

EXTENDED ABSTRACT

Mathematical modeling of energy loss on Stepped Spillway Using ANSYS-CFX Numerical Model

S. Sarkamaryan¹ and J. Ahadiyan^{2*}

1- Ph.D. Student of Water Resource Management and Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

2*- Corresponding Author, Associate Professor, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran. (*ja_ahadiyan@yahoo.com*).

Received: 9 June 2017

Revised: 13 December 2017

Accepted: 18 December 2017

Keywords: Energy dissipation, The number of steps, Stepped spillway, Spillway slope, CFX numerical model.
DIO: 10.22055/jise.2017.22269.1593.

Introduction

A stepped spillway consists of steps that start from near the crown and continue to downstream heel. Generally, the amount of energy dissipation in stepped spillway is more than the one of flat spillways (with no steps) with the same dimensions. The high amount of energy dissipation caused by steps allows reducing the depth of drilling of downstream stilling basin, length of stilling basin, and the height of sidewalls. This way, a considerable economic saving is achieved in the implementation of dams. Since spillways help reduce flow rate and increase intake airflow rate, they can be referred to as a combination of a spillway and an energy dissipater. Some of the studies on stepped spillways are as follows:

Launder and Spalding (1972); Olsen and Kjellesvig (1998); Chen *et al.* (2002); Tabbara *et al.* (2005); Dermawan *et al.* (2010); Sori and Mojtahedi. 2015; Haji azizi *et al.* (2016)

So far, the studies on stepped spillways have been mostly on experimental and physical models. However, experimental and physical models are costly and sometimes have limitations such as required space and a large number of tests. This necessitates consideration of further mathematical and numerical models. Several numerical models can be introduced to analyze flow on a stepped spillway. CFX is one of the numerical models. CFX has been known as one of the most robust software for fluid flow analysis and heat transfer. The finite volume method (FVM) is a numerical method to solve the governing differential equations, which is capable of simulating complexities of a turbulent flow on a spillway appropriately. On the other hand, CFX numerical model uses the coupled model, which increases the speed to achieve results considerably as compared to other numerical models. This research aims at simulating a stepped spillway using CFX numerical model and assessing the amount of energy dissipation under geometric parameters (such as spillway height, spillway gradient, number of steps, and height of steps) and hydraulic parameters (such as flow rate). The difference between this research and other studies can be attributed to the coherence and correlation in studying various components (geometric and hydraulic parameters) and the ability of CFX numerical number in replacing some of the costly and time-consuming tests.

Material and Methods

CFX numerical model solves the equations governing flow (the Navier–Stokes equations) based on the FVM. As the flow on the spillway is turbulent, both the Navier–Stokes equations and solution of turbulent flow are needed. There are different methods to solve turbulent flows. Among them, $K - \varepsilon$ model is highly used in modeling turbulent flows, which was also adopted in this research. In stepped spillways, some parameters such as spillway geometry and the parameters related to flow hydraulic will cause energy changes in spillway downstream. To examine this issue, this article simulated different modes of step geometry and flow hydraulic using CFX numerical model.

Relations $\frac{\Delta H}{H_i}$ (energy dissipation relative to the total upstream energy) and $\frac{\Delta H}{L}$ (energy dissipation

relative to the length of the gradient face of a spillway) were used to assess energy dissipation. The experimental data obtained by Salmasi (2003) were used to examine the accuracy of CFX numerical model. Salmasi (2003) used the flumes with the widths of 25 cm and 50 cm for the tests.

Results and Discussion

To examine the energy dissipation changes for number of steps, flow rates, and different gradients, CFX numerical models for the spillways with the width of the 25 cm and 50 cm flumes were calibrated and verified in proportion to the experimental results. After making the statistical calculations of the results obtained from the spillway models with the 25 cm flume, the regression coefficients (R^2) for assessing the calibration and verification models were 0.98 and 0.91, respectively. Also, conducting the statistical calculations of the results obtained from the spillway models with the 50 cm flume, the regression coefficients for assessing the calibration and verification models were 0.97 and 0.87, respectively. The results showed an acceptable correlation between the experimental results and the numerical model simulated by CFX. After examining CFX numerical models and confirming their accuracy, the amount of energy dissipation under the influence of geometric parameters and hydraulic parameters of flow was assessed. The results proved that energy dissipation reduces with the flow rate and/or spillway gradient increasing, which is due to the reduction of roughness of steps caused by submergence of steps. With the increasing of number of steps in a spillway, the triangular space between steps becomes smaller, which reduces the size of spinning vortices on the steps, and consequently reduces energy loss. With the flow rate increasing in a certain spillway, the gradient of curves reduces. In other words, the rate of changes of energy dissipation in a spillway with fixed gradient and number of steps reduces with the flow rate increasing, which indicates that the impact of steps on energy dissipation reduces with the flow rate increasing. Assuming that the heights of stepped spillways are identical, the water flow on successive steps in lower gradient takes a longer route compared with steep gradients. Consequently, L (the vertical length of a step) increases with the gradient decreasing. Therefore, $\frac{\Delta H}{L}$ will be lower than the spillway with a steeper gradient in the spillways with lower gradient. The increase of number of steps and/or spillway gradients in a fixed flow rate reduces dissipation. The results show that the impact of flow rate on energy dissipation is greater than the effect of gradient and number of steps on energy loss.

Conclusion

This research simulated a stepped spillway using CFX numerical model. Meanwhile, the CFX numerical models were calibrated and validated relative to an experimental model. The calibration and validation results proved that the CFX numerical model responses were in good agreement with the experimental results. After examining the CFX numerical models and confirming their accuracy, we assessed the amount of energy dissipation under the influence of geometric parameters such as spillway height, spillway gradient, number of steps, height of steps, and the hydraulic parameters

such as flow rate. Research results showed that the impact of flow rate on energy dissipation exceeds the one of gradient and number of steps on energy loss. With the flow rate or spillway gradient increasing or with the number of steps in a spillway increasing, the effect of steps and relative energy dissipation reduces. With the step height in a spillway with a fixed height increasing, the horizontal length of steps increases, the number of steps reduces, and the energy dissipation increases. In this mode, reduction of step height reduces energy loss and the rate of energy dissipation changes. The results proved that energy dissipation increases considerably with the spillway height increasing. With respect to the research results and examination of different parameters, it can be concluded that CFX numerical model can be considered as an appropriate alternative for some costly and time-consuming experimental methods due to the high accuracy of the results as compared with the experimental results and low computational cost.

Acknowledgement

The present study was carried out at the Hydraulic Laboratory of the Faculty of Water Engineering of Shahid Chamran University of Ahvaz; thus, we are thankful to all who have accompanied us on this path.

References

- 1- Chen, Q., Dai, G. and Liu, H., 2002. Volume of fluid model for turbulence numerical simulation of stepped spillway overflow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(7), pp. 683-688.
- 2- Dermawan, V. and Anwar, N., 2010. Hydraulic model of flow conditions on stepped spillway due to number of steps. *International Journal of Academic Research*, 2(5), pp. 200-205.
- 3- Hajiazizi, 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), pp. 155-165. (In Persian).
- 4- Launder, B.E. and Spalding, D.B., 1972. *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*, Academic Press.
- 5- Olsen, N.R. and Kjellesvig, H.M., 1998. Three-dimensional numerical flow modelling for estimation of spillway capacity. *Journal of Hydraulic Research*, 36(5), pp.775-784.
- 6- Salmasi, F., 2003. Hydraulic assessment stepped spillways using physical models. Ph.D Thesis. *Shahid Chamran University of Ahvaz*. (In Persian).
- 7- Sori, N. and Mojtahedi, A., 2015. Investigation of effects of the geometry on rate of energy dissipation of the flow over the stepped spillway using fuzzy inference systems. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 80(3), pp. 25-39.
- 8- Tabbara, M., Chatila, J. and Awwad, R., 2005. Computational simulation of flow over stepped spillways. *Journal of Computers & structures*, 83(27), pp. 2215-2224.



مدل سازی ریاضی افت انرژی در سرریزهای پلکانی با استفاده از مدل عددی ANSYS-CFX

سعید سرکریان^۱ و جواد احدیان^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری عمران مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲- نویسنده مسئول، دانشیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز ja_ahadiyan@yahoo.com

پذیرش: ۱۳۹۶/۹/۲۷

بازنگری: ۱۳۹۶/۹/۲۲

دریافت: ۱۳۹۶/۳/۱۹

چکیده

در این تحقیق سرریز پلکانی با استفاده از مدل عددی CFX شبیه‌سازی شده و میزان استهلاک انرژی تحت تأثیر پارامترهای هندسی پلکان‌ها و دبی عبوری جریان از روی سرریز بررسی شده است. در این زمینه برای مدل‌سازی آشفته‌گی جریان از مدل تلاطمی $k-\epsilon$ استاندارد استفاده گردیده است. برای دستیابی به اهداف این تحقیق، در ابتدا مدل‌های عددی CFX نسبت به یک مدل آزمایشگاهی مورد واسنجی و صحت‌سنجی قرار گرفتند. نتایج حاصل از واسنجی و صحت‌سنجی نشان داد که پاسخ‌های مدل عددی CFX تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. پس از آن میزان استهلاک نسبی انرژی به ازای تعداد پلکان‌ها، دبی‌ها و شیب‌های مختلف در مدل عددی CFX مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که در سرریز ده پلکانی، دبی در واحد عرض ۵۰ لیتر بر ثانیه بر متر، کاهش استهلاک انرژی در اثر افزایش دو برابر دبی، ۲۱/۹۶ درصد و در اثر افزایش دو برابر شیب، ۱۱/۳۸ درصد و در اثر افزایش دو برابر تعداد پلکان‌ها، ۵/۸۰ درصد می‌باشد. همچنین نتایج حاصل از ارزیابی مدل‌های عددی نشان داد که افزایش دو برابری ارتفاع پله در یک سرریز، در صورتی که شیب سرریز ثابت بماند و y_c/h برابر با دو باشد موجب افزایش استهلاک انرژی به میزان ۲۳/۶۱ درصد می‌شود. با توجه به نتایج بدست‌آمده در مجموع می‌توان عنوان کرد که مدل عددی CFX به دلیل دقت بالای نتایج بدست‌آمده نسبت به نتایج آزمایشگاهی و همچنین هزینه کم محاسباتی می‌تواند جایگزین مناسبی برای برخی از روش‌های آزمایشگاهی پرهزینه و زمان‌بر باشد.

کلیدواژه‌ها: استهلاک انرژی، تعداد پلکان‌ها، سرریز پلکانی، شیب سرریز، مدل عددی CFX.

مقدمه

جریان بر روی سرریزهای اوجی شکل از استفاده کرد. او با استفاده از فرضیه جریان پتانسیل توانست سطح آزاد آب و فشار تاج سرریز را تحلیل کند. نتایج ایشان تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان داد. Olsen و Kjellesvig (1998) جریان بر روی سرریزهای اوجی را در حالت دوبعدی و سه‌بعدی به‌ازای پارامترهای هندسی مختلف توسط روش‌های عددی مدل کردند و معادله‌های ناویراستوکس (Navier-Stokes) را با استفاده از مدل آشفته‌گی $K-\epsilon$ حل نمودند و ضریب دبی را برای سرریز اوجی به‌دست‌آوردند. Chen et al. (2002) با استفاده از روش حجم محدود جریان بر روی سرریزهای پلکانی را تشریح کرده و برای تعیین آشفته‌گی جریان از مدل $K-\epsilon$ استفاده نمودند. Tabbara et al. (2005) سرریز پلکانی را با استفاده از روش اجزای محدود تشریح نموده و از مدل $K-\epsilon$ استاندارد به‌منظور تعیین آشفته‌گی جریان استفاده کردند. Naderirad et al. (2008) استهلاک انرژی را در سرریز پلکانی و سرریز اوجی به‌وسیله روش حجم سیال مقایسه کرده و نشان دادند که نسبت استهلاک انرژی به انرژی اولیه در سرریز پلکانی به میزان ۹/۸۰ درصد نسبت به سرریز اوجی افزایش داشته است. Launder و

سرریز پلکانی متشکل از پله‌هایی است که از نزدیک تاج سرریز شروع و تا پاشنه پایین دست ادامه‌دارند. روی هم‌رفته میزان استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی بیشتر از سرریزهای صاف (بدون پلکان) با همان ابعاد می‌باشد. میزان استهلاک انرژی زیاد ایجادشده توسط پلکان‌ها باعث می‌گردد تا عمق حفاری حوضچه آرامش پایین‌دست، طول حوضچه آرامش و ارتفاع دیواره‌های جانبی آن کاهش یافته و از این نظر صرفه‌جویی اقتصادی زیادی در اجرای سد به وجود آید (Salmasi, 2003). این سرریزها به کاهش سرعت جریان و افزایش نرخ ورود هوا کمک می‌کنند و می‌توان از آن‌ها به‌عنوان ترکیبی از یک سرریز و یک مستهلک-کننده انرژی نام برد. از آنجایی که ساخت مدل فیزیکی سرریز پلکانی در طرح‌های کوچک زمان‌بر بوده و با توجه به پیشرفت‌های به‌وجودآمده در علوم رایانه‌ای امکان حل ماتریس‌هایی با ابعاد بزرگ‌تر فراهم آمده است، به همین سبب روش‌های عددی و مدل‌های تخصصی دینامیک سیالات محاسباتی به‌کار گرفته شده‌اند. Cassidy (1965) از اولین محققینی بود که از معادله لاپلاس و حل آن به روش تفاضلات محدود برای تشریح

پیچیدگی‌های جریان اغتشاشی بر روی سرریز را شبیه‌سازی کند. از طرف دیگر مدل عددی CFX برای حل معادله‌ها و رسیدن به پاسخ از روش Coupled استفاده می‌کند که سبب می‌شود تا سرعت رسیدن به نتایج در مقایسه با سایر مدل‌های عددی افزایش چشم‌گیری داشته باشد. هدف تحقیق حاضر شبیه‌سازی سرریز پلکانی با استفاده از مدل عددی CFX و ارزیابی میزان استهلاک انرژی تحت تأثیر پارامترهای هندسی مانند ارتفاع سرریز، شیب سرریز، تعداد پلکان‌ها، ارتفاع پلکان‌ها و پارامترهای هیدرولیکی جریان هم‌چون دبی می‌باشد. تفاوت تحقیق حاضر با سایر تحقیقات انجام‌شده از آنجمله می‌توان انسجام و همبستگی در بررسی مؤلفه‌های مختلف (پارامترهای هندسی و هیدرولیکی) و از طرف دیگر نشان دادن قابلیت مدل عددی CFX در جای‌گزینی برخی از آزمایش‌های پرهزینه و زمان‌بر عنوان کرد.

مواد و روش‌ها

همان‌گونه که در بخش‌های گذشته به آن اشاره شد در این تحقیق هدف اساسی شبیه‌سازی استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی تحت شرایط مختلف هندسه پلکان و هیدرولیک جریان می‌باشد. در این زمینه مدل عددی CFX مورد استفاده قرار گرفته است. این مدل بر اساس روش حجم محدود، معادله‌های حاکم بر جریان را حل می‌نماید. قوانین حاکم بر جریان یک سیال تراکم‌ناپذیر لزج توسط معادله پیوستگی و مومنتم که به معادله‌های ناوراستوکس (Navier-Stokes) معروف هستند، بیان می‌شوند. از آن‌جاکه جریان بر روی سرریز متلاطم می‌باشد، علاوه بر معادله‌های حاکم نیاز به حل جریان اغتشاشی می‌باشد. برای حل جریان‌های متلاطم روش‌های مختلفی وجود دارند. مهم‌ترین آن‌ها مدل‌های دو معادله‌ای می‌باشند که با توجه به ماهیت تلاطم در این سرریزها به کار گرفته می‌شوند. مدل $K - \epsilon$ بیشترین استفاده را در مدل‌های متلاطم داشته است که در دامنه وسیعی از مطالعات مهندسی کاربرد دارد.

برای بررسی میدان جریان در سرریز پلکانی، از آن‌جاکه این نوع جریان، جریانی آشفته است باید معادله‌های Navier-Stokes وابسته به زمان حل شوند و سپس معادله‌های آشفتگی به آن‌ها اضافه شود. با استفاده از قانون بقا جرم معادله پیوستگی به صورت رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \frac{\delta(\rho V_x)}{\delta x} + \frac{\delta(\rho V_y)}{\delta y} + \frac{\delta(\rho V_z)}{\delta z} = 0 \quad (1)$$

که (V_x) ، (V_y) و (V_z) بردارهای سرعت در مختصات کارترتین و (ρ) چگالی سیال می‌باشد. معادله مومنتم برای یک سیال (بدون در نظر گرفتن فرضیه‌های ساده‌شونده در خصوص خواص سیال) به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود که در جهت محور x بدین صورت خواهد بود:

Spalding (1972) از اولین کسانی بودند که مدل $K - \epsilon$ را ارایه کردند. Varjavand et al. (2009) بررسی استهلاک انرژی در سرریز پلکانی با استفاده از مدل عددی Fluent را انجام دادند و نتایج تحقیق خود را به صورت منحنی‌های هم‌فشار ارایه نمودند. Roshan et al. (2010) دو مدل ۱۲ و ۲۳ پلکانی را در یک شیب ۱۹/۲ درصد به صورت مدل آزمایشگاهی بررسی کردند و نشان دادند که استهلاک انرژی در مدل ۱۲ پلکانی بیش از مدل ۲۳ پلکانی می‌باشد. Dermawan و Anwar (2010) بر روی سرریز با شیب ۴۵ درجه در تعداد پلکان‌های متغیر به صورت فیزیکی تحقیق نمودند و به این نتیجه رسیدند که در سرریز ۳۲ پلکانی طول پرش هیدرولیکی تا حدود ۶۴ درصد کاهش یافته و عمق جریان در پایین دست سرریز تا ۷۱ درصد افزایش می‌یابد. Sori و Mojtabehi (2015) اثرات هندسه سرریز پلکانی در میزان استهلاک انرژی جریان عبوری را با استفاده از سیستم استنتاج فازی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاصل نشان داد که با افزایش مقدار دبی، میزان استهلاک انرژی کمتری حاصل می‌شود. تعداد پلکان و شیب معکوس روی پله‌ها نیز از مواردی بودند که مورد بررسی قرار گرفتند. با انجام آزمایش و تحلیلی نتایج به این نتیجه رسیدند که با افزایش تعداد پلکان و شیب معکوس روی هر پله، استهلاک انرژی بیشتر می‌شود. در نهایت پارامترهای استهلاک انرژی روی سرریز پلکانی با استفاده از سیستم استنتاج فازی مورد ارزیابی قرار گرفتند و اقدام به تهیه یک مدل سیستم استنتاج فازی بر اساس شرایط موجود شد. نتایج حاصل نشان داد که سیستم استنتاج فازی با مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌سازی عددی و داده‌های آزمایشگاهی دارای هم‌پوشانی مناسبی است. Hajiazizi et al. (2016) با استفاده از مدل عددی Fluent و مدل آشفتگی $K - \epsilon$ اقدام به شبیه‌سازی عددی یک مدل آزمایشگاهی سرریز پلکانی کرده و نتایج حاصل را نیز مورد مقایسه قرار دادند. نتایج حاصل نشان داد که پاسخ‌های مدل عددی Fluent تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد و می‌تواند به نتایج آن در پیش‌بینی جریان‌های چرخشی و پیچیده در سرریزهای پلکانی اعتماد نمود.

تاکنون بیشتر تحقیقات انجام‌شده بر روی سرریزهای پلکانی زمینه از طریق مدل‌های آزمایشگاهی و فیزیکی بوده است. این در حالی است که استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی و فیزیکی پرهزینه بوده و در برخی موارد دارای محدودیت‌هایی مانند فضای مورد نیاز و حجم بالای آزمایش‌ها می‌باشد. این امر ایجاب می‌نماید تا استفاده از مدل‌های ریاضی و عددی مورد توجه قرار گیرد. مدل‌های عددی متعددی به منظور تشریح جریان روی سرریز پلکانی می‌توان معرفی کرد. از جمله این مدل‌های عددی می‌توان به مدل CFX اشاره کرد. مدل عددی CFX به عنوان یکی از قدرتمندترین نرم‌افزارهای تحلیل جریان سیال و انتقال حرارت شناخته شده است. روش عددی حل معادله‌های دیفرانسیلی حاکم در این مدل روش حجم محدود می‌باشد که به خوبی می‌تواند

المان‌ها و زیاد شدن تعداد المان‌ها سبب طولانی شدن فرایند حل خواهد گردید. از طرف دیگر بزرگ بودن اندازه المان‌ها موجب کاهش دقت محاسبات و عدم مشاهده پدیده‌های میدان جریان می‌گردد. بدین ترتیب تعداد المان‌ها تنها باید در مناطق حساس بیشتر باشد. در محیط CFX-Mesh با استفاده از امکان مش دوبعدی توسعه یافته می‌توان به مش بندی دوبعدی پرداخت. شکل (۱) نحوه مش بندی در مدل ریاضی CFX را نمایش می‌دهد.

جریان به صورت دوفازی آب و هوا و از نوع همگن می‌باشد که از این مدل هنگامی استفاده می‌شود که دو فاز در هم نفوذ نمی‌کنند و مرز فازها همواره حفظ می‌شود و هدف از مدل سازی، پیگیری خط تماس دو فاز است. در این مدل سهم حجمی هر فاز در المان‌ها مشخص کننده آن است که المان حاوی کدام فاز است. سهم حجمی عددی بین صفر و یک است. هنگامی که سهم حجمی آب در یک المان خاص یک باشد به معنی آن است که سیال این المان آب است و هنگامی که سهم حجمی آب در یک المان صفر باشد به معنی خالی بودن آن از آب و پر بودن از فاز دیگر یعنی هوا است. در صورتی که سهم حجمی بین صفر و یک باشد، آن المان از هر دو فاز تشکیل شده است. با توجه به ماهیت پدیده اختلاط در عبور جریان از روی سرریز پلکانی در این تحقیق از همین روش به صورت دوفازی استفاده گردید که سهم حجمی به صورت تابع ریاضی به مدل تعریف گردید. از طرفی برای تعریف شرایط مرزی به مدل مطابق با شکل (۲) چندین حالت وجود دارد.

$$\frac{\partial \rho V_x}{\partial t} + \frac{\partial (\rho V_x V_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho V_y V_x)}{\partial y} + \frac{\partial (V_z V_x)}{\partial z} = \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} \quad (2)$$

$$+ R_x + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial V_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) + T_x$$

که (μ_e) ویسکوزیته مؤثر، (R_x) مقاومت توزیع شده و (T_x) افت ویسکوزیته می‌باشد. در یک جریان آرام مقدار ویسکوزیته مؤثر معمولاً برابر با ویسکوزیته دینامیکی می‌باشد. در معادله بالا (T_x) عبارت افت ویسکوزیته می‌باشد که به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود:

$$T_x = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial V_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) \quad (3)$$

این عبارت در جریان‌های غیرقابل تراکم حذف می‌گردد.

روند مش بندی در CFX کاملاً خودکار است. در ابتدا نواحی مختلف مدل معرفی شده و اختصاص داده می‌شوند و سپس پارامترهای مش بندی برای رسیدن به یک مش بندی مناسب که منجر به رسیدن به یک جواب منطقی در کمترین بازه زمانی می‌شود، معین می‌گردند. بدین منظور شاخص‌های طولی، تعداد و اندازه المان‌ها و نحوه توزیع آن‌ها، تنظیم می‌شود. هم‌چنین از آن‌جا که گردبان فشار و سرعت در نزدیکی دیواره و فضای مثلی شکل در بین پله‌ها زیاد می‌باشد باید از المان‌های بیشتری در این نواحی استفاده کرد. آن‌چه اهمیت دارد این است که تعداد المان‌های مش باید بهینه باشد بدین معنی که کوچک شدن اندازه

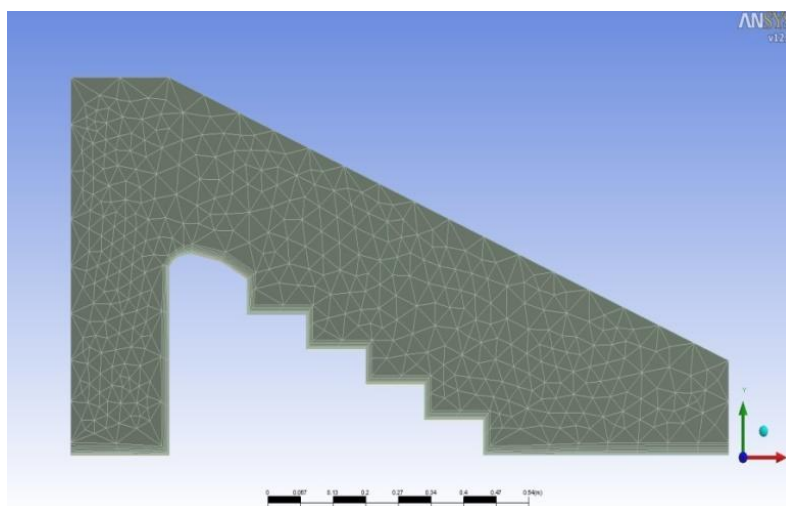


Fig. 1- Meshing method in the CFX models

شکل ۱- نحوه مش بندی در مدل CFX

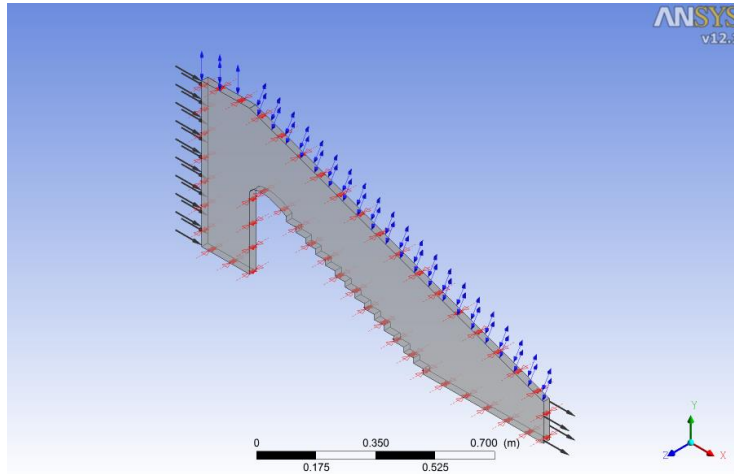


Fig. 2- Showing the model after applying the boundary condition

شکل ۲- نمایش مدل پس از اعمال شرایط مرزی

مربوط به هیدرولیک جریان (دبی، سرعت جریان، عمق بحرانی جریان) دانست. در این تحقیق از دو رابطه زیر جهت برآورد میزان استهلاک انرژی که با استفاده از رابطه انرژی استخراج می‌گردد، استفاده شده است:

$$\frac{\Delta H}{H_t} = \frac{H_t - H_1}{H_t} = 1 - \frac{H_1}{H_t} = 1 - \frac{(y_1 + \frac{V_1^2}{2g})}{1.5y_c + H_{dam}} \quad (4)$$

$$\frac{\Delta H}{L} = \frac{H_t - H_1}{L} = \frac{(1.5y_c + H_{dam}) - (y_1 + \frac{V_1^2}{2g})}{L} \quad (5)$$

در روابط فوق H_t انرژی کل در بالادست سرریز، (H_1) انرژی در پنجه سرریز و قبل از پرش هیدرولیکی، (H_{dam}) ارتفاع کل سرریز، (y_c) و (y_1) به ترتیب عمق بحرانی و عمق قبل از پرش هیدرولیکی و (V_1) سرعت متوسط قبل از پرش هیدرولیکی می‌باشند (Chanson and Toombes, 2004). هم‌چنین (L) طول وجه شیب‌دار سرریز است. بر این اساس رابطه (۴) استهلاک نسبی انرژی و رابطه (۵) استهلاک انرژی در واحد طول سرریز می‌باشد.

شکل (۳) نمونه‌ای از آزمایش شبیه‌سازی شده را برای تعداد پلکان پنج عدد، شیب ۲۵ درجه، ارتفاع سرریز ۳۲ سانتی‌متر در دبی ۱۴۸ لیتر بر ثانیه در واحد عرض سرریز می‌باشد.

برای ارزیابی تغییرات ($\frac{\Delta H}{H_t}$) (استهلاک نسبی انرژی) به

ازای تعداد پلکان‌ها، دبی‌ها و شیب‌های مختلف، ابتدا می‌بایست تا مدل‌های عددی CFX برای سرریزهای فلوم ۲۵ و ۵۰ سانتی‌متری نسبت به نتایج آزمایشگاهی، واسنجی و صحت‌سنجی صورت بپذیرد. در همین زمینه مدل سرریز فلوم ۲۵ سانتی‌متری

حوزه حل مسئله شش وجه دارد که دو وجه کناری آن از نوع Symmetry است که جهت شبیه‌سازی دوبعدی استفاده می‌شود. مرز ورودی از نوع inlet بوده که تابع سهم حجمی آب‌هوا در آن مشخص است و با توجه به دبی عبوری و ارتفاع سطح آب در بالادست سرریز، از طریق معادله پیوستگی دارای سرعت قابل تعریف می‌باشد (Zandighoharizi and Azhdarimoghdam, 2011). شرط مرز خروجی آن outlet است که تغییرات فشار در آن صفر می‌باشد. کف دامنه حل از نوع شرط مرزی wall تعریف شده که در آن اثرات زبری و غیر لغزشی بودن دیواره لحاظ شده است و قسمت بالای دامنه opening است که اجازه تبادل سیال هوا را می‌دهد و گرادیان فشار در آن صفر است.

با توجه به شرایط اعمال شده در این تحقیق حالت‌های مختلف از هندسه پلکان و هیدرولیک جریان با استفاده از مدل ریاضی یادشده شبیه‌سازی گردید. هم‌چنین برای بررسی دقت مدل ریاضی از داده‌های آزمایشگاهی انجام شده توسط Salmasi (2003) استفاده شد. در تحقیقات Salmasi (2003) از فلوم به عرض‌های ۲۵ و ۵۰ سانتی‌متر جهت آزمایش‌ها استفاده شده است که سرریز فلوم ۵۰ سانتی‌متری به ارتفاع یک متر و در شیب ۴۵ درجه و در تعداد پلکان‌های مختلف بود و سرریز فلوم ۲۵ سانتی‌متری دارای ارتفاع ۳۲ سانتی‌متر و در شیب‌های ۱۵، ۲۵ و ۴۵ درجه و در تعداد پلکان‌های متفاوت ساخته شد. در تحقیق وی قسمت‌منحنی اوجی شکل بالادست سرریزها به صورت $Y = 1.68X^{1.85}$ (برای سرریزهای به عرض ۵۰ سانتی‌متر) و $Y = 2.29X^{1.85}$ (برای سرریزهای به عرض ۲۵ سانتی‌متر) طراحی و ساخته شد.

نتایج و بحث

به‌طور کلی می‌توان عوامل اصلی استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی را شامل مواردی از جمله هندسه سرریز (ارتفاع سرریز، شیب سرریز، تعداد پلکان‌ها، ارتفاع پلکان‌ها) پارامترهای

صحت‌سنجی به‌ترتیب برابر با $0/98$ و $0/91$ به‌دست آمد. برای انجام محاسبات آماری دقیق‌تر میزان خطا به روش RMSE نیز محاسبه گردید که این میزان خطا برای مدل‌های واسنجی و صحت‌سنجی به‌ترتیب برابر با $3/58$ و $10/4$ به‌دست آمد. در نتایج حاصل از واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌های سرریز با فلوم 50 سانتی‌متری نیز مطابق با شکل (۵) میزان ضریب رگرسیون برای مدل‌های واسنجی و صحت‌سنجی به‌ترتیب برابر با $0/97$ و $0/87$ به‌دست آمد. میزان خطای RMSE نیز برای مدل‌های واسنجی و صحت‌سنجی شده به‌ترتیب برابر با $3/19$ و $7/4$ به‌دست آمد. نتایج حاصل نشان داد که همبستگی قابل قبولی بین نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی شبیه‌سازی شده با استفاده از CFX وجود دارد.

ابتدا توسط مدل‌های سرریز با تعداد پلکان پنج عدد و شیب‌های 15 ، 25 و 45 درجه مورد واسنجی و سپس توسط مدل‌های با شیب 15 و تعداد پلکان 15 و 30 مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. نتایج حاصل از واسنجی و صحت‌سنجی مدل سرریز فلوم 25 سانتی‌متری در شکل (۴) نشان داده شده است. مدل سرریز فلوم 50 سانتی‌متری نیز ابتدا توسط مدل‌های سرریز با شیب 45 درجه و تعداد پلکان 20 و 35 مورد واسنجی و سپس مدل با شیب 45 و تعداد پلکان 15 مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. نتایج حاصل از واسنجی و صحت‌سنجی مدل سرریز فلوم 50 سانتی‌متری در شکل (۵) نشان داده شده است. مطابق با شکل (۴) در نتایج حاصل از واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌های سرریز با فلوم 25 سانتی‌متری، پس از انجام محاسبات آماری مشخص شد که ضریب رگرسیون (R^2) برای ارزیابی مدل‌های واسنجی و

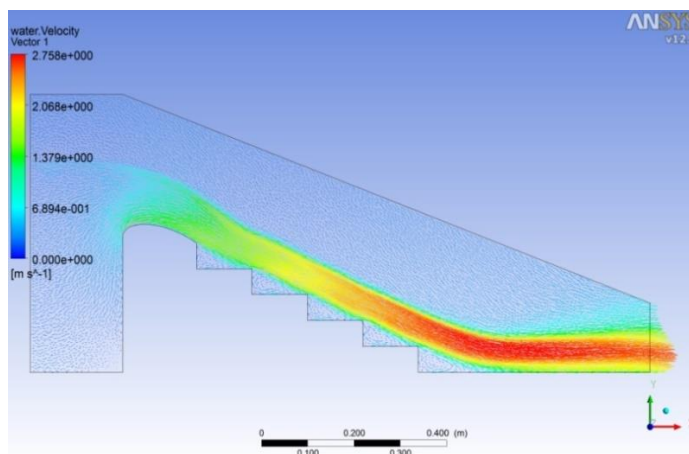


Fig. 3-The simulated test of the five numbers step for the 148 lit/s/m flow

شکل ۳- آزمایش شبیه‌سازی شده پلکان ۵ عدد در دبی 148 lit/s/m

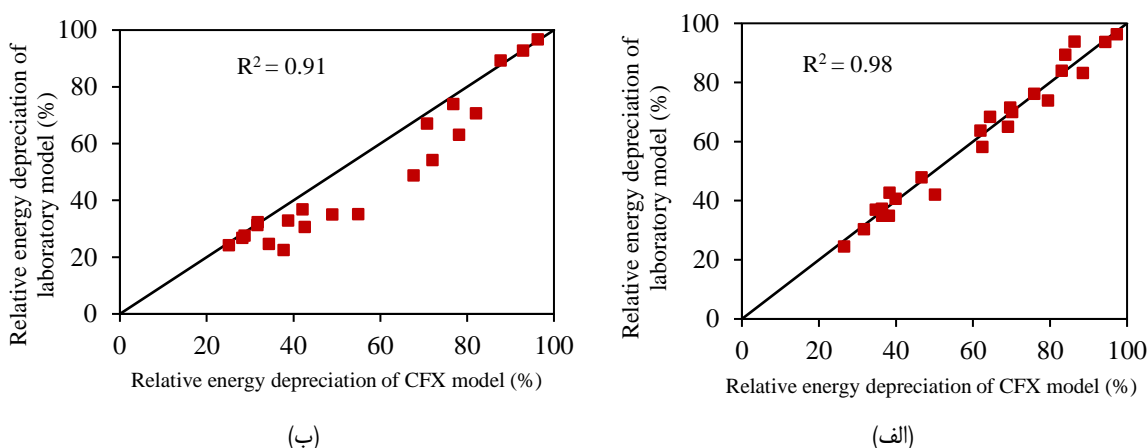


Fig. 4- Comparison of the energy relative dissipation between the numerical model and laboratory data of the 25 cm flume spillway (a) The results of calibration (b) The results of verification

شکل ۴- مقایسه استهلاك نسبی انرژی بین مدل عددی و داده‌های آزمایشگاهی سرریز فلوم 25 cm (الف) نتایج حاصل از واسنجی (ب) نتایج حاصل از صحت‌سنجی

می‌باشد. همچنین با افزایش تعداد پلکان‌ها در یک سرریز فضای مثلثی شکل بین پلکان‌ها کوچک‌تر شده که باعث کاهش اندازه گرداب‌های چرخشی بر روی پله‌ها و در نتیجه موجب کمتر شدن افت انرژی می‌شود. به‌عنوان نمونه در شکل (۶) قسمت الف در سرریز ده پلکانی با شیب ۱۵ درجه و در دبی 50 lit/s/m میزان استهلاک انرژی برابر $60/37$ درصد است. درحالی‌که با افزایش تعداد پلکان‌ها (در سرریز ۱۵ پلکانی) با همان شیب و دبی این مقدار برابر ۵۸ درصد می‌باشد.

پس از بررسی مدل‌های عددی CFX و تأیید میزان دقت آن‌ها نوبت ارزیابی میزان استهلاک انرژی تحت‌تأثیر پارامترهای هندسی مانند ارتفاع سرریز، شیب سرریز، تعداد پلکان‌ها، ارتفاع پلکان‌ها و پارامترهای هیدرولیکی جریان هم‌چون دبی می‌باشد. به‌عنوان نمونه شکل (۶) تغییرات استهلاک نسبی انرژی به‌ازای تغییرات دبی را برای تعداد پلکان‌های متفاوت در شیب ثابت نمایش می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۶) و (۷) مشاهده می‌شود، استهلاک انرژی با افزایش دبی جریان و یا شیب سرریز کاهش می‌یابد که این امر به‌دلیل کاهش زبری پله‌ها در اثر استغراق پله‌ها

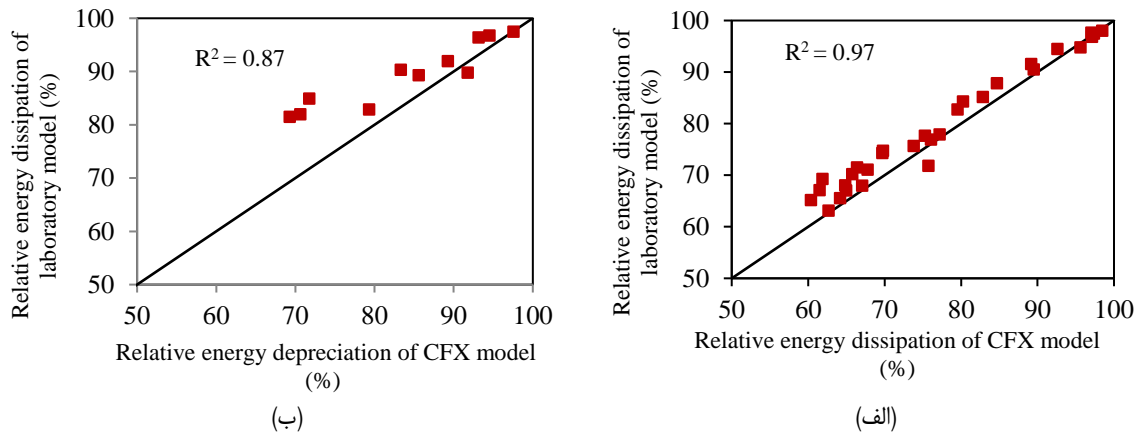


Fig. 5- Comparison of the energy relative dissipation between the numerical model and laboratory data of the 50 cm flume spillway (a) The results of calibration (b) The results of verification

شکل ۵- مقایسه استهلاک نسبی انرژی بین مدل عددی و داده‌های آزمایشگاهی سرریز فلوم 50 cm (الف) نتایج حاصل از واسنجی (ب) نتایج حاصل از صحت‌سنجی

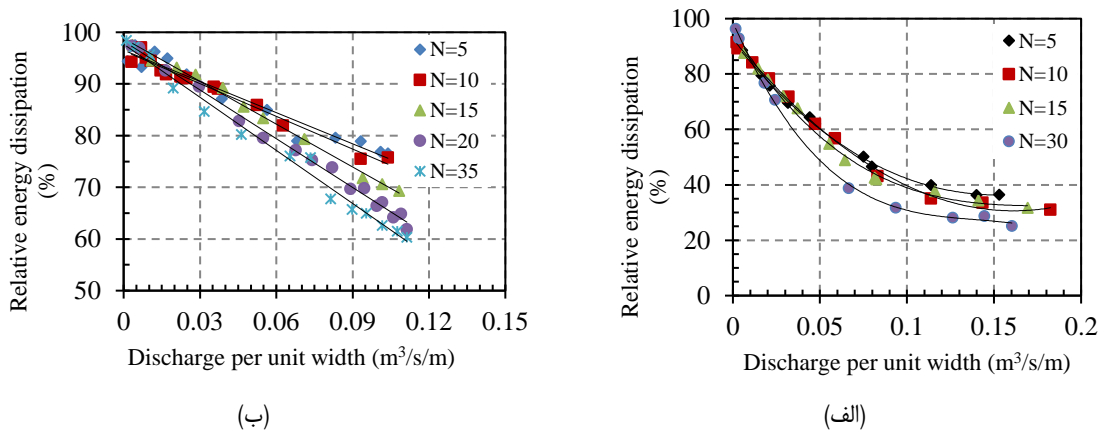


Fig. 6- Energy dissipation changes due to the discharge increment in the spillway (a) The spillway with the 15-degree slope and the 25 cm wide for the various numbers of step (b) The spillway with the 45-degree slope and the 50 cm wide for the various numbers of step

شکل ۶- تغییرات استهلاک نسبی انرژی در سرریز (الف) سرریز با شیب ۱۵ درجه با عرض 25 cm به ازای تعداد پلکان مختلف (ب) سرریز با شیب ۴۵ درجه با عرض 50 cm به ازای تعداد پلکان متفاوت

(استهلاک انرژی در واحد طول وجه شیب‌دار سرریز) به‌جای $\left(\frac{\Delta H}{H_t}\right)$ و با فرض یکسان بودن ارتفاع سرریزهای پلکانی، با توجه به این که جریان آب از روی پله‌های متوالی در شیب‌های کمتر مسیر طولانی‌تری را نسبت به شیب‌های تند طی خواهد نمود، مقدار L (طول افقی پله) با کاهش شیب افزایش پیدا کرده و بدین ترتیب در سرریزهای با شیب کمتر، مقدار $\left(\frac{\Delta H}{L}\right)$ کمتر از سرریز با شیب تندتر می‌گردد. شکل (۸) تغییرات استهلاک انرژی در واحد طول سرریز در مقابل دبی برای شیب‌ها و تعداد پلکان‌های متفاوت را نمایش می‌دهد. به‌عنوان نمونه مطابق با شکل (۸) در سرریز پنج پلکانی در شیب ۱۵ درجه مقدار استهلاک انرژی در واحد طول سرریز در دبی $lit/s/m$ ۵۰ برابر $20/26$ درصد بوده درحالی که با افزایش شیب تا ۴۵ درجه این مقدار به $41/04$ درصد افزایش یافته است.

مطابق با شکل (۷) مشخص می‌شود در سرریز ده پلکانی و دبی $lit/s/m$ ۵۰ با افزایش شیب از ۱۵ به ۴۵ درجه میزان استهلاک انرژی از $37/37$ به $60/37$ درصد کاهش یافته است. همچنین مشخص است که در همین سرریز و در دبی $lit/s/m$ ۱۰۰، در شیب ۱۵ درجه نیز میزان استهلاک انرژی از $38/41$ درصد به $23/03$ درصد در شیب ۴۵ درجه کاهش یافته است. با افزایش دبی در یک سرریز مشخص شیب منحنی‌های ترسیم‌شده کاهش می‌یابد و یا به عبارت دیگر نرخ تغییرات استهلاک انرژی در یک سرریز با شیب و تعداد پلکان‌های ثابت، با افزایش دبی کاهش می‌یابد که حاکی از آن است که با افزایش دبی میزان تأثیرگذاری پلکان‌ها بر استهلاک انرژی کم می‌شود. برای بررسی دقیق‌تر جدول (۱) برخی از نتایج حاصل از شکل‌های (۶) و (۷) را در دبی‌های ۵۰ و ۱۰۰ لیتر بر ثانیه در واحد عرض به‌صورت مقایسه‌ای نمایش می‌دهد. در صورت استفاده از $\left(\frac{\Delta H}{L}\right)$

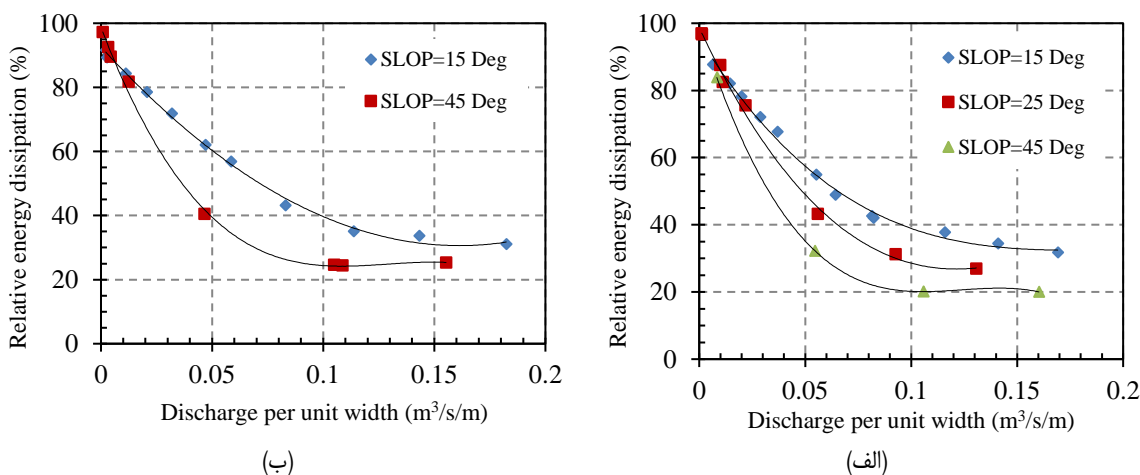


Fig. 7- Energy dissipation changes due to the flow increment in the spillway (a) The 15-step spillway with 25 cm wide for the various slopes (b) The 10-step spillway with 25 cm wide for the various slopes

شکل ۷- تغییرات استهلاک انرژی در اثر افزایش دبی در سرریز (الف) سرریز ۱۵ پلکانی با عرض ۲۵ cm به ازای شیب‌های متفاوت (ب) سرریز ۱۰ پلکانی با عرض ۲۵ cm به ازای شیب‌های متفاوت

جدول ۱- مقایسه استهلاک انرژی برای سرریزهای ۱۰ و ۱۵ پلکانی با عرض ۲۵ cm در شیب‌های مختلف

Table 1- Comparison of the energy dissipation for the 10 and 15 steps spillway with the 25 cm wide in the various slopes

Number of Steps	Slope (degree)	Relative energy dissipation (%)	
		Discharge per unit width (50 $m^3/s/m$)	Discharge per unit width (100 $m^3/s/m$)
10	15	60.37	38.41
10	45	37.65	23.03
15	15	57.92	38.00
15	25	47.63	30.36
15	45	35.18	20.18

بسیار از استهلاک انرژی ۵/۸۰ درصد کاسته می‌شود. از طرفی با دو برابر کردن شیب از ۱۵ به ۳۰ درجه در همان دبی مقدار کاهش استهلاک انرژی ۱۱/۳۸ درصد می‌شود. با توجه به کاهش ۲۱/۹۶ درصدی مقدار استهلاک انرژی مطابق با جداول (۲) و (۳) در اثر دو برابر کردن دبی می‌توان به این نتیجه رسید که تأثیرگذاری دبی بر استهلاک انرژی بیش از اثر شیب و تعداد پلکان‌ها می‌باشد.

برای بررسی دقیق‌تر میزان تأثیر شیب و تعداد پلکان‌های سرریز بر میزان افت انرژی در دبی‌های یکسان جداول (۲) و (۳) از نتایج شبیه‌سازی استخراج شده است. با توجه به اعداد مندرج در جداول (۲) و (۳) مشخص می‌شود که افزایش تعداد پلکان‌ها و یا شیب سرریز در یک دبی ثابت موجب کاهش مقدار استهلاک انرژی شده به‌گونه‌ای که در سرریز ده پلکانی با شیب ۱۵ درجه و در دبی $lit/s/m$ ۵۰ با دو برابر کردن تعداد پله‌ها از ده به

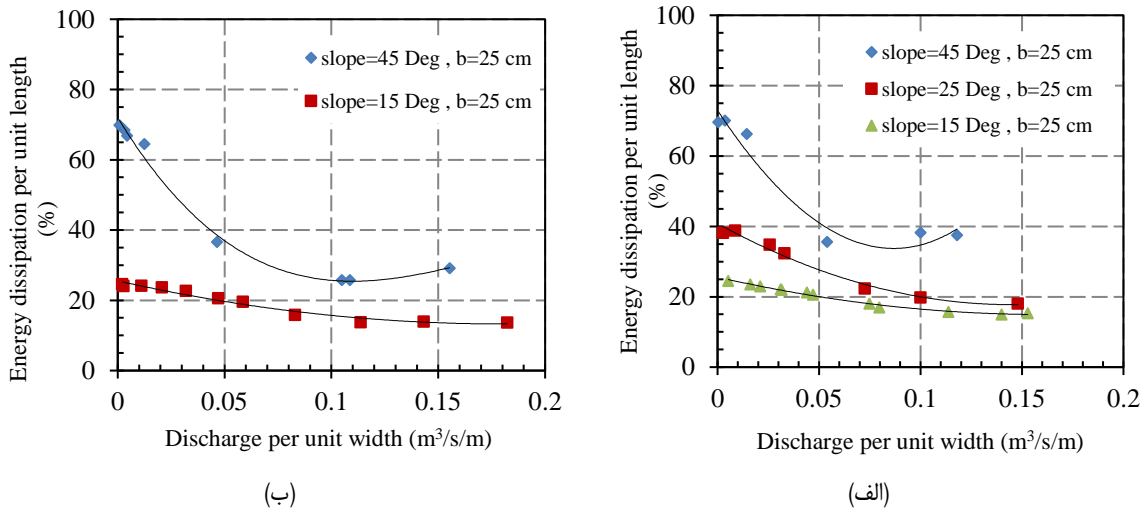


Fig. 8- Energy dissipation changes in the length unit due to the discharge increment in the spillway (a) The 5 step spillway for the various slopes (b) The 10 step spillway for the various slopes
 شکل ۸- تغییرات استهلاک انرژی در واحد طول در اثر افزایش دبی در سرریز (الف) سرریز ۵ پلکانی به ازای شیب‌های متفاوت (ب) سرریز ۱۰ پلکانی به ازای شیب‌های متفاوت

جدول ۲- تأثیر تعداد پلکان بر استهلاک انرژی با عرض ۲۵ cm

Table 2- The effect of the step number on the energy dissipation with the 25 cm wide

Slope (degree)	Number of Steps	Relative energy dissipation (%)		Energy dissipation difference (%)
		Discharge per unit width (50 m³/s/m)	Discharge per unit width (100 m³/s/m)	
15	10	60.37	38.41	-21.96
15	20	54.57	34.04	-20.53
Energy dissipation difference (%)		-5.80	-4.38	

جدول ۳- تأثیر شیب سرریز بر استهلاک انرژی با عرض ۲۵ cm

Table 3- The effect of the spillway slope on the energy dissipation with the 25 cm wide

Number of Steps	Slope (degree)	Relative energy dissipation (%)		Energy dissipation difference (%)
		Discharge per unit width (50 m³/s/m)	Discharge per unit width (100 m³/s/m)	
10	15	60.37	38.41	-21.96
10	30	48.99	30.72	-18.26
Energy dissipation difference (%)		-11.38	-7.69	

مقدار استهلاک نسبی افزوده می‌شود. شکل (۱۰) تغییرات استهلاک انرژی در مقابل $(\frac{y_c}{h})$ را به ازای تعداد پلکان‌های متفاوت نمایش می‌دهد.

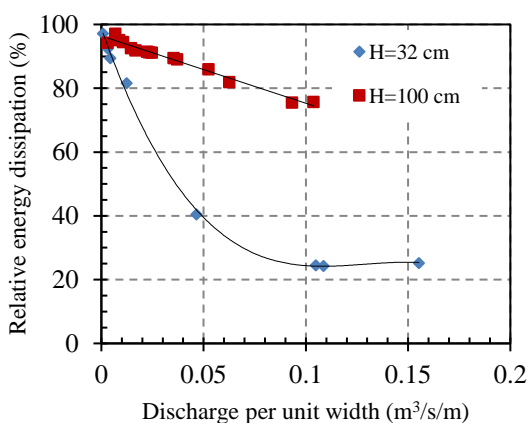
با بررسی دقیق‌تر ابعاد شکل (۱۰) می‌توان دریافت که با افزایش پارامتر بدون بعد (y_c/h) از استهلاک انرژی نسبی کاسته می‌شود که بیانگر کاهش افت انرژی نسبت به افزایش دبی می‌باشد. همچنین با افزایش ارتفاع پله (h) در دبی و شیب ثابت، نرخ تغییرات استهلاک انرژی (شیب خط منحنی‌های ترسیمی) نیز افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده تأثیر مثبت ارتفاع پله بر میزان استهلاک انرژی می‌باشد و با کاهش ارتفاع پله (h) این نرخ تغییرات کمتر شده به نحوی که شیب خط منحنی‌های ترسیمی به صفر نزدیک می‌شود و این بدین معنا می‌باشد که تأثیرگذاری ارتفاع پله بر استهلاک انرژی بسیار کم شده و به عبارتی استهلاک انرژی مستقل از ارتفاع پله می‌شود. در سرریز پنج پلکانی و در شیب ۱۵ درجه با مقایسه مقادیر $(\frac{y_c}{h})$ مشخص است که دو برابر کردن ارتفاع پله موجب افزایش استهلاک به میزان ۲۳/۶۱ درصد می‌گردد.

در مجموع نتایج و محاسبات آماری نشان داد که استهلاک انرژی به‌طور متوسط در مدل عددی CFX برای سرریز پلکانی به ارتفاع ۳۲ سانتی‌متر معادل ۵۸/۴ درصد و برای سرریز پلکانی به ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر معادل ۸۲/۶۸ درصد می‌باشد این نتایج نشان‌دهنده آن است که با افزایش ارتفاع سرریز میزان استهلاک انرژی به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد.

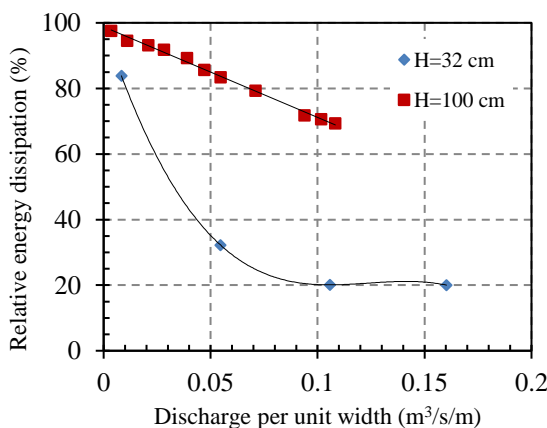
به‌منظور بررسی اثر ارتفاع سرریز بر استهلاک انرژی، برای سرریز دو ارتفاع ۳۲ و ۱۰۰ سانتی‌متری مشخص گردید که ارتفاع سرریز رابطه مستقیمی با استهلاک انرژی داشته، به‌صورتی که با افزایش ارتفاع سرریز، استهلاک انرژی نیز افزایش می‌یابد. شکل (۹) استهلاک انرژی برای سرریز پلکانی با ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر را نسبت به سرریز با ارتفاع ۳۲ سانتی‌متر را نمایش می‌دهد.

با توجه به شکل (۹) مشخص است که در سرریز با ارتفاع بیشتر میزان استهلاک انرژی بیشتر از سرریز با ارتفاع کمتر می‌باشد. این موضوع به این دلیل است که اندازه پله‌ها در سرریز با ارتفاع بیشتر، بزرگ‌تر بوده و در نتیجه اندازه گردابه‌ها در سرریز با ارتفاع بیشتر بسیار بزرگ‌تر می‌باشند. برای بررسی اثر ارتفاع پله، تغییرات استهلاک انرژی با توجه به مقادیر مختلف $(\frac{y_c}{h})$ در سرریزهای متفاوت مورد ارزیابی قرار گرفت. افزایش ارتفاع پله (h) در دبی و شیب ثابت، باعث افزایش استهلاک انرژی می‌شود و این موضوع به این دلیل است که استغراق پله‌ها با افزایش ارتفاع پله به تأخیر می‌افتد. لازم به‌ذکر است در صورت افزایش شیب و ثابت بودن کسر $(\frac{y_c}{h})$ ، استهلاک انرژی کاهش می‌یابد.

با توجه به اعداد مندرج در جدول (۴) میزان استهلاک انرژی سرریز پنج پلکانی و با شیب ۱۵ درجه و $\frac{y_c}{h} = 1$ برابر $\frac{61}{12}$ درصد بوده درحالی‌که در شیب ۲۵ درجه این مقدار به $\frac{55}{72}$ درصد می‌رسد. مطابق با جدول (۴) به ازای $(\frac{y_c}{h})$ ثابت، افزایش تعداد پله‌ها موجب افزایش ارتفاع سرریز شده و در نتیجه



(ب)



(الف)

Fig. 9- The energy dissipation changes to the spillway with the various heights (a) the 15-step spillway, (b) the 10-step spillway

شکل ۹- تغییرات استهلاک انرژی نسبت به دبی در سرریز با ارتفاع مختلف (الف) سرریز ۱۵ پلکانی، (ب) سرریز ۱۰ پلکانی

جدول ۴- تأثیر ارتفاع پله بر استهلاك انرژی

Table 4- The effect of the step height on the energy dissipation

Number of Steps	Slope (degree)	Relative energy dissipation (%)		Energy dissipation difference (%)
		$\frac{y_c}{h} = 1$	$\frac{y_c}{h} = 2$	
5	15	61.12	37.51	-23.61
5	25	55.72	29.63	-26.09
15	15	87.90	72.22	-15.68
15	25	85.82	69.27	-16.55

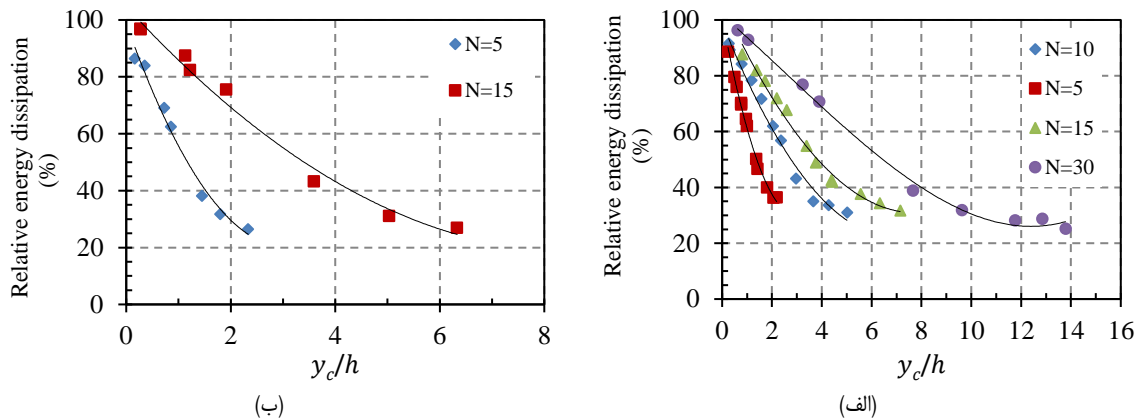


Fig. 10- The energy dissipation changes versus $\frac{y_c}{h}$ (a) The 15-degree slope, (b) The 25-degree slope
 شکل ۱۰- تغییرات استهلاك انرژی در مقابل $\frac{y_c}{h}$ (الف) شیب ۱۵ درجه، (ب) شیب ۲۵ درجه

می‌گردد. هم‌چنین میزان متوسط آماری افت انرژی از طریق مدل عددی برای سرریزهای به ارتفاع ۳۲ سانتی‌متر معادل ۵۸/۴ درصد و برای سرریز پلکانی به ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر معادل ۸۲/۶۸ درصد برآورد شد. این نتایج نشان‌دهنده آن است که با افزایش ارتفاع سرریز میزان استهلاك انرژی به میزان قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده و بررسی پارامترهای مختلف، در یک جمع‌بندی کلی می‌توان عنوان کرد که مدل عددی CFX به دلیل دقت بالای نتایج به‌دست‌آمده نسبت به نتایج آزمایشگاهی و هم‌چنین هزینه کم محاسباتی می‌تواند جایگزین مناسبی برای برخی از روش‌های آزمایشگاهی پرهزینه و زمان‌بر باشد.

سیاسگزاری

پژوهش حاضر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز، اجرا گردیده است که بدین وسیله لازم است تا از تمامی کسانی که ما را در این مسیر همراهی نموده‌اند، قدردانی به عمل آوریم.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان در یک جمع‌بندی چنین بیان کرد که تأثیرگذاری دبی بر استهلاك انرژی بیش از تأثیر شیب و اثر تعداد پلکان‌ها بر افت انرژی می‌باشد. هم‌چنین با افزایش دبی یا شیب سرریز یا افزایش تعداد پلکان‌ها در یک سرریز علاوه بر کاهش تأثیرگذاری پله‌ها از استهلاك انرژی نسبی نیز کاسته می‌شود. از طرفی با توجه به نتایج مشخص گردید که در سرریز ده پلکانی و در دبی 50 lit/s/m کاهش استهلاك انرژی در اثر افزایش دو برابر دبی ۲۱/۹۶ درصد و در اثر افزایش دو برابر شیب ۱۱/۳۸ درصد و در اثر افزایش دو برابر تعداد پلکان‌ها ۵/۸۰ درصد می‌شود. هم‌چنین افزایش ارتفاع پله در یک سرریز با ارتفاع ثابت (در صورتی که شیب سرریز ثابت بماند) موجب افزایش طول افقی پله‌ها و کاهش تعداد پلکان‌ها و افزایش استهلاك انرژی می‌شود. در این حالت کاهش ارتفاع پله علاوه بر کاهش افت انرژی، از میزان نرخ تغییرات استهلاك انرژی نیز می‌کاهد. در سرریز پنج پلکانی و در شیب ۱۵ درجه و در $\frac{y_c}{h} = 2$ دو برابر کردن ارتفاع پله موجب افزایش استهلاك به میزان ۲۳/۶۱ درصد

References

- 1- Cassidy, J.J., 1965. Irrotational flow over spillways of finite height. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 91(6), pp. 155-173.

- 2- Chanson, H. and Toombes, L., 2004. Hydraulics of stepped chutes: The transition flow. *Journal of Hydraulic Research*, 42(1), pp. 43-54.
- 3- Chen, Q., Dai, G. and Liu, H., 2002. Volume of fluid model for turbulence numerical simulation of stepped spillway overflow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(7), pp.683-688.
- 4- Dermawan, V. and Anwar, N., 2010. Hydraulic model of flow conditions on stepped spillway due to number of steps. *International Journal of Academic Research*, 2(5), pp. 200-205.
- 5- Hajiazizi, 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), pp.155-165. (In Persian).
- 6- Launder, B.E. and Spalding, D.B., 1972. *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*, Academic Press.
- 7- Naderirad, A, Bidokhti, N. and NikSeresht, A., 2008. Comparison of energy dissipation in stepped spillway with Ogee spillway by VOF numerical method. In *3th National civil Engineering Conference, Tabriz University, Tabriz, Iran*. (In Persian).
- 8- Olsen, N.R. and Kjellesvig, H.M., 1998. Three-dimensional numerical flow modelling for estimation of spillway capacity. *Journal of Hydraulic Research*, 36(5), pp.775-784.
- 9- Roshan, R., Azamathulla, H.M., Marosi, M., Sarkardeh, H., Pahlavan, H. and Ab Ghani, A., 2010. Hydraulics of stepped spillways with different numbers of steps. *Journal of Dams and Reservoirs*, 20(3), pp.131-136.
- 10- Salmasi, F., 2003. Hydraulic assessment stepped spillways using physical models. Ph.D Thesis. *Shahid Chamran University of Ahvaz*. (In Persian).
- 11- Sori, N. and Mojtahedi, A., 2015. Investigation of effects of the geometry on rate of energy dissipation of the flow over the stepped spillway using fuzzy inference systems. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 80(3), pp. 25-39. (In Persian).
- 12- Tabbara, M., Chatila, J. and Awwad, R., 2005. Computational simulation of flow over stepped spillways. *Journal of Computers & structures*, 83(27), pp. 2215-2224.
- 13- Varjavand, P, Khosravinia, P. and Salmasi, F., 2009. Investigation of energy dissipation in stepped spillway using FLUENT numerical model. In *4th National civil Engineering Conference, Tehran University, Tehran, Iran*. (In Persian).
- 14- Zandighoharizi, F. and Azhdarimoghadam, M., 2011. Investigation of cavitation index changes in peak overflow using CFX model, In *5th National civil Engineering Conference, Mashhad Ferdowsi University, Mashhad, Iran*. (In Persian).