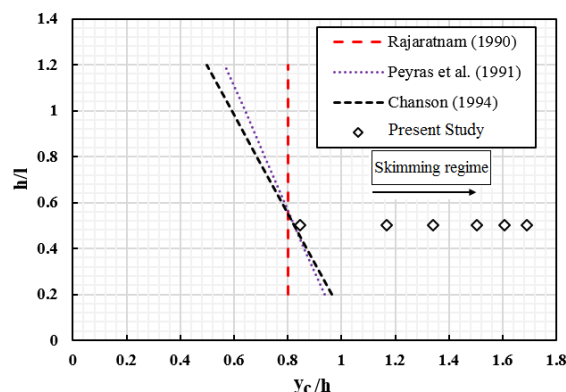


Fig. 1 Regime of the produced flow in this research
شکل ۱ رژیم جریان ایجاد شده در این تحقیق

۲-۲- آنالیز ابعادی

با توجه به نتایج بررسی‌های انجام شده توسط محققان مهم‌ترین و مؤثرترین فراسنجه‌های جریان عبوری از روی سرریز پلکانی عبارت‌اند از:

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

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

پ: مشخصات هندسی سرریز پلکانی شامل ارتفاع پله‌ی سرریز (l) ، عرض پله‌ی سرریز (h) ، تعداد پله (N_c) ، ارتفاع سرریز (H_{dam}) ، عرض سرریز پلکانی (W)

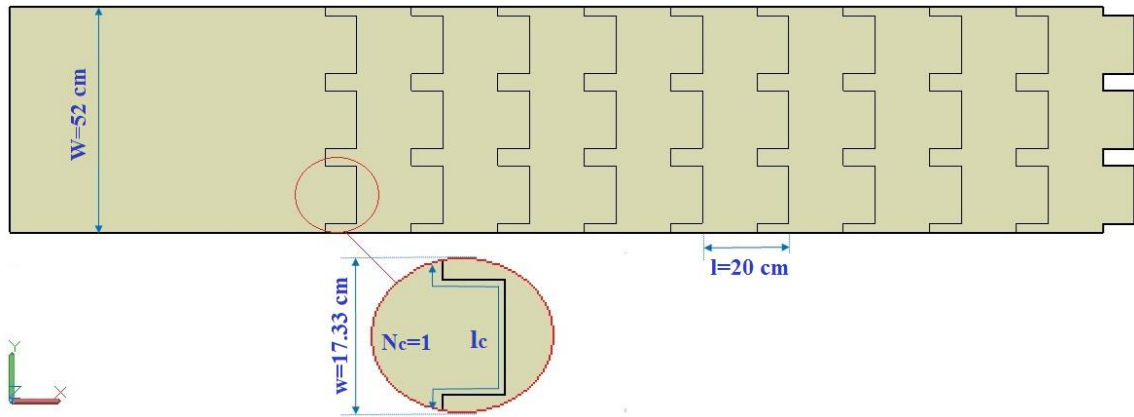


Fig. 2 Geometric parameters of labyrinth stepped spillway in this research

شکل ۲ فراسنجه‌های هندسی سرریز پلکانی-کنگره‌ای تحقیق حاضر

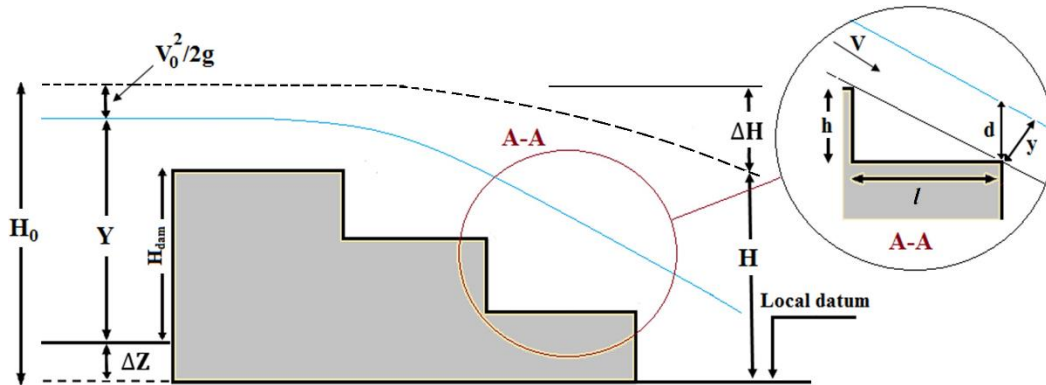


Fig. 3 Significant hydraulic parameters of energy dissipation in stepped spillway

شکل ۳ فراسنجه‌های هیدرولیکی مهم در استهلاك انرژی سرریز پلکانی

۳-۲- نرم‌افزار FLOW-3D

نرم‌افزار FLOW-3D یک برنامه‌ی کامل و جامع دینامیک سیال‌های محاسباتی (CFD) است که برای مدل‌سازی جریان انواع مختلفی از سیال و پدیده‌ی انتقال گرما استفاده می‌شود (Flow Science, 2016). معادله‌های حاکم در این نرم‌افزار معادله‌های ناویر-استوکس و معادله‌ی بقای جرم می‌باشد (Zahabi et al., 2018). این نرم‌افزار برای تحلیل سه‌بعدی جریان در حالت تراکم‌ناپذیر معادله‌های ناویر-استوکس رینولدزی را با استفاده از روش حجم محدود روی یک میدان شبکه بندی شده حل می‌کند. این معادله‌های در دستگاه مختصات کارتزین (x, y, z) به صورت زیر می‌باشند (Daneshfaraz et al. 2019; Ghaderi et al., 2020b):

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u A_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v A_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w A_z)}{\partial z} = R_{SOR} + R_{DIF} \quad (7)$$

$$f(H_{dam}, N_0, N_c, l, h, V, y, L_T, W, g, \rho, \mu) = 0 \quad (5)$$

با استفاده از تئوری پی باکینگهام^۱ و انتخاب فراسنجه‌های ρ, y, V به عنوان فراسنجه‌های تکراری، می‌توان استهلاك انرژی نسبی را تابعی از فراسنجه‌های بی‌بعد زیر در نظر گرفت:

$$\frac{\Delta H}{H_0} = f\left(\frac{y_c}{h}, \frac{y_c}{l}, \frac{L_T}{W}, \frac{H_{dam}}{W}, R_e, Fr, N_0, N_c\right) \quad (6)$$

اگر فرض شود که در آبراهه‌های روباز نیروی لزجت سیال به نیروی اینرسی ناچیز می‌باشد (Chow, 1959) و با توجه به این که تعداد پله‌های سرریز پلکانی-کنگره‌ای و تعداد چرخه آن در این تحقیق برای همه‌ی مدل‌ها یکسان می‌باشد، می‌توان از عدد رینولدز (R_e) ، N_0 ، N_c صرف نظر کرد.

¹ Buckingham's π theory

زیر، F به عنوان جزء حجم سیال در یک سلول سطح آزاد محاسبه می‌شود.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left(\frac{\partial}{\partial x} (FuA_x) + \frac{\partial}{\partial y} (FvA_y) + \frac{\partial}{\partial z} (FwA_z) \right) = 0 \quad (11)$$

در صورتی که $F=0$ باشد سلول پر از هوا و در صورتی که $F=1$ باشد، سلول پر از آب می‌باشد سطح آزاد جایی تعیین می‌شود که در آن $F=0.5$ است.

۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- مدل هندسی

انجام شبیه‌سازی به منظور بررسی عملکرد سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای در میزان استهلاک انرژی، با انتخاب سه نوع شکل کنگره‌ای به صورت دوزنقه‌ای، مثلثی و مستطیلی و با نسبت مساوی $L_T/W=1.85$ (نسبت طول مؤثر به عرض سرریز) و مقایسه‌ی نتایج با شکل متعارف پله انجام شده است. در این تحقیق در مرحله‌ی نخست نتایج شبیه‌سازی V/V_c (نسبت سرعت جریان به سرعت بحرانی) برای شکل ساده و متعارف پله‌ی سرریز پلکانی با نتایج آزمایشگاهی Felder et al., (2012) صحت‌سنجی شده است. آنان آزمایش‌های خود را با سرریز پلکانی به عرض ۰/۵۲ متر و با ۱۰ پله به شکل ساده انجام دادند. ارتفاع و عرض هر پله به ترتیب ۰/۱ و ۰/۲ متر می‌باشد. شکل ۴ طرح نمای کلی از سرریز پلکانی مورد بررسی توسط Felder et al., (2012) را نشان می‌دهد. همه‌ی مدل‌های این تحقیق توسط Auto-CAD تولید برای انجام شبیه‌سازی به محیط FLOW-3D انتقال داده شده‌اند.

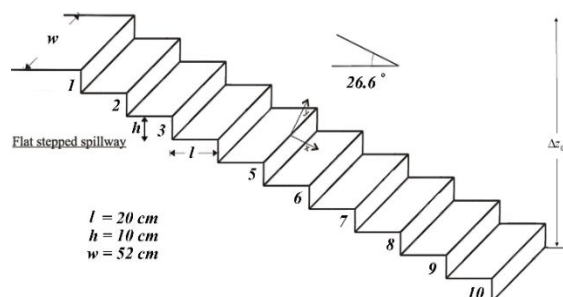


Fig. 4 Geometric parameters of flat stepped spillway in Felder et al. (2012)

شکل ۴ فراسنجه‌های هندسی سرریز پلکانی مورد آزمایش قرار گرفته توسط Felder et al., (2012)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left(uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x + f_x \quad (8)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left(uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + G_y + f_y \quad (9)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left(uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + G_z + f_z \quad (10)$$

در این رابطه‌ها (u, v, w) مؤلفه‌های سرعت، (A_x, A_y, A_z) کسری از مساحت مرتبط با جریان، (G_x, G_y, G_z) شتاب جرمی و (f_x, f_y, f_z) شتاب لزجت در جهت‌های (x, y, z): چگالی سیال، R_{SOR} : منبع جرم، R_{DIF} عبارت پخش آشفتگی، V_F : کسری از حجم مرتبط با جریان و P : فشار می‌باشند.

یک مدل آشفتگی برای مدل‌سازی ترم تنش غیرخطی رینولدز بایستی اضافه شود. برای این منظور در این تحقیق مدل آشفتگی $k-\varepsilon(RNG)$ برای شبیه‌سازی ویژگی‌های جریان استفاده شده است. اگرچه مدل‌های آشفتگی LES و $k-\varepsilon$ استاندارد نیز می‌تواند در این تحقیق استفاده شوند، ولی به لحاظ توانایی مدل آشفتگی $k-\varepsilon(RNG)$ در شبیه‌سازی جریان با تعداد مش‌های محاسباتی بالا و نیاز به ثابت‌های تجربی کمتر در رابطه‌های خود و عملکرد خوب در شبیه‌سازی ناحیه‌های جدانشدگی جریان و همچنین با توجه به نتایج بررسی‌های عددی محققانی چون Rezapour Tabari and Shahheydari et al., (2015) Daneshfaraz and Ghaderi (2017), Tavakoli (2015) و Ghaderi et al. (2019), Daneshfaraz et al. (2016) Ghaderi and Abbasi (2019) در توانایی قابل قبول مدل آشفتگی $k-\varepsilon(RNG)$ برای شبیه‌سازی جریان عبوری از سرریز پلکانی و شیب‌شکن قائم، این مدل آشفتگی انتخاب شده است.

در نرم‌افزار FLOW-3D برای شبیه‌سازی سطح آزاد از روش VOF^1 استفاده می‌شود، که در این روش با حل معادله‌ی

¹ Volume of fluid

و بهینه انجام و شبیه‌سازی شده است. با توجه به تجزیه حساسیت مش (جدول ۲) و مقایسه V/V_c در $y/d_c=0.645$ برای پله شماره ۹ به دست آمده از راه حل عددی با نتایج آزمایشگاهی، از چهار اندازه مش مختلف در فاصله‌های نزدیک به شبکه محاسباتی استفاده و سرانجام تعداد مش مناسب و بهینه انتخاب شد.

همچنین در شکل ۵ مدل‌های سه بعدی سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای این تحقیق ارائه شده است. همه‌ی مدل‌های سرریز پلکانی با پله‌های کنگره‌ای برای نسبت $L_T/W=1.85$ (نسبت طول موثر به عرض پله سرریز) ترسیم و بررسی شده‌اند.

۲-۳- شبکه محاسباتی و اعمال شرایط مرزی

در این تحقیق مدل‌های مختلفی برای انتخاب مش مناسب

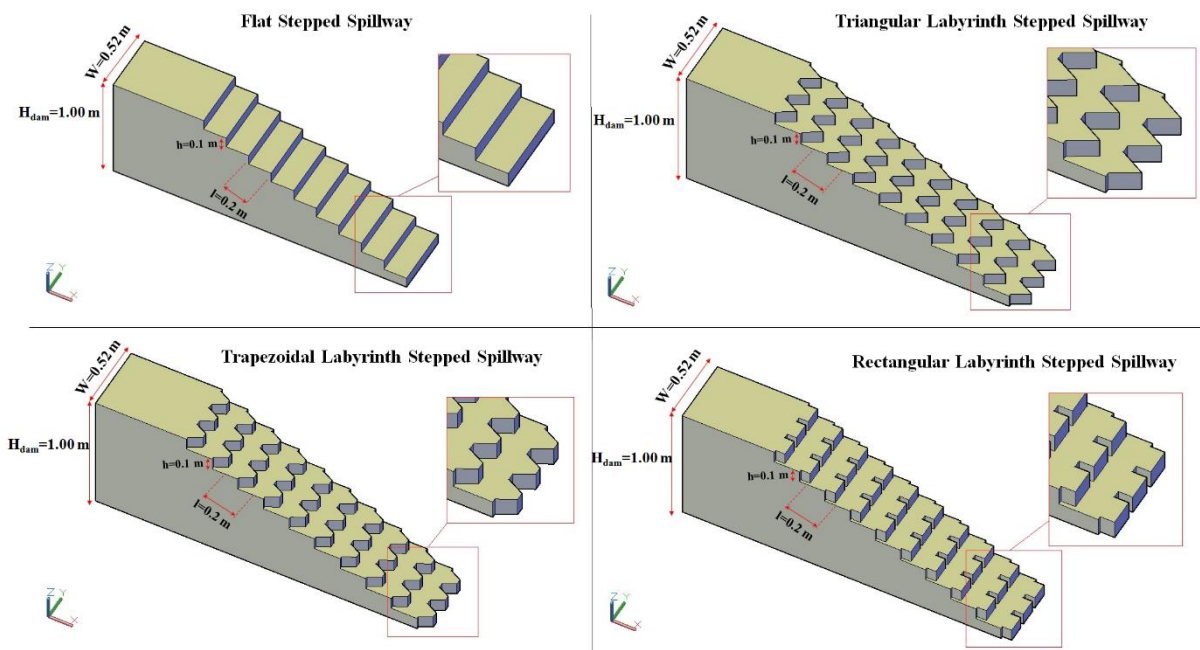


Fig. 5 Utilized stepped spillways in this research
شکل ۵ سرریزهای پلکانی مورد استفاده در این تحقیق

جدول ۲ تجزیه حساسیت مش
Table 2 Mesh sensitivity analysis

Test NO.	Int. mesh (cm)	Ext. mesh (cm)	Total number of cells	Max Aspect ratio	$d_c = \sqrt{V/V_c}, y = 0.645$ - step 9 in FLOW-3D	$d_c = \sqrt{V/V_c}, y = 0.645$ - step 9 in Experimental result	MAPE* (%)
							$100 \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left \frac{X_{exp} - X_{num}}{X_{exp}} \right $
T ₁	2.50	1.50	1046729	1.79	2.13	2.94	27.44
T ₂	2.20	1.10	1648157	1.52	2.43	2.94	17.32
T ₃	1.90	0.80	2204893	1.29	2.74	2.94	6.07
T ₄	1.85	0.75	2412412	1.21	2.79	2.94	5.10

*Mean Absolute Percentage Error, X_{exp} : Experimental value of X, X_{num} : Numerical value of X, n: Count of data

آزمایشگاهی و عددی ۵/۱۰ درصد محاسبه شد و با توجه به اینکه درصد خطای مش سوم و چهارم تاحدودی نزدیک به

برابر جدول ۲ مش چهارمی نیز با تعداد کل ۲۴۱۲۴۱۲ انتخاب و بررسی شد. درصد خطای نسبی بین نتایج

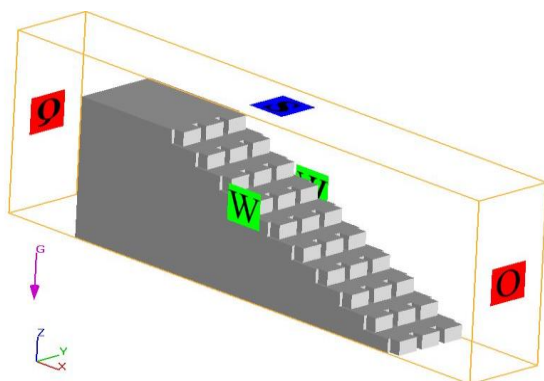


Fig. 7 Applying the boundary condition to the models
شکل ۷ اعمال شرایط مرزی به مدل‌های این تحقیق

جدول ۳ تعریف شرایط مرزی در محیط نرم‌افزار FLOW-3D

Table 3 Definition of boundary conditions in FLOW-3D

Software	Upstream boundary	Downstream boundary
FLOW-3D	Volume flow rate	Outflow
Free surface boundary	Lateral boundaries	Floor boundary
Symmetry	Wall	Wall

۴- نتایج و بحث

۴-۱- صحت‌سنجی نتایج عددی و آزمایشگاهی

یکی از راه‌های صحت‌سنجی و مقایسه نتایج و همچنین تعیین محدوده‌ی درصد خطا بین داده‌های حاصل از نرم‌افزار FLOW-3D با داده‌های آزمایشگاهی استفاده از رابطه‌ی ۱۲ برای تعیین خطای نسبی می‌باشد. ملاک متوقف کردن شبیه‌سازی در نرم‌افزار از طریق پیام متنی پایداری جریان (Steady Flow) که توسط نرم‌افزار ارائه می‌شود و همچنین بررسی میزان تغییرپذیری‌ها در فراسنجه‌های جریان است که در صورت ناچیز بودن این اختلاف‌ها می‌توان شبیه‌سازی را متوقف و نتایج را با داده‌های آزمایشگاهی صحت‌سنجی کرد.

$$E = \frac{(V/V_c)_N - (V/V_c)_E}{(V/V_c)_N} \quad (12)$$

در رابطه‌ی بالا E نشانگر درصد خطای نسبی، $(V/V_c)_N$ مقدار بی‌بعد شده نسبت سرعت جریان به سرعت بحرانی حاصل از حل عددی و $(V/V_c)_E$ مقدار بی‌بعد شده نسبت سرعت جریان به سرعت بحرانی اندازه‌گیری شده می‌باشد. در این تحقیق نتایج مربوط به توزیع سرعت‌های به دست آمده از

هم بوده، لذا مش سوم به عنوان مش بهینه انتخاب شد. با این حال می‌توان با افزایش تعداد مش، دقت و درصد خطا را کاهش داد. ولی برای این کار بایستی تمهیداتی مانند تهیه سامانه پردازشی با قدرت بالا انجام گیرد. در نهایت با انجام تجزیه حساسیت مش و انتخاب ابعاد مش بهینه در نهایت اندازه مش بزرگتر ۱/۹ سانتی‌متر (با تعداد ۸۶۸۲۷۱) و اندازه مش کوچکتر ۰/۸ سانتی‌متر (با تعداد ۱۳۳۶۶۲۲) می‌باشد. به طور کلی تعداد ۲۲۰۴۸۹۳ مش با درصد خطای نسبی ۶/۰۷ درصد برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی استفاده شد. برای کاهش اثر شبکه‌ی محاسباتی در نتایج شبیه‌سازی، این تعداد مش برای همه‌ی مدل‌های این تحقیق یکسان در نظر گرفته شد. شکل ۶ شبکه‌ی محاسباتی به کار رفته در مدل‌های این تحقیق را نشان می‌دهد.

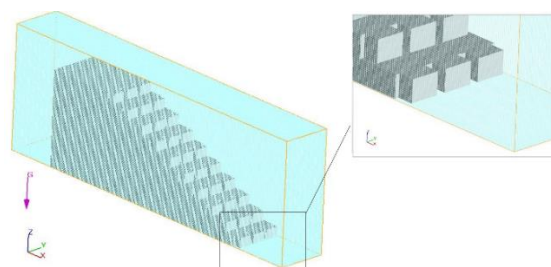


Fig. 6 Computational domain in this present research
شکل ۶ محدوده‌ی شبکه محاسباتی در این تحقیق

برای اعمال شرایط مرزی، در مرز بالایی از شرط مرزی تقارن، برای ورودی جریان از شرط مرزی دبی مشخص و برای مرز پایین‌دست، از شرط مرزی دبی خروجی استفاده شده است. شرط دبی خروجی برای مرزهایی استفاده می‌شود که جریان از آن قسمت نیز خارج می‌شود. این شرط مرزی برای سیال‌های غیرتراکم کاربرد داشته و بهترین شرط مرزی برای مرزهای خروجی در حوزه هیدرولیک است. برای دیواره‌ها و کف آبراهه شرط مرزی Wall تعریف شده است. در شرایط مرزی Wall، شرط عدم لغزش^۱ تحمیل شده و اصطکاک ناچیز در نظر گرفته می‌شود، بنابراین در مرز دیواره هیچ زبری اعمال نشده است (Ghaderi et al., 2020a). در شکل ۷ و جدول ۳ چگونگی اعمال شرایط مرزی به مدل سرریز پلکانی-کنگره‌ای در فضای محیط FLOW-3D، نشان داده شده است.

¹ No-slip

و آزمایشگاهی به همراه درصد خطای نسبی داده‌ها را نشان می‌دهد.

نرم‌افزار FLOW-3D با نتایج آزمایشگاهی Felder et al. (2012) برای پله‌های شماره ۸، ۹ و ۱۰ مقایسه و صحت سنجی شده است. شکل ۸ مقادیر توزیع سرعت نتایج عددی

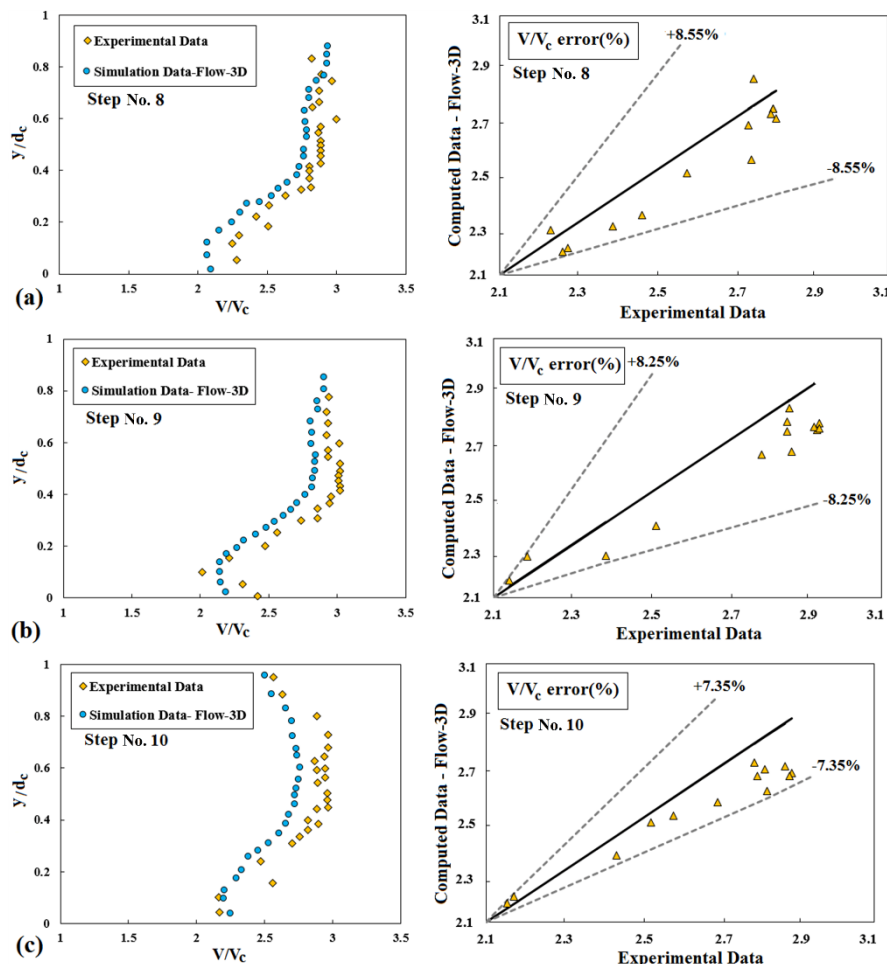


Fig. 8 Comparison of velocity distribution values in numerical and experimental models along with relative errors for discharge of $0.113 \text{ m}^3/\text{s}$

شکل ۸ مقایسه‌ی مقادیر توزیع سرعت جریان نتایج عددی و آزمایشگاهی به همراه محدوده‌ی درصد خطای نسبی داده‌ها برای دبی 0.113 متر مکعب بر ثانیه

غیرریزشی به صورت یک لایه‌ی پیوسته از روی پله‌ها عبور می‌کند. در این حالت پله‌ها مانند یک زبری در برابر جریان عمل می‌کنند. لذا قسمت اعظم استهلاک انرژی در این نوع رژیم، بر اثر ایجاد جریان‌های چرخشی زیر بستر کاذب ایجاد می‌گردد. شکل ۱۰ جریان‌های چرخشی ایجاد شده در زیر بستر کاذب در مدل سرریز پلکانی-کنگره‌ای مستطیلی را در پله‌های شماره ۲ و ۳ نشان می‌دهد. نکته قابل توجه در مورد سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای تداخل تیغه‌های جریان در عبور از لبه‌های قسمت کنگره‌ای شده پله‌ها در طول

با توجه به مقادیر به دست آمده مشاهده می‌شود که بیشترین درصد خطای نسبی برابر 8.55% درصد می‌باشد. نشانه منفی به این معناست که مقادیر به دست آمده از حل عددی، کمتر از مقادیر آزمایشگاهی می‌باشند. با این حال می‌توان نتیجه گرفت که تطابق نسبتاً خوبی بین نتایج حل عددی و مقادیر آزمایشگاهی وجود دارد.

۲-۴- نیمرخ سطح آب

شکل ۹ نیمرخ سطح آب جریان غیرریزشی عبوری از روی سرریزهای پلکانی را برای دبی 0.113 متر مکعب بر ثانیه نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که آب در رژیم جریان

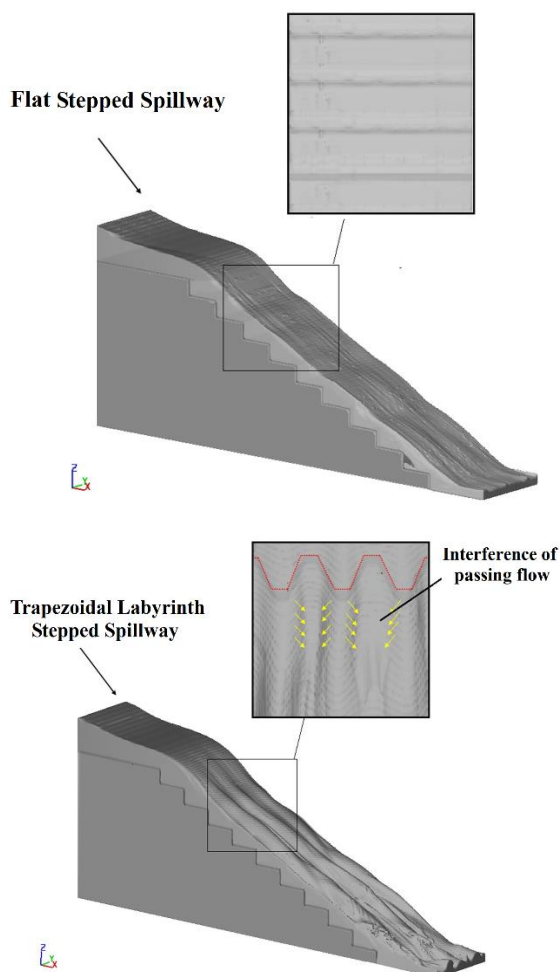


Fig. 11 Interference of passing flow on labyrinth steps
 شکل ۱۱ تداخل تیغه‌های جریان عبوری از پله‌های کنگره‌ای شده

با توجه به نتایج تحقیقات Chanson et al. (2002) مقاومت در برابر جریان تابعی از فرآیند گردش دوباره ناشی از گردابه‌های چرخشی موجود در ناحیه‌ی گردش دوباره است و استهلاك انرژی تحت تأثیر انتقال حرکت بین جریان حفره‌ای^۲ و جریان اصلی روی می‌دهد. هر چقدر این ناحیه‌ی گردش مجدد بزرگتر باشد، استهلاك انرژی جریان بیشتری رخ خواهد داد. شکل ۱۲ سرعت جریان عبوری از مدل‌های سرریز پلکانی این تحقیق را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که شکل کنگره‌ای ایجاد شده در پله‌ها باعث کاهش سرعت جریان از بالادست به پایین‌دست سرریزهای پلکانی شده، به طوری که کاهش سرعت در سرریز پلکانی-کنگره‌ای دوزنقه‌ای نسبت به سرریز پلکانی متعارف مشهودتر می‌باشد.

سرریز و افزایش ناحیه فرآیند گردش دوباره^۱ و ایجاد جریان چرخشی بیشتر در این نوع از سرریزهای پلکانی جدید می‌باشد (شکل ۱۱).

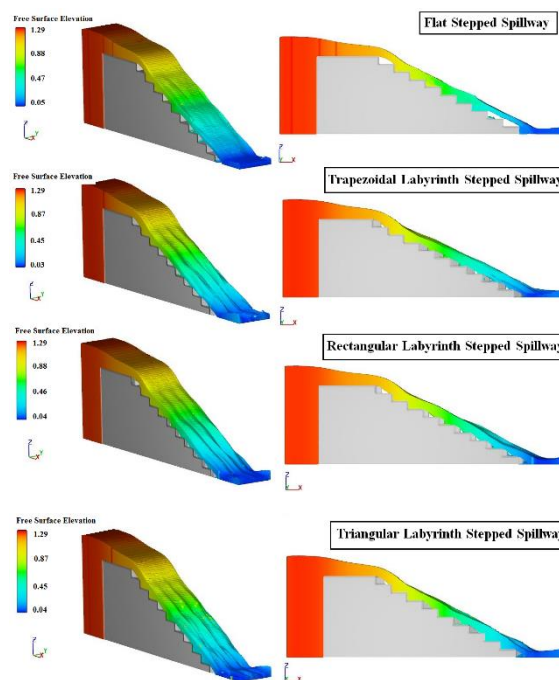


Fig. 9 Water surface profile in skimming flow on stepped spillway models

شکل ۹ نیمرخ سطح آب جریان غیرریزشی عبوری از مدل‌های سرریز پلکانی

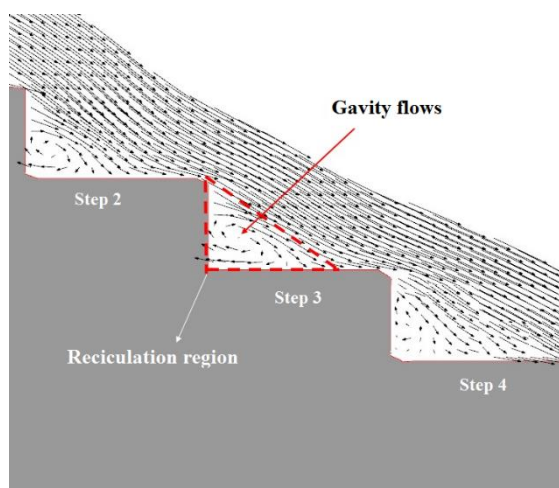


Fig. 10 Gravity flows beneath the recirculation regions passing flow in rectangular labyrinth spillway

شکل ۱۰ جریان‌های چرخشی ایجاد شده در زیر بستر کاذب عبوری از سرریز پلکانی-کنگره‌ای مستطیلی

² Gravity flow

¹ Recirculation region

در شکل هندسی پله‌های سرریز پلکانی و استفاده از حالت کنگره‌ای آن، میزان استهلاک انرژی $(\Delta H / H_0)$ و $(\Delta H / H_{max})$ و مقدار انرژی باقی‌مانده (H_{res}) در لبه‌ی پله‌ی آخر همه‌ی مدل‌های سرریز پلکانی-کنگره‌ای محاسبه شد. شکل ۱۳ مقادیر درصد استهلاک انرژی نسبی مدل‌های سرریز پلکانی-کنگره‌ای و سرریز پلکانی ساده را نشان می‌دهد.

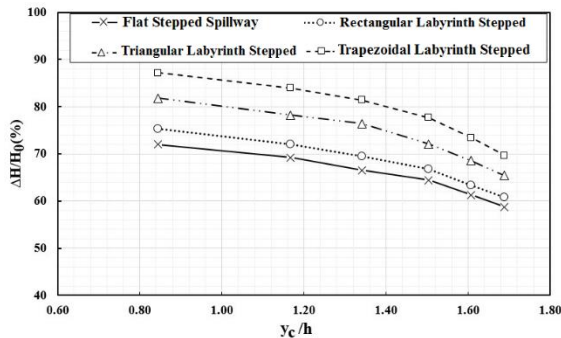


Fig. 13 Comparison of relative energy dissipation in labyrinth stepped spillway with flat stepped spillway

شکل ۱۳ مقایسه‌ی میزان استهلاک انرژی نسبی سرریز پلکانی-کنگره‌ای با سرریز پلکانی ساده

مشاهده می‌شود که ایجاد شکل کنگره‌ای در پله‌های سرریز پلکانی باعث افزایش میزان استهلاک انرژی در انتهای سرریز (پله آخر) می‌شود. همچنین در بین شکل‌های کنگره‌ای، سرریز پلکانی-کنگره‌ای ذوزنقه‌ای بیشترین میزان استهلاک انرژی را به خود اختصاص داده به طوری که برای شرایط جریان یکسان و دبی $0.80/0$ متر مکعب بر ثانیه سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای ذوزنقه‌ای، مثلثی و مستطیلی نسبت به سرریز پلکانی متعارف به ترتیب $1.8/30$ ، $1.2/95$ و $4/32$ درصد استهلاک انرژی بیشتری داشته‌اند. با افزایش دبی تأثیر شکل هندسی پله‌های کنگره‌ای در میزان استهلاک نسبی انرژی جریان برای همه‌ی مدل‌ها روندی رو به پایین و کاهشی دارد. شکل ۱۴ نرخ استهلاک انرژی جریان $(\Delta H / H_{max})$ را تابعی از عدد بی‌بعد $\Delta Z_0 / y_c$ برای همه‌ی مدل‌ها را نشان می‌دهد. ΔZ_0 فاصله عمودی تاج سرریز تا آخرین پله برای همه‌ی مدل‌های سرریز پلکانی می‌باشد. همچنین برای محاسبه‌ی بیشینه ارتفاع آب در بالادست سرریز، می‌توان برابر رابطه‌ی ۱۳ عمل کرد:

$$H_{max} = 1.5y_c + H_{dam} \quad (13)$$

که در این رابطه H_{dam} : ارتفاع سرریز و y_c : عمق بحرانی جریان می‌باشد. همچنین برای به دست آوردن

به عنوان مثال در پله‌ی شماره ۸ سرعت جریان در سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای ذوزنقه‌ای، مثلثی و مستطیلی نسبت به سرریز پلکانی ساده به ترتیب به میزان $23/76$ ، $4/62$ و $12/21$ درصد کاهش یافته است. علت کاهش سرعت جریان تداخل خطوط جریان و افزایش مقاومت در برابر جریان با ایجاد شکل کنگره در پله‌های سرریز می‌باشد.

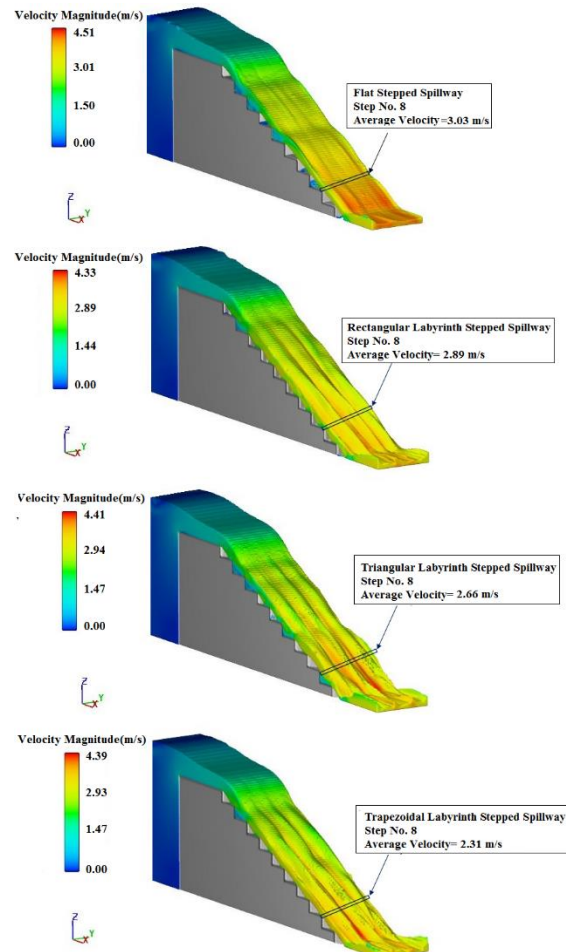


Fig. 12 Flow velocity on stepped spillway models

شکل ۱۲ سرعت جریان عبوری از مدل‌های سرریز پلکانی

۳-۴- استهلاک انرژی و انرژی باقی مانده

همواره انتقال آب جریان به پایین دست سازه‌های هیدرولیکی توسط سرریزها باعث ایجاد انرژی جنبشی زیادی می‌شود. پله‌ها در سرریزهای پلکانی باعث استهلاک انرژی جریان می‌شوند. مسئله مورد اهمیت، افزایش اثر این پله‌ها در میزان استهلاک انرژی جریان است. یکی از دغدغه‌های مهم مهندسان طراح، اطلاع از میزان استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی و مقدار انرژی باقی‌مانده در انتهای این نوع از سرریزها می‌باشد. در این تحقیق با ایجاد تغییرهایی

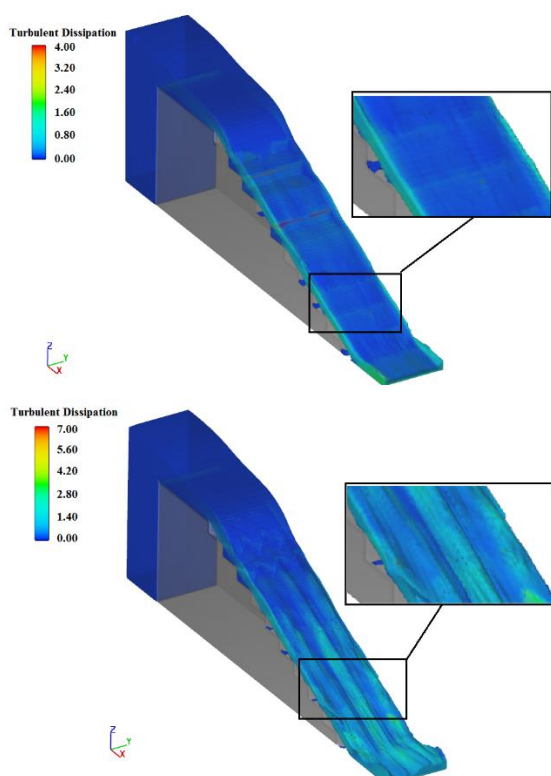


Fig. 15 Comparison of differences energy dissipation in labyrinth spillways with flat stepped spillway

شکل ۱۵ مقایسه تفاوت استهلاک انرژی جریان عبوری از سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای نسبت به سرریزهای پلکانی ساده

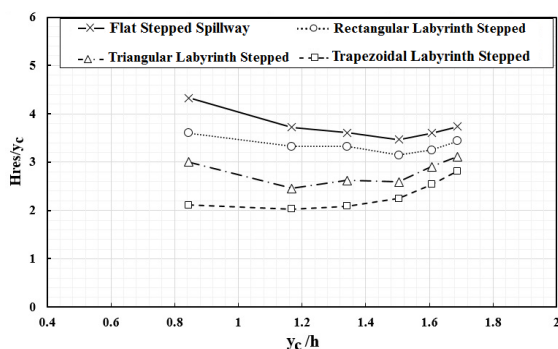


Fig. 16 Residual energy in stepped spillway models in this research

شکل ۱۶ مقادیر انرژی باقی‌مانده در مدل‌های سرریز پلکانی این تحقیق

مشاهده می‌شود در شرایط جریان یکسان، مقادیر انرژی باقی‌مانده بی‌بعد شده برای سرریز پلکانی متعارف بیشتر از مدل‌های پلکانی-کنگره‌ای است، به طوری که به عنوان مثال برای نسبت بی‌بعد $y_c/h=0.84$ مقدار ارتفاع بی‌بعد شده‌ی باقی‌مانده برای سرریز پلکانی متعارف برابر $H_{res}/y_c=4.32$ می‌باشد. این در حالی است که میانگین

نیاز به محاسبه‌ی H_{res} می‌باشد که برابر رابطه ۱۴ عمل می‌شود:

$$H_{res} = d \cos \theta + \frac{U_w^2}{2 \times g} \quad (14)$$

در این رابطه U_w ، d و θ به ترتیب سرعت جریان در محور مرکزی سرریز ($U_w = q/d$) (متر بر ثانیه)، شیب تنداب سرریز پلکانی، عمق معادل جریان (متر) و شتاب گرانش زمین (متر بر مجذور ثانیه) می‌باشند.

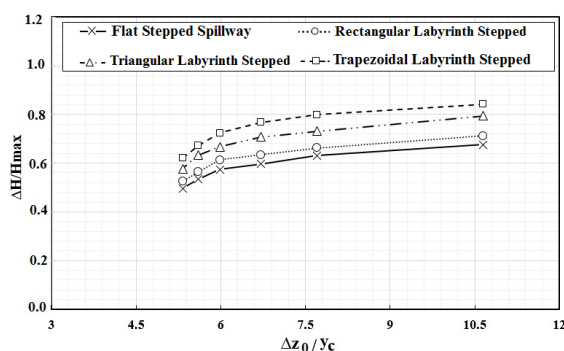


Fig. 14 Energy dissipation rate in stepped spillways of this research

شکل ۱۴ نرخ استهلاک انرژی در مدل‌های سرریز پلکانی این تحقیق

مشاهده می‌شود که نرخ استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای بیشتر از سرریز پلکانی ساده بوده و در شرایط جریان یکسان و دبی 0.065 متر مکعب بر ثانیه سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای دوزنقه‌ای، مثلثی و مستطیلی به ترتیب ۱۷، ۱۲/۱ و ۴/۶۶ درصد بیشتر نسبت به سرریز پلکانی متعارف در استهلاک انرژی موثر بوده‌اند. علت این امر در ایجاد تداخل جریان عبوری از پله‌ها با توجه به نوع شکل پله‌ها در اثر ایجاد شکل کنگره‌ای می‌باشد. در شکل ۱۵ به روشنی مشاهده می‌شود که ایجاد کنگره‌ای کردن پله‌های سرریز پلکانی باعث افزایش تداخل خطوط جریان عبوری از اطراف پله‌های کنگره‌ای شده و در نتیجه باعث افزایش استهلاک انرژی جریان به ویژه در پله‌های آخر سرریز نسبت به سرریز پلکانی با پله‌های ساده می‌شود.

شکل ۱۶ ارتفاع بی‌بعد شده‌ی باقی‌مانده (H_{res}/y_c) به عنوان معرف انرژی باقی‌مانده را به صورت تابعی از نسبت بی‌بعد شده عمق بحرانی به ارتفاع پله (y_c/h) به عنوان معرف شرایط جریان نشان می‌دهد.

مقدار ارتفاع بی‌بعد شده برای سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای برابر $H_{res}/y_c=2.57$ است.

۵- نتیجه‌گیری

سرریزهای پلکانی از جمله سرریزهایی هستند که به منظور بهبود شرایط هیدرولیکی جریان و استهلاک انرژی به کار می‌روند و با احداث این نوع از سرریزها ابعاد حوضچه آرامش و هزینه‌های جانبی کاهش می‌یابد. در این تحقیق سعی شد تا با ارائه شکل جدیدی از سرریزهای پلکانی با عنوان سرریز پلکانی-کنگره‌ای و ارزیابی عملکرد هیدرولیکی آن با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D در جهت بهبود شرایط استهلاک انرژی آن‌ها گام برداشت. از این رو نتایج زیر به دست آمد:

- بیشترین درصد خطایی به دست آمده از مقایسه نتایج توزیع سرعت بین داده‌های آزمایشگاهی (Felder et al. (2012) و نتایج نرم‌افزار FLOW-3D مربوط به پله شماره ۸ به مقدار ۸/۵۸ درصد بود که نشانگر سازگاری قابل قبول بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی می‌باشد.

- مشاهده شد در سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای، شکل کنگره‌ای پله‌ها باعث تداخل تیغه‌های جریان در عبور از لبه‌های قسمت کنگره‌ای در طول سرریز به هنگام انتقال به پایاب سرریز شده و این امر باعث افزایش ناحیه فرآیند گردش دوباره و ایجاد جریان چرخشی بیشتر در این نوع از سرریزهای پلکانی جدید می‌شود.

- ایجاد شکل کنگره‌ای در پله‌ها باعث کاهش سرعت جریان به هنگام انتقال به پایاب سرریز شده بطوریکه برای مثال در پله شماره ۸ سرعت جریان در سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای ذوزنقه‌ای، مثلثی و مستطیلی نسبت به سرریز پلکانی متعارف به ترتیب به میزان ۲۳/۷۶، ۱۲/۲۱ و ۴/۶۲ درصد کاهش یافته است. علت کاهش سرعت جریان تداخل خطوط جریان و افزایش مقاومت در برابر جریان با ایجاد شکل کنگره در پله‌های سرریز می‌باشد.

- مشاهده شد که ایجاد شکل کنگره‌ای در پله‌های سرریز پلکانی باعث افزایش میزان استهلاک انرژی در انتهای سرریز (پله آخر) می‌شود. همچنین در بین

شکل‌های کنگره‌ای، سرریز پلکانی-کنگره‌ای ذوزنقه‌ای بیشترین میزان استهلاک انرژی را به خود اختصاص داده به طوری که برای شرایط جریان یکسان و دبی ۰/۰۸ متر مکعب بر ثانیه سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای ذوزنقه‌ای، مثلثی و مستطیلی نسبت به سرریز پلکانی متعارف به ترتیب ۱۸/۳۰، ۱۲/۹۵ و ۴/۳۲ درصد استهلاک انرژی بیشتری داشته‌اند.

- نتایج ارتفاع باقی‌مانده (Residual head) نشان داد در شرایط جریان یکسان، مقادیر انرژی باقی‌مانده بی‌بعد شده برای سرریز پلکانی متعارف بیشتر از مدل‌های پلکانی-کنگره‌ای می‌باشد، به طوری که به عنوان مثال برای نسبت بی‌بعد $y/h=0.84$ مقدار ارتفاع بی‌بعد شده‌ی باقی‌مانده برای سرریز پلکانی متعارف برابر $H_{res}/y_c=4.32$ می‌باشد. این در حالی است که میانگین مقدار ارتفاع بی‌بعد شده برای سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای برابر $H_{res}/y_c=2.57$ می‌باشد.

۶- فهرست نشانه‌ها

Q	دبی عبوری از روی سرریز پلکانی (m^3/s)
V	سرعت جریان (m/s)
V_c	سرعت بحرانی جریان (m/s)
g	شتاب گرانش زمین (m/s^2)
d	عمق معادل جریان (m)
y	عمق جریان (m)
y_c	عمق بحرانی جریان (m)
y/h	عمق بحرانی نرمال شده
Fr	عدد فرود
Re	عدد رینولدز
l	طول پله سرریز پلکانی (m)
h	ارتفاع پله سرریز پلکانی (m)
W	عرض سرریز پلکانی (m)
θ	شیب تنداب سرریز پلکانی
N_0	تعداد پله سرریز پلکانی
N_c	تعداد چرخه کنگره‌ای
l_c	طول هر چرخه کنگره‌ای (m)

Civil Engineering Journal, 3(11), 1146-1156.

Daneshfaraz, R., Minaei, O., Abraham, J., Dadashi, S., and Ghaderi, A. (2019). 3-D Numerical simulation of water flow over a broad-crested weir with openings. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 1-9.

Felder, S. and Chanson, H. (2009). Energy dissipation, flow resistance and gas-liquid interfacial area in skimming flows on moderate slope stepped spillways. *Environ. Fluid*. 427-441.

Felder, S. Guenther, P.h. and Chanson, H. (2012). Air-water flow properties and energy dissipation on stepped spillways: a physical study of several pooled stepped configurations. No. CH87/12. School of Civil Engineering, the University of Queensland.

Felder, S. Guenther, P.h., Chanson, H. (2012a). Air-water flow properties and energy dissipation on stepped spillways. School of Civil Engineering the University of Queensland, Brisbane QLD4072, Australia. Report CH87/12.

Felder, S. Guenther, P.h. Chanson, H. (2012b). Air entrainment and energy dissipation on a 8°/9° slope stepped spillway with flat and pooled steps. School of Civil Engineering. The University of Queensland Brisbane QLD 4072. Australia. Report CH86/12.

Flow Science. (2016). Incorporated: FLOW-3D users manual. Version 11.2. Santa Fe, NM, USA.

Ghaderi, A. Dasineh, M. and Abbasi, S. (2019). Impact of Vertically Constricted Entrance on Hydraulic Characteristics of Vertical Drop (Numerical Investigation). *Journal of Hydraulics*. 13(4), 121-131.

Ghaderi, A. Abbasi, S., Abraham, J. and Azamathulla, H.M. (2020a). Efficiency of trapezoidal labyrinth shaped stepped spillways. *Flow Measurement and Instrumentation*, 72, 101711.

Ghaderi, A. Dasineh, M., Abbasi, S. and Abraham, J. (2020b). Investigation of trapezoidal sharp-crested side weir discharge coefficients under subcritical flow regimes using CFD. *Applied Water Science*, 10(1), 31.

Ghaderi, A. and Abbasi, S. (2019). CFD simulation of local scouring around airfoil-shaped bridge piers with and without collar. *Sādhanā*, 44(10), 216.

Gonzalez. C. A. and Chanson, H. (2007). Hydraulic design of stepped spillways and downstream energy dissipaters for embankment dams. *Dam Engineering*, 17(4), 223-244.

Haji Azizi, S. Samadi, A. and Salmasi, F. (2016). Numerical Study of Flow on Stepped Spillway and Its Comparison with Experimental Results. *Water and Soil Science*, 26(2-1), 155-165. (In Persian).

L_T طول مؤثر پله‌های سرریز پلکانی-کنگره‌ای (m)

ΔH میزان استهلاک انرژی (m)

H_{max} ارتفاع بیشینه آب بالادست سرریز پلکانی (m)

H_{res} ارتفاع (هد) باقی‌مانده جریان (m)

H_0 ارتفاع آب در بالادست سرریز (m)

H ارتفاع آب پیش از پرش (m)

H_{dam} ارتفاع سرریز پلکانی (m)

ΔZ_0 فاصله عمودی تاج سرریز تا آخرین پله (m)

μ گرانیوی دینامیکی (Pa.s)

ρ چگالی (kgm^{-3})

۷- منابع‌ها

Beheshti, M.R. Khosrojerdi, A. and Sedghi, H. (2015). Experimental Evaluation of Turbulence Parameters Distribution in Two Phase Air-water Flows on Stepped Spillways. *Water and Soil Science*, 25(1), 53-65. (In Persian).

Chanson, H. (1994). State of the Art of the Hydraulic Design of Stepped Chute Spillways. *Hydropower and Dams Journal*. 33-42.

Chanson, H. (2001). Hydraulic design of stepped spillway and downstream energy dissipators. *Dam Eng*. 11, 205-242.

Chen, Q. Dai, G. and Liu, H. (2002). Volume of fluid model for turbulent numerical simulation of stepped spillway overflow. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*. 128(70), 683-688.

Chow, V. T. (1959). *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill, New York, USA.

Christodoulou, G. C. (1993). Energy dissipation on stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*. 119(5), 644-650.

Daneshfaraz, R. Joudi, A. R. Ghahramanzadeh, A. and Ghaderi, A. (2016). Investigation of flow pressure distribution over a stepped spillway. *Advances and Applications in Fluid Mechanics*. 19(4), 811-822.

Daneshfaraz R, Ghahramanzadeh A, Ghaderi A, Joudi AR, Abraham J (2016) Investigation of the Effect of Edge Shape on Characteristics of Flow under Vertical Gates. *Journal-American Water Works Association*, 108(8): 425-432.

Daneshfaraz, R., and Ghaderi, A. (2017). Numerical Investigation of Inverse Curvature Ogee Spillway,

- Skimming Flow Regimes on Stepped Chutes. *Journal of Hydraulic Research*. 33(1), 119-122.
- Nohani, E. bahadoribirgani, B. Jalili, D. and Mirazizi, S. (2015). Study the Effect of The Number of Steps on Energy Dissipation of Stepped Spillways in Non-Nappe or Skimming Flow. *Journal of Novel Applied Sciences*. 4(9), 932-939.
- Nikseresht, A. H. Talebbeydokhti, N. and Rezaei, M. J. (2013). Numerical simulation of two-phase flow on step-pool spillways. *Scientia Iranica*. 20(2), 222-230.
- Peyras, L. Royet, P. and Degoutte, G. (1991). Flows and dissipation of energy on gabion weirs. *J. Houille Blanche*. No. 1, 37-47.
- Peyras, L. Royet P. and Degoutte, G. (1992). Flow and Energy Dissipation over Stepped Gabion Weirs. *Journal of hydraulic Engineering*, 118(5), pp. 707-717.
- Rajaratnam, N. (1990). Skimming flow in stepped spillway. *Journal of Hydraulic Engineering*. 116(4), 487-591.
- Rice C. E. and Kadavy, K. C. (1996). Model Study of a Roller Compacted Concrete Stepped Spillway. *Journal of Hydraulic Engineering*. 122(6), 292-297.
- Shahheydari, H. Nodoshan, E. J. Barati, R., and Moghadam, M. A. (2015). Discharge coefficient and energy dissipation over stepped spillway under skimming flow regime. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 19(4), 1174-1182.
- Sorensen, R. M. (1985). Stepped spillway hydraulic model investigation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(12), 1461-1472.
- Tabbara, M. Chatila, J. and Awwad, R. (2005). Computational simulation of flow over stepped spillways. *Comput. Struct.* 83, 2215-2224.
- Tongkratoke, A. Chinnarasri, C. Pornprommin, A. Dechaumphai, P. and Juntasaro, V. (2009). Non-linear turbulence models for multiphase recirculating free-surface flow over stepped spillways. *Int. J. Comput. Fluid Dyn* 23(5), 401-409.
- Zahabi, H. Torabi, M. Alamatian, E. Bahiraei, M. Goodarzi, M. (2018). Effects of Geometry and Hydraulic Characteristics of Shallow Reservoirs on Sediment Entrapment. *Water*, 10(12), 1725.
- Hamedi, A. Mansoori, A. Malekmohamadi, I. Roshanaei, H. (2011). Estimating energy dissipation in stepped spillways with reverse inclined steps and end sill. *World Environmental and Water Resources Congress. Bearing Knowl Sustain*. ASCE.
- Heydari Orojlo, S. Mousavi Jahromi, S.H. and Adib, A. (2011). Influence of the steeped spillway slope on the number of optimal steps. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering* 33(2), 127-140. (In Persian).
- Jam, Mahboobe Talebbeydokhti, N. and Mardashti, A. (2014). Evaluation of Energy Dissipation over Dentate Blocks Spillway and Comparing the Energy Dissipation with Stepped Spillway. *Journal of Hydraulics*. 9(2), 1-10. (In Persian).
- Kanaanie, S.M. Fazloul, R. Emadi, A. and Taghavi, J. (2016). The Effect of Flow on Stepped Spillway Walls of the Arch Parameters. *Journal of Engineering and construction Management*, 1(3), 12-15. (In Persian).
- Khatsuria, R. M. (2005). *Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators*. Marcel Dekker, New york.
- Rezapour Tabari, M. and Tavakoli, S. (2016). Effects of Stepped Spillway Geometry on Flow Pattern and Energy Dissipation. *Arabian Journal for Science & Engineering (Springer Science & Business Media BV)*. 41(4), 216-227.
- Mardashti, A. Talebbeydokhti, N. and Javan, M. (2008). Energy Loss Evaluation of Two Phase Over-Flow of Stepped Spillway with Downstream Scour Depth Method. *Journal of Hydraulics*. 2(4), 1-22. (In Persian).
- Moayeri, M.M. Hosseinzadeh Dalir, A. Samasi, F. Farsadizadeh, D. and Sadraddini, A.A. (2013). 2D Simulation of Flow over Stepped Spillways with Turbulent Models and Comparing the Results with Physical Model. *Water and Soil Science*, 23(1), 1-14. (In Persian).
- Morovati, K. Eghbalzadeh, A. and Soori, S. (2016). Study of Energy Dissipation of Pooled Stepped Spillways. *Civil Engineering Journal*. 2(5), 208-220.
- Mondardo, J. M. Fabiani, A. L. (1995). Comparison of Energy Dissipation between Nappe and