

EXTENDED ABSTRACT

**Studying the effect of shape changes in plan of labyrinth weir on increasing flow discharge coefficient using Flow-3D numerical model**

E. Zamiri<sup>1</sup>, H. Karami<sup>2\*</sup> and S. Farzin<sup>3</sup>

1- M.S. Student, Department of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

2\* - Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran. (*hkarami@semnan.ac.ir*).

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

Received: 5 June 2017

Revised: 7 April 2018

Accepted: 8 April 2018

**Keywords:** : Flood control, Sidewall angle, Predicting discharge coefficient, Computational hydraulic, Numerical modeling. **DOI:** 10.22055/jise.2018.22395.1604.

**Introduction**

Weirs are hydraulic structures used to measure, regulate and control the water levels and are fixed upon open channels and rivers width. Growing magnitude of probable maximum flood events (PMF) has highlighted the demand for increasing discharge capacity. Application of labyrinth weir has been suggested as a solution for increasing discharge capacity.

Tullis et al. (1995) evaluated the effective parameters in determining the capacity of a labyrinth weir. They introduced total head, the effective crest length and the discharge coefficient as parameters influencing the discharge capacity of a labyrinth weir. Khode et al. (2011) experimentally studied the parameters of a flow-over labyrinth weir for different side wall angles ( $\alpha$ ) from 8 to 30°. They found that discharge coefficient increases by growing side wall angle values.

Crookston and Tullis (2012a) studied performance of different labyrinth weirs by making differences between geometric shapes of weirs in plan. The results indicated that discharge capacity of the arced labyrinth weirs is more than the discharge capacity of horseshoe weirs.

Seo et al. (2016) investigated the effect of weir shapes on discharge of weirs. It was shown that the discharge of the labyrinth weir had an increase of approximately 71% in comparison with the linear ogee weir.

In this research, labyrinth weir with sidewall angle equal to 6° was simulated through Flow-3D model, using experimental results of previous researchers. After validation, the changes of discharge coefficient of weir with angles of 45° and 85° and apex shapes of triangular and half-circular shapes were analyzed.

**Methodology**

Various equations were presented for evaluating the discharge coefficient. Equation (1) is one of the most valid equations for this purpose,

$$C_{d(\alpha)} = \frac{1.5Q}{L_c \sqrt{2g H_T^{3/2}}} \quad (1)$$

where  $C_{d(\alpha)}$  = discharge coefficient of labyrinth weir,  $Q$ = discharge over weir,  $L_c$ = total Length of weir,  $H_T$ = total upstream head (un-submerged) and  $g$  is acceleration due to gravity( $m^2/s$ ).

Two types of mesh were used to choose the best meshing for the labyrinth weir investigation. The meshing counts of 564000 and 437000 were evaluated for selecting optimum meshing. In

mesh number 1, the cell size is smaller than the cell size of mesh number 2 near structure. Therefore, mesh 1 increases the accuracy of modeling.

### Results and Discusspn

In the research by Crookston and Tullis (2012b), the experimental  $C_{d(\alpha^\circ)}$  data were presented. The numerical  $C_{d(\alpha^\circ)}$  using 3 turbulence models (k- $\epsilon$ , RNG k- $\epsilon$  and LES models) was conducted in this paper. The maximum correlation coefficient (0.9875 for  $H_T/p$  dimensionless parameter) was obtained using the RNG k- $\epsilon$ . The value of this index is close to 1 and it shows that the model is suitable for simulating.

Based on the previous results of this research and considering the RNG model as a suitable model, the changes of discharge coefficient of weir with angles of  $6^\circ$ ,  $45^\circ$  and  $85^\circ$  were evaluated. Results show that discharge coefficient increases by growing sidewall angle values. Discharge coefficients of labyrinth weir with angles of  $85^\circ$  and  $45^\circ$  were on average 2.28 and 1.24 times greater than discharge coefficient of labyrinth weir with angle of  $6^\circ$ , respectively. Another notable point is decreasing the discharge coefficient by increasing discharge capacity. An increase of 32.8 times in the discharge leads to 57.2%, 47.4% and 7.8% decrease in discharge coefficient of weir with angles of  $6^\circ$ ,  $45^\circ$  and  $85^\circ$ , respectively. In the next step, the changes of discharge coefficient of weir with apex shapes of linear, triangular and half-circular shapes were analyzed. Labyrinth weir with triangular and half-circular apex shapes has the most value of discharge coefficient. It was found that discharge coefficient of weir with triangular and half circular apex shapes has an increase of 50.29 and 4.15% in comparison with linear apex.

In this paper, an equation is introduced for predicting discharge coefficient for the labyrinth weir with different sidewall angles, as defined in equation (2).

$$C_d = 0.201(e^{-0.4904(H_T/P)})(0.00038\theta^2 + 2.3735) \quad (2)$$

MAE, RMSE and  $R^2$  values for determining the accuracy of this equation are almost 0.0407, 0.0496 and 0.9122, respectively, which shows the accuracy of this equation for determining discharge coefficient.

### Conclusions

Engineers are looking for solutions for flood control and increasing discharge capacity of canals and rivers. Application of labyrinth weir is suggested as a solution for increasing discharge capacity. In this research, labyrinth weir with sidewall angle equal to  $6^\circ$  was simulated through Flow-3D model, using experimental results of previous researchers. After validation, the changes of discharge coefficient of weir with angles of  $45^\circ$  and  $85^\circ$  and apex shapes of triangular and half-circular shapes were analyzed. Based on the results, discharge coefficients of labyrinth weir with angles of  $85^\circ$  and  $45^\circ$  were greater than discharge coefficient of labyrinth weir with angle of  $6^\circ$ . Also, discharge coefficient of weir with triangular and half circular apex shapes has an increase of 50.29 and 4.15% in comparison with linear apex. Finally, an equation was proposed for prediction of the discharge coefficient of labyrinth weir, which is able to estimate the discharge coefficient with an acceptable level of accuracy.

### Acknowledgments

Thanks to the Semnan University computing centre for providing high processing system.

### References

- 1- Crookston, B. M. and Tullis, B. P., 2012a. Arced labyrinth weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*. 138(6), pp.555-562.
- 2- Crookston, B. M. and Tullis, B. P., 2012b, Hydraulic design and analysis of labyrinth weirs. I: Discharge relationships. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 139(5), pp.363-370.

- 3- Khode, B. V., Tembhurkar, A. R., Porey, P. D. and Ingle, R. N., 2011. Experimental studies on flow over labyrinth weir. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 138(6), pp.548-552.
- 4- Seo, I. W., Do Kim, Y., Park, Y. S. and Song, C. G. 2016, Spillway discharges by modification of weir shapes and overflow surroundings. *Environmental Earth Sciences*. 75(6), pp.1-13.
- 5- Tullis, J. P., Amanian, N. and Waldron, D., 1995. Design of labyrinth spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*. 121(3), pp.247-255.



© 2020 by the authors. Licensee SCU, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## بررسی تأثیر تغییر شکل در پلان سرریز کنگره‌ای بر افزایش ضریب دبی جریان به کمک مدل عددی Flow-3D

الهام ضمیری<sup>۱</sup>، حجت کرمی<sup>۲\*</sup> و سعید فرزین<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

۲\* - نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان. [hkarami@semnan.ac.ir](mailto:hkarami@semnan.ac.ir)

۳- استادیار، گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

پذیرش: ۱۳۹۷/۱/۱۹

بازنگری: ۱۳۹۷/۱/۱۸

دریافت: ۱۳۹۶/۳/۱۵

### چکیده

مهندسیین همواره در جستجوی راه‌هایی برای کنترل سیلاب و افزایش دبی عبوری از کانال‌ها و رودخانه‌ها هستند. به‌کارگیری سرریز کنگره‌ای به‌عنوان راه‌حلی جهت افزایش دبی عبوری پیشنهاد می‌گردد. در این تحقیق سرریز کنگره‌ای با زاویه دیواره شش درجه با استفاده از مدل Flow-3D و به‌کمک نتایج آزمایشگاهی محققین قبلی شبیه‌سازی گردید. پس از صحت‌سنجی، تغییرات ضریب دبی سرریز با زاویه‌های دیواره برابر با ۴۵ و ۸۵ درجه و شکل دهانه به‌صورت نیم‌دایره و مثلثی، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. نتایج بررسی حاکی از آن است که ضریب دبی در سرریز کنگره‌ای با زوایای دیواره ۴۵ و ۸۵ درجه به‌طور متوسط به ترتیب ۱/۲۴ و ۲/۲۸ برابر مقدار ضریب دبی در سرریز با زاویه دیواره شش درجه می‌باشد. همچنین ضریب دبی در سرریز با دهانه مثلثی و نیم‌دایره‌ای شکل، به‌طور متوسط به ترتیب افزایش ۵۰/۲۹ و ۴/۱۶ درصدی نسبت به ضریب دبی در سرریز با دهانه خطی دارد. در نهایت رابطه‌ای به منظور پیش‌بینی ضریب دبی در سرریز کنگره‌ای پیشنهاد گردید که با دقت قابل قبولی قادر به تخمین ضریب دبی می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: کنترل سیلاب، زاویه دیواره سرریز، پیش‌بینی ضریب دبی، هیدرولیک محاسباتی، مدل‌سازی عددی.

### مقدمه

برای تنظیم سطح آب و کنترل سیلاب، از سازه‌های هیدرولیکی نظیر سرریزها استفاده می‌شود. سرریزهای کنگره‌ای با شکل غیرخطی و افزایش طول نسبت به سرریزهای متداول خطی در عرض معین، سبب افزایش ظرفیت دبی سرریز می‌گردند که برای دبی‌های بالا مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند (Hosseini et al., 2015; Noruzi and Ahadiyan, 2016). سرریزهای کنگره‌ای عمدتاً به‌صورت دوزنقه‌ای، مثلثی و مستطیلی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند (شکل ۱). این سرریزها خطر وقوع حداکثر سیلاب محتمل در پایین‌دست را کاهش می‌دهند و به کنترل سیلاب کمک می‌کنند (Canholi et al 2011). در شکل (۲) نیز، سرریز سد ریچارد در آمریکا به‌عنوان یک نمونه واقعی نمایش داده شده است.

در مورد نحوه عملکرد سرریز کنگره‌ای مطالعاتی صورت گرفته است که مطالعه آزمایشگاهی Tullis et al (1995) یکی از مهم‌ترین آن‌ها می‌باشد. نتیجه تحقیق ایشان نشان داد میزان دبی جریان عبوری از سرریز کنگره‌ای، تابعی از بار آبی کل، طول سرریز و ضریب دبی است. ضخامت بدنه سرریز، شکل تاج، ارتفاع سرریز، بار آبی کل، شکل رأس کنگره و زاویه دیواره سرریز در امتداد جریان ( $\alpha$ ) به‌عنوان عوامل تأثیرگذار بر مقدار ضریب دبی

معرفی شدند. Paxson و Savage (2006) دو روش طراحی رایج سرریز کنگره‌ای موسوم به روش لوکس و تولیس را با مدل عددی Flow-3D مقایسه نمودند و نتایجی مشابه روش لوکس و تولیس به دست آوردند. در ادامه با تغییر نسبت عرض هر سیکل سرریز به ارتفاع سرریز، عملکرد هیدرولیکی این سازه را مورد ارزیابی قرار دادند. Khode et al (2011) سرریزهای کنگره‌ای با زوایای ۸، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه و سرریز خطی را مورد آزمایش قرار دادند. مقدار ضریب دبی در واحد طول و واحد عرض سرریز کنگره‌ای را به دست آوردند.

Crookston و Tullis (2012a) عملکرد سرریز کنگره‌ای قوس‌دار در پلان را مورد تحلیل قرار دادند. نتایج نشان داد میزان دبی عبوری از سرریز کنگره‌ای قوس‌دار حدود ۳۰-۵ درصد بیشتر از دبی عبوری از سرریز رایج کنگره‌ای بدون قوس است. همچنین تأثیر افزایش زاویه قوس سرریز بر میزان دبی عبوری و ضریب دبی مورد تحلیل قرار گرفت. Suprpto (2013) طی مطالعه تجربی خود، عملکرد سرریز اوجی را با انواع سرریزهای کنگره‌ای مقایسه نمود. نتایج حاصل از این بررسی نشان داد سرریز کنگره‌ای نسبت به سرریز اوجی، کارکرد مناسب‌تری دارد. هم‌چنین مشخص گردید کمترین دبی عبوری مربوط به سرریز اوجی و بیشترین دبی جریان متعلق به سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای است.

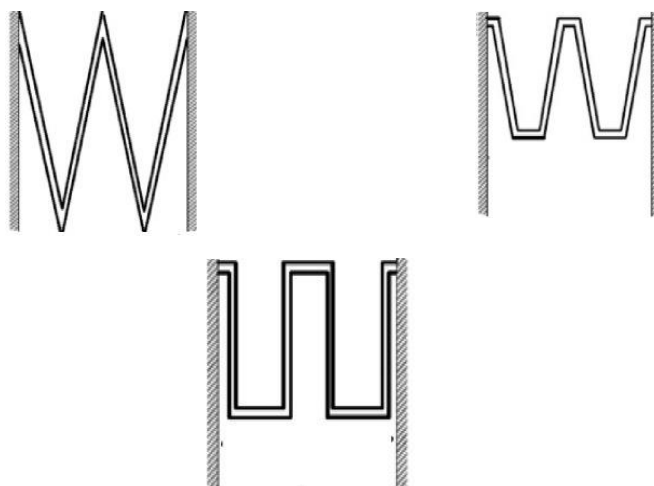


Fig.1- Schematic of trapezoidal, triangular, and rectangular congressional overflow

شکل ۱- نمایش سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای، مثلثی و مستطیلی



Fig.2- Richard Dam overflow in America

شکل ۲- سرریز سد ریچارد در امریکا

کنگره‌ای، دبی عبوری از سرریز کنگره‌ای افزایشی در حدود ۳۰ درصد نسبت به سرریزهای مستقیم داشته است. Azhdary- Moghaddam و JafariNodoushan (2013) در تحقیق خود تلاش نمودند تا به بهینه‌سازی هندسه سرریز کنگره‌ای دست یابند. کاهش حجم بتن‌ریزی و حفظ شرایط هیدرولیکی مناسب نیز از اهداف این مطالعه بوده است. Nikpiek و Kashefipour (2014) عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای و مایل و سرریز مستطیلی را مورد مقایسه قرار دادند. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که به ازای دبی معین، طول بیشتر سرریز کنگره‌ای، نسبت به سایر سرریزها، موجب کاهش عمق آب در این سرریز نسبت به سایر سرریزها می‌شود. در پژوهش Rezaee et al (2016) به منظور پیش‌بینی ضریب دبی سرریز کنگره‌ای رابطه‌ای معرفی گردید که با ضریب همبستگی بالا در حالت‌های مختلف به تخمین ضریب دبی می‌پردازد. در ادامه مشخص شد به ازای نسبت ثابت ارتفاع سرریز ثابت و مقدار معین نسبت  $H_T/p$  (نسبت بی‌بعد بار آبی بالادست به ارتفاع سرریز)، افزایش طول دماغه سرریز موجب افزایش دبی عبوری از سرریز می‌گردد.

Seo et al (2016) تأثیر شکل سرریز بر میزان دبی آن را آنالیز نمودند و دریافتند دبی سرریز کنگره‌ای برای عمق‌های کم آب، حدود ۷۱ درصد بیشتر از سرریز اوجی مستقیم می‌باشد و علت این امر را به طول بلندتر این نوع سرریز نسبت به سرریزهای مستقیم نسبت دادند. Noori و Aaref (2017) در مطالعه تجربی خود، تاج سرریز کنگره‌ای را به شکل مدور درآوردند تا عملکرد سرریز را بهبود بخشند. نتایج این بررسی نشان داد افزایش نسبت بی‌بعد بار آبی بالادست به ارتفاع سرریز سبب کاهش ضریب دبی سرریز می‌گردد. همچنین کاهش ارتفاع سرریز سبب بهبود عملکرد سرریز شده و موجب گردیده است تا خطوط جریان، راحت‌تر از روی سرریز عبور کنند. Nezami et al (2012) در مطالعه آزمایشگاهی، از سرریز کنگره‌ای به عنوان سرریز جانبی بهره بردند و دریافتند ضریب دبی سرریز جانبی کنگره‌ای در مقایسه با سرریز جانبی مستقیم ۳۰-۱۵ درصد بیشتر می‌باشد. Esmaeili Varaki و Safarrazavi (2013) Zadeh (2013) سرریزهای کنگره‌ای با هندسه‌های خطی- نیم‌دایره و نیم‌دایره‌ای را مورد ارزیابی آزمایشگاهی قرار دادند. نتایج نشان داد که در انواع مختلف اشکال و هندسه‌های سرریز

تعریف می‌گردد.  $l_c$ : طول مرکزی دیواره جانبی،  $A$ : طول داخلی دهانه،  $D$ : طول خارجی دهانه و  $N$ : تعداد سیکل‌ها می‌باشد.  $H_T$ : کل بار آبی بالادست (غیر مستغرق) است که از مجموع دو پارامتر عمق آب بالادست و ترم سرعت تشکیل شده است. شکل (۳) پارامترهای سرریز کنگره‌ای را نشان داده است. Crookston و Tullis (2012b) بر اساس نسبت بی‌بعد بار آبی بالادست به ارتفاع سرریز ( $H_T/p$ ) رابطه‌ای به منظور تخمین ضریب دبی سرریز کنگره‌ای ارائه نمودند که برای سرریز با زاویه دیواره شش درجه به صورت رابطه (۴) بیان شده است. Tullis et al. (1995) نیز رابطه (۵) را جهت تعیین ضریب دبی سرریز کنگره‌ای با زاویه شش درجه معرفی نمودند:

$$C_{d(\alpha)} = 0.02623 \left( \frac{H_T}{P} \right)^{-2.681} \left( \frac{H_T}{P} \right)^{0.3669} + 0.1572 \quad (4)$$

$$C_d = 0.49 - 0.24(H_T / p) - 1.2(H_T / p)^2 + 2.17(H_T / p)^3 - 1.03(H_T / p)^4 \quad (5)$$

دو روش VOF و FAVOR به منظور شبیه‌سازی هندسی در نرم‌افزار Flow-3D مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Farzin et al., 2016). برای نمایش سطح آزاد سیال، از روش VOF استفاده می‌شود. در این روش، جهت نمایش وضعیت سلول‌ها از کمیت تابع حجم سیال ( $F$ ) بهره برده می‌شود. مقداردهی شاخص  $F$  به صورت زیر انجام می‌شود Hirt و Richardson (1999):

$$F = 0, \text{ چنانچه سلول از هوا پر باشد.}$$

$$F = 1, \text{ چنانچه سلول از آب پر باشد.}$$

$0 < F < 1$ ، سلول حاوی سطح مشترک بین هوا و آب می‌باشد. روش FAVOR با هدف مدل کردن اجسام و سطوح صلب، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش، اشکال هندسی پیچیده در مش‌های راست گوشه در مختصات کارتریزین و استوانه‌ای قرار گرفته و با اشغال کردن قسمتی از حجم، شبیه‌سازی می‌شوند که این امر موجب بهبود مش‌بندی می‌گردد Hirt و Richardson (1999).

#### تعریف شرایط مرزی

در مدل Flow-3D به منظور شبیه‌سازی سرریز کنگره‌ای از شرط مرزی (Symmetry) برای شبیه‌سازی سطح آزاد جریان استفاده شده است. به منظور تعیین عمق و دبی جریان در سطح ورودی از شرط مرزی (Volume Flow Rate) استفاده گردید. مرز (Outflow) نیز برای سطح خروجی جریان انتخاب شد. برای دیواره‌ها و کف کانال، شرط مرزی (wall) اتخاذ گردید تا صفر بودن سرعت جریان در این سطوح برقرار باشد. شکل (۴) شرایط مرزی سرریز کنگره‌ای شبیه‌سازی شده در این تحقیق را نمایش داده است.

بررسی تحقیقات در زمینه سرریز کنگره‌ای بیانگر آن است که مطالعه‌های آزمایشگاهی گسترده‌ای درباره سرریز کنگره‌ای انجام شده است. لیکن مطالعه‌های عددی جامعی پیرامون این موضوع و در جهت بهبود عملکرد سرریز کنگره‌ای با ایجاد تغییر شکل در پلان سرریز صورت نگرفته است. پیشرفت علم و تکنولوژی و تلاش برای صرفه‌جویی در زمان و هزینه سبب روی آوردن محققین به روش‌های عددی برای تخمین پارامترهای مختلف در مسائل هیدرولیکی شده است.

در تحقیق حاضر با استفاده از مدل عددی Flow-3D سرریز کنگره‌ای با زاویه دیواره شش درجه شبیه‌سازی می‌گردد. در این راستا، پس از صحت‌سنجی نتایج، با انتخاب مقادیر ۴۵ و ۸۵ درجه برای زاویه دیواره سرریز در امتداد جریان ( $\alpha$ )، عملکرد هیدرولیکی سرریز و تغییرات ضریب دبی آن تحلیل و بررسی می‌گردد. در ادامه، تغییر شکل دهانه خروجی سرریز در پلان به صورت نیم‌دایره و مثلثی شکل، پیشنهاد می‌گردد و اثر هر یک بر مقدار ضریب دبی تعیین می‌شود.

#### مواد و روش‌ها

##### معادلات حاکم بر جریان

در مدل Flow-3D، قوانین حاکم بر جریان یک سیال تراکم‌ناپذیر لزج، توسط معادلات پیوستگی و اندازه حرکت که به معادلات Navier - Stokes معروف هستند، بیان می‌شود. روابط (۱) و (۲) به ترتیب رابطه پیوستگی و اندازه حرکت در جهت اختیاری  $i$  می‌باشند.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i + \nu \nabla^2 u_i \quad (2)$$

در روابط (۱) و (۲)،  $u_i$ : مؤلفه سرعت لحظه‌ای در جهت  $i$  ( $m/s$ )،  $\nu$ : لزجت دینامیک سیال ( $N \cdot s / m^2$ )،  $\rho$ : چگالی سیال ( $kg / m^3$ )،  $g_i$ : مؤلفه شتاب ثقل در جهت  $i$  ( $m/s^2$ ) و  $p$ : فشار در هر نقطه از سیال ( $Pa$ ) می‌باشد.

به منظور تعیین ضریب دبی سرریز کنگره‌ای روابط متعددی ارائه شده‌اند که رابطه (۳) از رایج‌ترین روابط مورد استفاده در این بحث می‌باشد Crookston و Tullis (2012b).

$$C_{d(\alpha)} = \frac{1.5Q}{L_c \sqrt{2g H_T^{3/2}}} \quad (3)$$

در رابطه (۳)،  $C_{d(\alpha)}$ : ضریب دبی سرریز کنگره‌ای،  $Q$ : دبی عبوری از سرریز،  $g$ : شتاب گرانشی ( $m^2/s$ ) می‌باشند.  $L_c$ : کل طول سرریز می‌باشد که به صورت  $L_c = N(2l_c + A + D)$

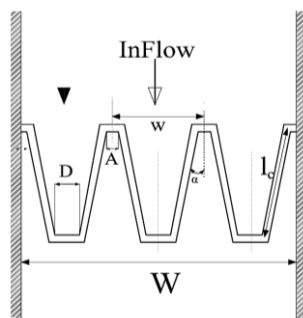


Fig.3- Plan of geometric parameters of congressional overflow

شکل ۳- پارامترهای هندسی سرریز کنگره‌ای در پلان

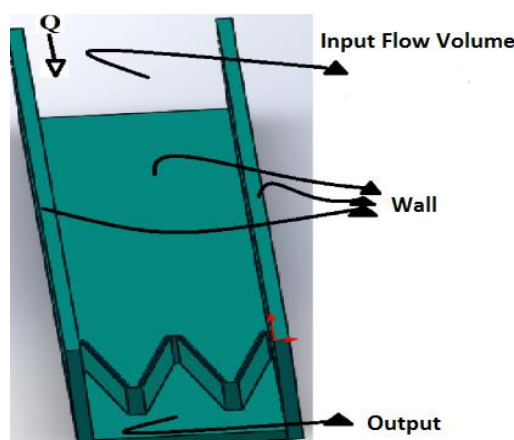


Fig. 4- The boundary conditions of the congressional overflow model

شکل ۴- شرایط مرزی مدل سرریز کنگره‌ای

از این مدل هزینه محاسبات را افزایش می‌دهد ( Payri et al., 2010).

#### تعیین شبکه مش مناسب جهت مدل‌سازی سرریز کنگره‌ای

استفاده از شبکه مش مناسب سبب افزایش دقت محاسبات و صرفه‌جویی در زمان مدل‌سازی می‌شود. به‌منظور صحت-سنجی روند مدل‌سازی و همچنین حصول اطمینان از شرایط مرزی مورد استفاده، مدل عددی سه‌بعدی متناظر با مطالعات آزمایشگاهی Crookston و Tullis (2012b) با استفاده از دو نوع شبکه‌بندی مورد تحلیل قرار گرفت. شبکه‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی به ترتیب تقریباً از ۵۶۴۰۰۰ و ۴۳۷۰۰۰ سلول تشکیل شده‌اند. در شبکه‌بندی شماره ۱ با تعداد سلول ۵۶۴۰۰۰ عدد، سلول‌های مورد استفاده در راستای ارتفاع کانال، ابعاد ریزتری نسبت به شبکه‌بندی شماره ۲ دارند و از بلوک غیر یکنواخت تشکیل شده‌اند. همچنین در شبکه‌بندی یک، در فاصله یک متری قبل و بعد از بدنه سرریز، از تعداد سلول‌های بیشتری

#### مدل‌سازی آشفتگی جریان عبوری از سرریز کنگره‌ای در Flow-3D

مدل Flow-3D با به‌کارگیری سلول‌های سه‌بعدی مستطیلی قابلیت شبیه‌سازی سازه‌های هیدرولیکی با کمک مدل‌های آشفتگی مختلف را دارا است (Farzin et al., 2016). در تحقیق حاضر، شبیه‌سازی با به‌کارگیری سه مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  RNG،  $k-\epsilon$  و LES با هدف انتخاب مناسب‌ترین مدل آشفتگی انجام شده است. مدل آشفتگی  $K-\epsilon$  مدل ساده‌ای است که برای مطالعه طیف وسیعی از جریان‌ها مناسب می‌باشد. انرژی جنبشی آشفتگی ( $k$ ) و اتلاف انرژی ( $\epsilon$ ) دو پارامتری هستند که مدل آشفتگی  $K-\epsilon$  را وصف می‌کنند. مدل  $k-\epsilon$  RNG یکی از انواع مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  است که مقادیر ثابت معادله مدل  $k-\epsilon$  به‌صورت تجربی به دست آمده‌اند؛ اما در مدل  $k-\epsilon$  RNG، مقادیر ثابت به‌صورت صریح حاصل شده‌اند. مدل آشفتگی شبیه‌سازی گرداب‌های بزرگ (LES) کاربرد وسیعی در مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی دارد. این مدل وابسته به زمان است و ابزاری مناسب برای حل معادلات جریان آشفته می‌باشد که سبب افزایش دقت محاسبات می‌گردد لیکن استفاده

در مرحله صحت‌سنجی انجام پذیرفت. ابتدا برای هر مدل مش-بندی، شش تحلیل با مدل آشفتگی k-ε RNG انجام شد. پس از انتخاب مش شماره یک، برای دو مدل آشفتگی دیگر نیز، در مجموع ۱۲ آنالیز دیگر اجرا شد.

برای صحت‌سنجی مدل مورد استفاده از شبکه‌های با تعداد سلول ۵۶۴۰۰۰ و ۴۳۷۰۰۰ سلول استفاده گردید. در شبکه‌بندی شماره یک با تعداد سلول ۵۶۴۰۰۰، ابعاد سلول‌های مورد استفاده نسبت به شبکه‌بندی شماره دو ریزتر می‌باشند. پس از حصول نتایج شبیه‌سازی در هر دو نوع شبکه‌بندی، داده‌های آزمایشگاهی و عددی نسبت کل بار آبی بالادست به ارتفاع سرریز (H<sub>T</sub>/p) مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفتند که در جدول (۱) نمایش داده شده است.

نتایج جدول (۱) بیانگر آن است که شبکه‌بندی شماره یک، نتایج با دقت بالاتری را به دست آورده است که به علت کوچک‌تر بودن ابعاد سلول‌ها در این مدل، ضریب همبستگی بالاتری نسبت به مدل دوم حاصل شده است. شاخص R<sup>2</sup> برای شبکه‌بندی شماره یک با تعداد تقریبی سلول ۵۶۴۰۰۰، حدوداً ۰/۹۸۷۵ بدست آمد که بیانگر همبستگی میان مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر حاصل از مدل عددی است. همچنین شاخص‌های RMSE و MAE مقادیر قابل قبولی جهت تخمین مقدار H<sub>T</sub>/p در شبیه‌سازی عددی به دست آوردند. شکل (۵)، نمای سه‌بعدی مدل سرریز کنگره‌ای شبیه‌سازی شده در این تحقیق را نمایش می‌دهد.

در مطالعه آزمایشگاهی Crookston و Tullis (2012b) مقادیر آزمایشگاهی ضریب دبی (C<sub>d</sub> (α<sup>0</sup>)) ارائه شدند. در تحقیق حاضر، ابتدا نتایج حاصل از مدل عددی با استفاده از سه مدل آشفتگی k-ε، k-ε و RNG با LES به دست آمد. پس از تطابق داده‌های حاصل از مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی و بررسی شاخص‌های ارزیابی خطا، دقت شبیه‌سازی با هر مدل آشفتگی، ارزیابی گردید و مدل آشفتگی مناسب به منظور شبیه‌سازی این سرریز انتخاب شد. جدول (۲)، شاخص‌های ارزیابی خطا را برای پارامتر H<sub>T</sub>/p نشان می‌دهد. نتایج جدول شماره یک نشان‌دهنده آن است که مدل آشفتگی k-ε RNG با ضریب همبستگی ۰/۹۸۷۵ برای پارامتر بی‌بعد H<sub>T</sub>/p، نتایج با دقت بالاتری نسبت به سایر مدل‌های آشفتگی بکاررفته، بدست آورده است. شاخص‌های MAE و RMSE نیز برای این مدل به ترتیب ۰/۰۰۲۳۰۵ و ۰/۰۰۲۹۴۶ حاصل گردید که حاکی از مناسب بودن مدل k-ε RNG برای شبیه‌سازی سرریز کنگره‌ای می‌باشد. نتایج جدول (۲) نشان‌دهنده آن است که دو مدل آشفتگی k-ε و LES نیز نتایج مناسبی برای مدل‌سازی بدست آوردند. بنابراین، نتایج حاصل از این دو مدل در مقایسه با مدل آشفتگی k-ε RNG دقت پایین‌تری دارند. این نتیجه در تحقیق Zamiri et al (2016) نیز بیان شده است. نتایج مربوط به دقت مدل‌سازی با مدل‌های آشفتگی، در مجموع ۲۴ تحلیل

استفاده گردیده است. لیکن در شبکه‌بندی دو، ابعاد مش بزرگ‌تر می‌باشد که همین امر از دقت مدل‌سازی می‌کاهد.

### شاخص‌های ارزیابی دقت شبیه‌سازی

به منظور حصول اطمینان از درستی نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی و کفایت دقت حاصل، لازم است تا با به کارگیری از شاخص‌های ارزیابی، می‌توان دقت ضریب دبی تخمین‌زده شده را ارزیابی نمود. در تحقیق حاضر، شاخص‌های ارزیابی ضریب همبستگی (Coefficient of Determination (R<sup>2</sup>))، جذر میانگین مربعات خطا ((RMSE) Root Mean Square Error) و میانگین مطلق خطا ((MAE) Mean Absolute Error)، مطابق روابط (۶)، (۷) و (۸) مورد استفاده قرار گرفتند.

$$R^2 = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^N x_i^2 - \left( \frac{\sum_{i=1}^N y_i^2}{N} \right)} \right] \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (7)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum |x_i - y_i| \quad (8)$$

در روابط فوق، x<sub>i</sub> و y<sub>i</sub> به ترتیب مقادیر حاصل از مدل عددی و مدل آزمایشگاهی می‌باشند.

### نتایج و بحث

برای صحت‌سنجی شبیه‌سازی سرریز کنگره‌ای از داده‌های آزمایشگاهی Crookston و Tullis (2012b) استفاده گردیده است. سرریز مورد مطالعه به ازای دبی‌های مختلف (Q) در محدوده ۶۰۰-۱۵ لیتر بر ثانیه و در کانالی به طول ۱۴/۶ متر، عرض ۱/۲ متر و ارتفاع ۱ متر مورد بررسی قرار گرفته است. ضخامت بدنه سرریز ۳/۸ سانتی‌متر و تعداد سیکل‌های سرریز، دو منظور شد. در این پژوهش مدل‌های مختلف سرریز در نرم‌افزار Solid Work ساخته شد و سپس در مدل Flow-3D بازخوانی گردید و پس از رسم نمودارها برحسب H<sub>T</sub>/p و C<sub>d</sub>، داده‌های آزمایشگاهی و عددی مورد مقایسه قرار گرفتند.

پارامتر کل طول سرریز (L<sub>c</sub>) از نرم‌افزار SolidWork محاسبه می‌شود. پارامتر دبی (Q) ورودی مسأله می‌باشد. پارامتر بار آبی بالادست (H<sub>T</sub>) نیز یکی از خروجی‌های مدل Flow-3D است. با استفاده از سه پارامتر مورد اشاره و رابطه (۳)، ضریب دبی سرریز کنگره‌ای محاسبه گردید. از این‌رو شش داده برای دبی ورودی برابر ۱۷/۹، ۱۹/۲۷، ۱۰۲/۶، ۲۹۳/۳، ۴۴۳/۲ و ۵۸۸/۹ لیتر بر ثانیه انتخاب گردید. برای دو مش‌بندی با تعداد سلول‌های متفاوت و سه نوع مدل آشفتگی، در مجموع ۲۴ تحلیل



تغییراتی ایجاد گردید و اثر هر تغییر در مقدار ضریب دبی مورد بررسی قرار گرفت. زاویه دیواره سرریز در امتداد جریان ( $\alpha$ ) یکی از عوامل مؤثر در مقدار ظرفیت و ضریب دبی سرریز کنگره‌ای می‌باشد که اثر این پارامتر مورد تحلیل قرار گرفت. در این تحقیق سه مقدار ۴۵ و ۸۵ درجه برای زاویه دیواره سرریز در امتداد جریان اتخاذ گردید. شکل (۷) رابطه ضریب دبی سرریز کنگره‌ای با پارامتر دبی جریان را برای زوایای ۴۵ و ۸۵ درجه نشان داده است.

جدول (۲) نشان داده شده است. نتایج نیز بیانگر مناسب بودن مدل k-ε RNG برای شبیه‌سازی سرریز کنگره‌ای است. پس از بررسی مش بهینه و انتخاب مدل آشفتگی مناسب، ضریب دبی سرریز کنگره‌ای حاصل از مدل عددی با ضریب دبی مدل آزمایشگاهی مورد مطالعه، در شکل (۶) مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاکی از تطابق قابل قبول نتایج مدل عددی با مدل آزمایشگاهی می‌باشد. پس از انتخاب مدل آشفتگی k-ε RNG به‌عنوان مدل مناسب جهت شبیه‌سازی سرریز کنگره‌ای، در هندسه و شکل سرریز

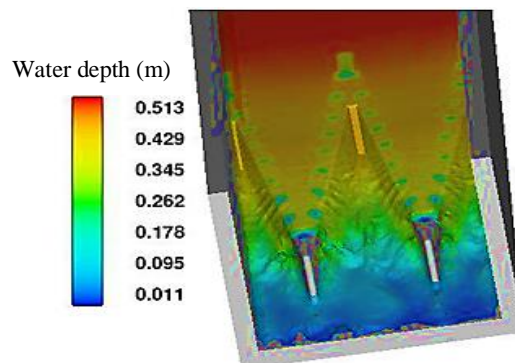


Fig.5- View of a simulated congressional overflow

شکل ۵- نمایی از سرریز کنگره‌ای شبیه‌سازی شده

جدول ۱- شاخص‌های ارزیابی برای انتخاب شبکه‌بندی پارامتر  $H_T/p$  - مدل آشفتگی k-ε RNG

Table 1- Evaluation indexes to select the network of  $H_T/p$  - RNG k-ε turbulence model

Mesh Number	Cell Number	MAE	RMSE	R <sup>2</sup>
1	56400	0.002305	0.00295	0.9875
2	437000	0.033866	0.03395	0.9785

جدول ۲- شاخص‌های ارزیابی برای انتخاب مدل آشفتگی برای پارامتر  $H_T/p$

Table 2- Evaluation indexes for selection of the turbulence model for  $H_T/p$

Turbulence Models	Evaluation criteria			
	MAE	RMSE	R <sup>2</sup>	
$H_T/p$	RNG k-ε	0.002305	0.002946	0.9875
	k-ε	0.00304	0.004145	0.9838
	LES	0.00419	0.005612	0.9806
$C_d$	RNG k-ε	0.0396	0.0523	0.9514
	k-ε	0.05597	0.07194	0.9307
	LES	0.06724	0.08552	0.8821

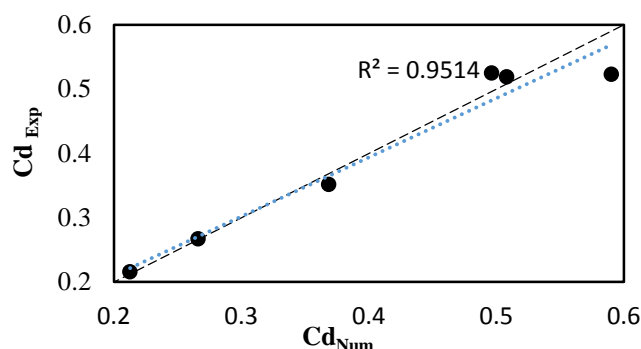


Fig. 6- Comparison of discharge coefficients resulted from numerical and experimental models

شکل ۶- مقایسه مقادیر ضرایب دبی حاصل از مدل عددی و مدل آزمایشگاهی مورد مطالعه

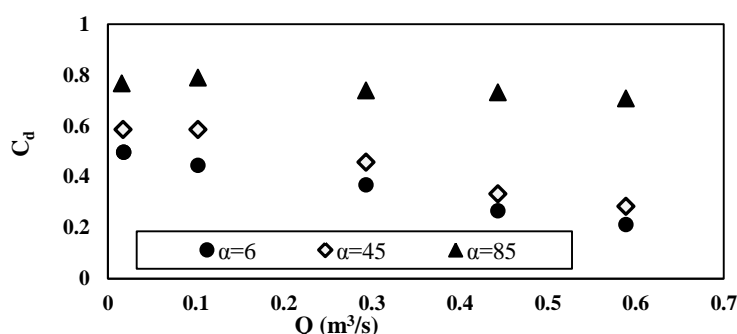


Fig.7- The relationship between  $C_d$  and  $Q$  for different angles of the congressional overflow wall

شکل ۷- رابطه  $C_d$  با  $Q$  برای زوایای مختلف دیواره سرریز کنگره‌ای

می‌شود. ۱۱ برابر شدن مقدار پارامتر  $H_T/p$  در سرریز با زاویه دیواره ۸۵ درجه، به‌طور میانگین ۷/۷۵ درصد از مقدار ضریب دبی می‌کاهد. افزایش ۱۶ برابری پارامتر  $H_T/p$  در سرریز با زاویه دیواره ۴۵ درجه نیز، کاهش ۴۷/۳۵ درصدی ضریب دبی را در پی دارد. افزایش ۱۸ برابری پارامتر  $H_T/p$  در سرریز با زاویه دیواره ۶ درجه، سبب کاسته شدن ۵۷/۱۶ درصدی ضریب دبی سرریز کنگره‌ای می‌شود. جدول (۳) ضریب همبستگی بین ضریب دبی و پارامترهای دبی و نسبت بی‌بعد بار آبی بالادست به ارتفاع سرریز را نشان می‌دهد. نتایج جدول (۳) بیانگر آن است که دو پارامتر  $H_T/p$  و  $Q$  در هر سه زاویه دیواره سرریز کنگره‌ای (۶، ۴۵ و ۸۵ درجه) همبستگی بالایی با ضریب دبی دارد و بیشترین همبستگی تحت زاویه ۶ درجه اتفاق افتاده است. مقادیر ضریب همبستگی پارامتر دبی و ضریب دبی در هر سه زاویه، مقادیر بالاتری نسبت به مقادیر ضریب همبستگی پارامتر  $H_T/p$  و ضریب دبی دارد.

مجموع نتایج شکل‌های (۷) و (۸) و جدول (۳) بیان‌کننده آن است که تغییرات دبی جریان بر مقدار ضریب دبی، تأثیر بالاتری نسبت به فاکتور  $H_T/p$  دارد. در ادامه در شکل سرریز در پلان تغییراتی ایجاد شد. بدین‌صورت که دهانه خارجی سرریز (D) از حالت خطی خارج گردید و با ایجاد شکل‌های پیشنهادی نیم‌دایره و مثلثی، تغییرات ضریب دبی در این شرایط مورد ارزیابی قرار گرفت.

نتایج بیان‌کننده آن است که به ازای دبی معین، سرریز با زاویه ۸۵ درجه، بیشترین دبی را داراست و افزایش زاویه دیواره سرریز، موجب افزایش ضریب دبی می‌گردد. ضریب دبی در دو سرریز با زوایای دیواره ۴۵ و ۸۵ درجه به‌طور متوسط به ترتیب ۱/۲۴ و ۲/۲۸ برابر مقدار ضریب دبی در سرریز با زاویه دیواره شش درجه می‌باشد. بایستی به این نکته اشاره نمود که به علت ثابت بودن عرض کانال، تغییر در زاویه دیواره سرریز، منجر به تغییر در اندازه طول سرریز می‌گردد و افزایش زاویه دیواره سبب کاهش طول سرریز می‌شود. Khode et al (2011) نیز به همین نکته دست یافتند و بیان داشتند که کاهش زاویه دیواره سرریز به افزایش دبی سرریز کنگره‌ای می‌انجامد.

نکته قابل توجه دیگر در مورد سرریز کنگره‌ای آن است که افزایش دبی جریان، موجب کاهش ضریب دبی می‌شود. افزایش ۳۲/۸ برابری مقدار دبی جریان عبوری از سرریز کنگره‌ای سبب کاهش ۵۷/۲، ۴۷/۴ و ۷/۸ درصدی ضریب دبی در سرریزهای با زاویه ۶، ۴۵ و ۸۵ درجه می‌گردد. بنابراین، افزایش مقدار دبی جریان، بیش‌ترین کاهش ضریب دبی را در سرریز با زاویه شش درجه اعمال کرده است. شکل (۸) به بررسی رابطه ضریب دبی با پارامتر بی‌بعد  $H_T/p$  برای زوایای ۶، ۴۵ و ۸۵ درجه پرداخته است. مشاهده می‌گردد که افزایش مقدار نسبت بی‌بعد بار آبی بالادست منجر به افزایش ضریب دبی در سرریز کنگره‌ای

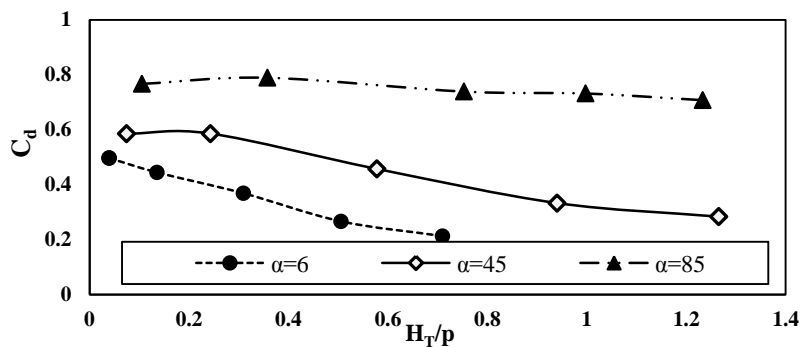


Fig. 8- The relationship between  $C_d$  and  $H_T/p$  for different angles of the congressional overflow wall  
 شکل ۸- رابطه  $C_d$  با  $H_T/p$  تحت زوایای مختلف دیواره سرریز کنگره‌ای

جدول ۳- میزان همبستگی  $Q$  و  $H_T/p$  با  $C_d$  تحت زوایای مختلف دیواره سرریز

Table 3- The correlation of  $Q$  and  $H_T/p$  with  $C_d$  for different angles of the overflow wall

angle Wall	Correlation index	
	$R^2$	
$\alpha$	$H_T/p - C_d$	$Q - C_d$
6	0.9895	0.9936
45	0.972	0.9723
85	0.8035	0.8433



Fig. 9- The congressional overflow with linear, semicircular and triangular spans

شکل ۹- سرریز کنگره‌ای با دهانه‌های خطی، نیم‌دایره و مثلثی شکل

نشان‌دهنده آن است که در سرریز با دهانه مثلثی شکل، خطوط جریان با شکل سرریز، تطابق خوبی دارد. نتایج بررسی نشان‌گر آن است که در مقادیر پایین دبی، مقادیر ضریب دبی در سه نوع سرریز مورد بررسی، با هم اختلاف زیادی دارند. لیکن به ازای  $Q > 0.5 (m^3/s)$ ، مقادیر ضریب دبی به یکدیگر نزدیک می‌شوند. نکته قابل توجه دیگر آن است که افزایش  $32/8$  برابری مقدار دبی جریان عبوری از سرریز کنگره‌ای، سبب کاهش  $57/16$ ،  $56/75$  و  $84/93$  درصدی ضریب دبی سرریز از سرریزهای با دهانه مستقیم، نیم‌دایره و مثلثی می‌گردد (Seo et al (2016) در تحقیق خود به این نکته دست یافتند که شکل سرریز بر میزان دبی عبوری از سرریز مؤثر است. نتایج پژوهش حاضر نیز بر همین مطلب دلالت دارد. شکل (۱۱)، رابطه پارامتر بی‌بعد  $H_T/p$  را با ضریب دبی مورد تحلیل قرار داده است.

شکل (۹)، سرریزهای جدید ایجادشده با دهانه‌های نیم‌دایره و مثلثی را نشان داده است. در هر سه حالت مورد بررسی، زاویه دیواره سرریز در امتداد جریان، ثابت و برابر با شش درجه قرار داده شد و همچنین اندازه دهانه ورودی سرریز (A) نیز در هر سه حالت، ثابت در نظر گرفته شد. شکل (۱۰) به بررسی رابطه دبی جریان با ضریب دبی پرداخته است.

نتایج حاکی از آن است که سرریز با دهانه مثلثی شکل، بیشترین مقدار ضریب دبی را نسبت به دو نوع سرریز دیگر دارد و سرریز با دهانه نیم‌دایره شکل، پس از سرریز با دهانه مثلثی شکل، دارای ضریب دبی بالایی است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که به ازای دبی ثابت، خارج شدن دهانه سرریز از حالت خطی و تبدیل شدن به شکل مثلثی، موجب افزایش ضریب دبی می‌گردد. ضریب دبی در سرریز با دهانه مثلثی و نیم‌دایره شکل، به‌طور متوسط، به ترتیب  $50/29$  و  $4/16$  درصد بیش‌تر از ضریب دبی در سرریز با دهانه خطی می‌باشد. مقدار بالای ضریب دبی بیان‌کننده تطابق خطوط جریان با شکل سرریز است؛ بنابراین نتایج

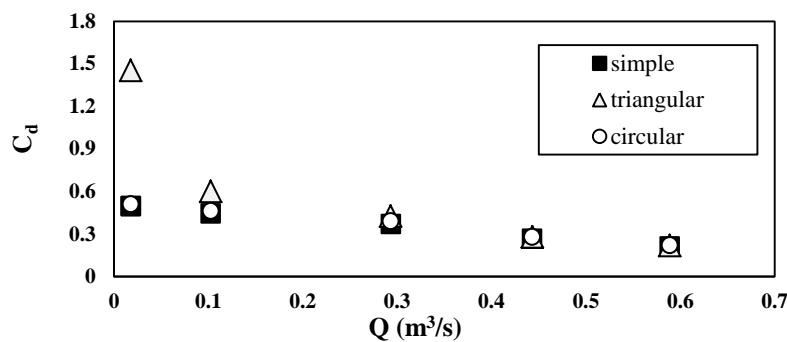


Fig. 10- The relationship between  $C_d$  and  $Q$  for different forms of congressional overflow

شکل ۱۰- رابطه  $C_d$  با  $Q$  تحت شکل‌های مختلف دهانه سرریز کنگره‌ای

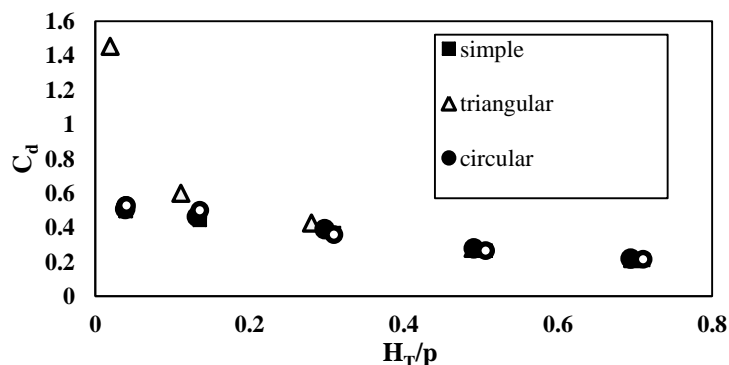


Fig. 11- The relationship of  $C_d$  and  $H_T/p$  under different forms of congressional overflow

شکل ۱۱- رابطه  $C_d$  با  $H_T/p$  تحت شکل‌های مختلف دهانه سرریز کنگره‌ای

می‌باشد. در این نوع سرریز، با افزایش پارامتر بی بعد  $H_T/p$  نسبت  $C_{d \text{ other}}/C_{d \text{ simple}}$  نیز افزایش می‌یابد و می‌توان نتیجه گرفت افزایش بار آبی بالادست در سرریز کنگره‌ای با زاویه دیواره ۸۵ درجه، سبب بهبود در عملکرد سرریز کنگره‌ای می‌گردد. حداکثر مقدار ضریب دبی در سرریز با زاویه دیواره ۴۵ درجه، حدود ۳۰ درصد بیش‌تر از ضریب دبی در سرریز با زاویه دیواره شش درجه است که به ازای  $H_T/p$  برابر ۰/۲۴ به وقوع می‌پیوندد. برای سرریز با دهانه مثلثی شکل، بیشترین مقدار پارامتر بی بعد  $C_{d \text{ other}}/C_{d \text{ simple}}$  به ازای  $H_T/p$  برابر ۰/۰۲ رخ می‌دهد که مقدار ضریب دبی برای سرریز با دهانه مثلثی شکل در این شرایط و در بار آبی بالادست یکسان، حدود ۲/۹ برابر مقدار ضریب دبی سرریز کنگره‌ای با دهانه مستقیم و زاویه ۶ درجه است. بررسی‌ها نشان‌دهنده آن است که سرریز با دهانه نیم‌دایره‌ای، ضعیف‌ترین عملکرد را از خود نشان داده است و بیش‌ترین مقدار برای پارامتر  $C_{d \text{ other}}/C_{d \text{ simple}}$  به ازای  $H_T/p$  برابر ۰/۳ اتفاق افتاده است. ضریب دبی سرریز کنگره‌ای با دهانه نیم‌دایره‌ای، حداکثر شش درصد بیش‌تر از مقدار آن برای سرریز با دهانه مستقیم است.

عملکرد دو نوع سرریز کنگره‌ای دهانه مثلثی و نیم‌دایره در  $H_T/p > ۰/۵$  تقریباً مشابه یکدیگر خواهد بود. در مطالعه تجربی Crookston و Tullis (2012b) رابطه‌ای به منظور تعیین ضریب دبی سرریز کنگره‌ای با زاویه دیواره ۶، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۵، ۲۰، ۳۵ و ۹۰ و شکل دهانه خطی درجه ارائه گردیده است. در

نتایج بررسی نشانگر آن است که در مقادیر پایین  $H_T/p$ ، مقادیر ضریب دبی در سه نوع سرریز مورد بررسی با هم اختلاف زیادی دارند، لیکن به ازای  $H_T/p > ۰/۵$ ، مقادیر ضریب دبی به یکدیگر نزدیک می‌شوند. ۳۶/۲۲ برابر شدن پارامتر  $H_T/p$  در سرریز با دهانه مثلثی شکل، موجب کاهش ۸۴/۹۳ درصدی ضریب دبی می‌شود. همچنین ۱۷/۸۹ و ۱۸/۰۳ برابر شدن مقدار  $H_T/p$  به ترتیب در سرریزهای با دهانه نیم‌دایره و مثلثی، افت ۵۶/۷۵ و ۵۷/۱۶ درصدی ضریب دبی را در پی دارد. لذا می‌توان نتیجه گرفت تغییرات مقدار دبی جریان و در پی آن  $H_T/p$  بیشترین تأثیر را بر سرریز با دهانه مثلثی می‌گذارد. همان‌طور که در شکل (۱۱) مشخص است، نتایج رابطه Crookston و Tullis (2012a) با نتایج تحقیق حاضر، تطابق مناسبی دارد. در ادامه، نسبت بی‌بعد ضریب دبی هریک از سرریزهای مورد بررسی در این تحقیق به سرریز کنگره‌ای با زاویه شش درجه و دهانه خطی ( $C_{d \text{ other}}/C_{d \text{ simple}}$ ) در مقابل  $H_T/p$  در شکل (۱۲) رسم شده است. نسبت بی‌بعد  $C_{d \text{ other}}/C_{d \text{ simple}}$  در همه حالات مورد بررسی مقداری بالاتر از یک دارد که بیانگر مطلوب بودن عملکرد هیدرولیکی سه نوع دیگر سرریز نسبت به سرریز مستقیم و با زاویه دیواره شش درجه است. بیشترین مقدار پارامتر  $C_{d \text{ other}}/C_{d \text{ simple}}$  برای سرریز با زاویه دیواره ۸۵ درجه رخ می‌دهد. بیشترین مقدار پارامتر  $C_{d \text{ other}}/C_{d \text{ simple}}$  برای سرریز با زاویه دیواره ۸۵ درجه رخ می‌دهد. این نکته حاکی از انطباق مناسب خطوط جریان با بدنه سرریز

سرریز کنگره‌ای با زاویه دیواره ۶ درجه و شکل دهانه خطی، مثلثی و نیم‌دایروی به ترتیب ۰/۹۶، ۱/۵ و ۱ اتخاذ گردید. شاخص‌های ارزیابی MAE و RMSE برای تعیین دقت رابطه ارائه‌شده در پیش‌بینی ضریب دبی محاسبه شده است. مقدار شاخص RMSE حاصل از مقایسه ضرایب دبی حاصل از مدل عددی و مقادیر به‌دست‌آمده از رابطه ۹، ۰/۰۵۹ و مقدار شاخص MAE، ۰/۰۵۳ حاصل گردیدند که بیانگر دقت مناسب رابطه پیشنهادی جهت تخمین ضریب دبی سرریز کنگره‌ای می‌باشد.

تحقیق حاضر، رابطه (۹) به‌منظور پیش‌بینی ضریب دبی سرریز کنگره‌ای با شکل‌های مختلف دهانه و زاویه دیواره ۶ درجه معرفی گردیده است:

$$C_d = 0.8763(e^{-2.7285(H_T/P)})(0.7641k_s^{1.5970}) \quad (9)$$

در رابطه (۹)،  $H_T/P$ : نسبت بار آبی کل بالادست به ارتفاع سرریز،  $q$ : دبی عبوری در واحد عرض،  $k_s$ : فاکتور شکل (متأثر از شکل سرریز) و  $C_d$ : ضریب تخلیه سرریز می‌باشد. فاکتور شکل نیز برای

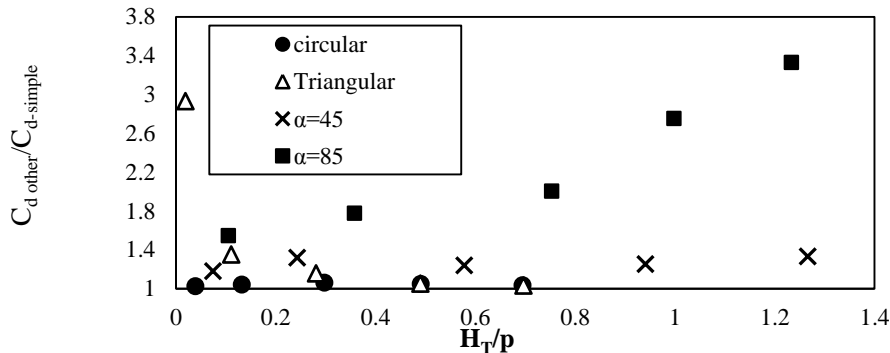


Fig. 12- The relationship  $C_{d \text{ other}}/C_{d \text{ simple}}$  and  $H_T/p$  in a congressional overflow  
 شکل ۱۲- رابطه  $C_{d \text{ other}}/C_{d \text{ simple}}$  و  $H_T/p$  در سرریز کنگره‌ای

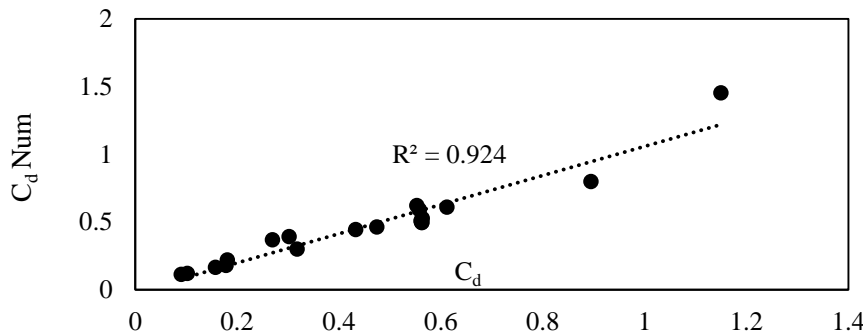


Fig. 13- Comparison of discharge coefficients resulted from a numerical model and proposed relation (Eq. 9)

شکل ۱۳- مقایسه ضرایب دبی حاصل از مدل عددی و رابطه پیشنهادی (رابطه ۹)

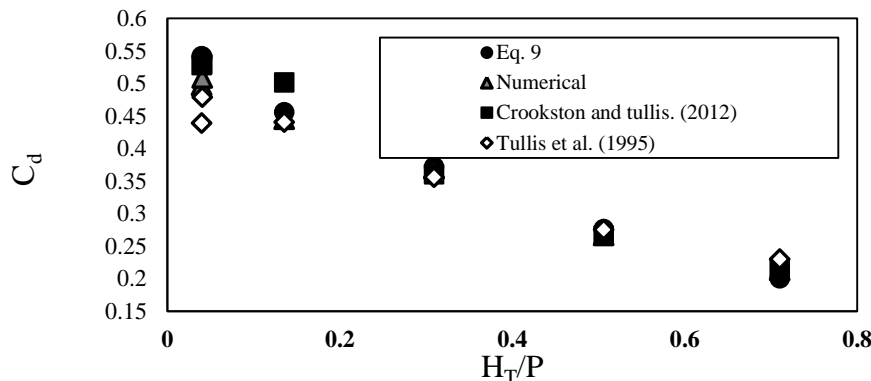


Fig. 14- Comparison of  $C_d$  from the present study and other studies for 6° angle congressional overflow

شکل ۱۴- مقایسه بین  $C_d$  حاصل از تحقیق حاضر با مطالعه‌های دیگران برای سرریز کنگره‌ای با زاویه ۶ درجه

$$C_d = 0.201(e^{-0.4904(H_T/P)}) \quad (10)$$

$$(0.00038\theta^2 + 2.3735)$$

در رابطه (۱۰)،  $H_T/p$ : نسبت بار آبی کل بالادست به ارتفاع سرریز،  $q$ : دبی عبوری در واحد عرض،  $\theta$ : زاویه دیواره سرریز در امتداد جریان و  $C_d$ : ضریب تخلیه سرریز می‌باشد. شاخص‌های ارزیابی  $MAE$ ،  $RMSE$  و  $R^2$  جهت تعیین دقت رابطه ارائه شده به ترتیب ۰/۰۴۰۷، ۰/۰۴۹۶ و ۰/۹۱۲۲ می‌باشند که حاکی از دقت مناسب این رابطه برای تخمین ضریب دبی می‌باشد. شکل هندسی سرریز که می‌تواند تحت تأثیر شکل تاج سرریز، زاویه دیواره سرریز، شکل دهانه سرریز در پلان و ... باشد، بر مقدار ضریب دبی سرریز کنگره‌ای مؤثر است. فاکتور شکل ( $k_s$ ) به منظور تبدیل کردن شکل سرریز به مقادیر کمی به کار می‌رود که می‌توان برای هر نوع سرریز، با توجه به شکل هندسی آن و عملکرد هیدرولیکی سرریز، مقداری به آن اختصاص داد. در سرریزی که مقدار  $k_s$  بالاتری به آن اختصاص یافته است، شکل سرریز تطابق بهتری با خطوط جریان عبوری از روی سرریز دارد که این امر موجب عملکرد بهتر سرریز می‌گردد.

در مرحله بعد تلاش شده است تا با افزایش ضخامت بدنه سرریز ( $t$ ) از ۳۸/۱ به ۵۷/۱۵ سانتی‌متر، تغییرات ضریب دبی سرریز کنگره‌ای مورد بررسی قرار گیرد. افزایش ضخامت بدنه سرریز از ۳۸/۱ به ۵۷/۱۵ سانتی‌متر سبب می‌گردد که ابعاد دهانه خارجی ( $D$ ) از ۱۰۶/۶ به ۱۴۱/۰۲ میلی‌متر افزایش یابد ولی میزان بزرگی دهانه ورودی ( $A$ ) ثابت باقی می‌ماند. نسبت بار آبی کل بالادست به ارتفاع سرریز ( $H_T/p$ ) در مقایسه با ضریب دبی، در شکل (۱۵) نشان داده شده است. با افزایش ۵۰ درصدی ضخامت بدنه در سرریز با تاج ربع‌دایره، از مقدار ضریب دبی به‌طور متوسط ۷/۶۵ درصد کاسته می‌شود.

همچنین شاخص ضریب همبستگی حاصل از تطابق مقادیر عددی و ضرایب دبی حاصل از رابطه (۹)، حدود ۰/۹۲۴ به دست آمد که بیانگر همبستگی بالای مقادیر (مطابق شکل (۱۳)) و حاکی از مناسب بودن رابطه پیشنهادی برای تعیین ضریب دبی می‌باشد. شکل (۱۴) ضرایب دبی حاصل از روابط پیشنهادی Crookston و Tullis (2012b) و Tullis et al (1995) و رابطه پیشنهادی در این تحقیق را با یکدیگر مقایسه کرده است. نتایج به دست آمده در شکل (۱۴) برای سرریز کنگره‌ای با زاویه دیواره ۶ درجه ارائه گردیده است. مقدار شاخص  $RMSE$  حاصل از مقایسه مقادیر رابطه Crookston و Tullis (2012b) و Tullis et al (1995) و رابطه پیشنهادی این تحقیق با مقادیر عددی به ترتیب ۰/۰۳۰۳۲، ۰/۰۳۴۰۳ و ۰/۰۲۸۰۸ به دست آمدند. همچنین مقدار شاخص  $MAE$  نیز برای روابط پیشنهادی Crookston و Tullis (2012b) و Tullis et al (1995) و رابطه (۹) ارائه شده در این پژوهش به ترتیب ۰/۰۲۳۲۱، ۰/۰۲۶۸۶ و ۰/۰۲۲۷۵ حاصل گردیدند. مقادیر شاخص ضریب همبستگی حاصل از تطابق ضرایب دبی با نتایج رابطه Crookston و Tullis (2012b) و Tullis et al (1995) و رابطه پیشنهادی در این تحقیق برای سرریز کنگره‌ای با زاویه دیواره ۶ درجه، به ترتیب ۰/۹۸۳۴، ۰/۹۷۳۹ و ۰/۹۹۳۳ به دست آمد. مجموع نتایج فوق بیانگر آن است که رابطه پیشنهادی در این پژوهش قادر است ضریب دبی سرریز کنگره‌ای با زاویه دیواره شش درجه را با تقریب خوبی به دست آورد. مقادیر ضریب دبی حاصل از روابط پیشنهادی توسط پژوهشگران در بازه  $0/3 < H_T/p < 0/7$ ، از یکدیگر فاصله دارد لیکن در محدوده  $0/3 > H_T/p$ ، نتایج به یکدیگر نزدیک شده است و هر سه رابطه پیشنهادی مقادیر نزدیک به مقادیر مدل عددی به دست آوردند. رابطه (۱۰) نیز به‌منظور تعیین ضریب دبی سرریز کنگره‌ای با زوایای مختلف دیواره ارائه گردیده است.

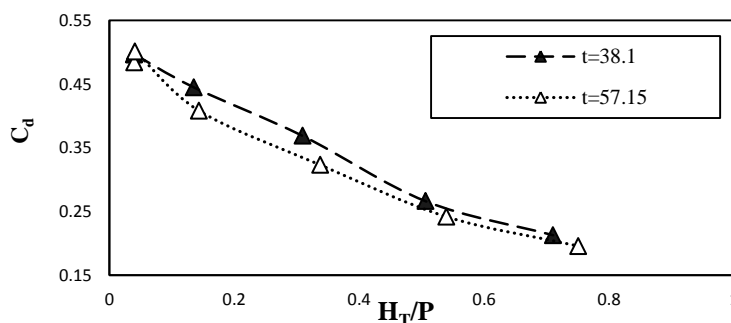


Fig. 15- The relationship between the discharge coefficient and  $H_T/p$  for 6° angle congressional overflow

شکل ۱۵- رابطه میان ضریب دبی و  $H_T/p$  برای سرریز کنگره‌ای ۶ درجه

### نتیجه گیری

با توجه به اهمیت افزایش دبی سرریز کنگره‌ای، در پژوهش حاضر با در نظر گرفتن سه مقدار ۴۵ و ۸۵ درجه برای زاویه دیواره سرریز و پیشنهاد شکل‌های مثلثی و نیم‌دایره برای دهانه سرریز، تغییرات ضریب دبی سرریز کنگره‌ای با استفاده از مدل عددی Flow-3D بررسی شد. نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر است:

- ۱- افزایش زاویه دیواره سرریز کنگره‌ای در امتداد جریان سبب افزایش ضریب دبی می‌گردد. ضریب دبی سرریز کنگره‌ای با زوایای دیواره ۸۵ و ۴۵ درجه به‌طور متوسط به ترتیب ۲/۲۸ و ۱/۲۴ برابر مقدار ضریب دبی سرریز با زاویه دیواره ۶ درجه است.
- ۲- تغییر شکل دهانه سرریز از حالت خطی به منحنی یا مثلثی موجب افزایش ضریب دبی می‌گردد. ضریب دبی در سرریز با دهانه مثلثی و نیم‌دایره، به ترتیب افزایش ۵۰/۲۹ و ۴/۱۶ درصدی نسبت به ضریب دبی در سرریز با دهانه خطی دارد.
- ۳- افزایش مقدار نسبت بی‌بعد بار آبی بالادست به ارتفاع سرریز ( $H_T/p$ )، کاهش ضریب دبی در سرریز کنگره‌ای را در پی دارد. همچنین در مقادیر  $H_T/p > 0.5$ ، مقادیر ضریب دبی برای هر سه شکل دهانه سرریز به یکدیگر نزدیک می‌شوند و هر سه نوع شکل سرریز عملکرد مشابهی در مقادیر  $H_T/p > 0.5$  دارند.
- ۴- با افزایش دبی جریان، از مقدار ضریب دبی جریانکاسته می‌شود. ۳۲/۸ برابر شدن مقدار دبی جریان عبوری از سرریز کنگره‌ای، موجب کاهش ۵۷/۱۶، ۵۶/۷۵ و ۸۴/۹۳ درصدی از

ضریب دبی سرریز کنگره‌ای با دهانه مستقیم، نیم‌دایره و مثلثی می‌شود.

۵- در تحقیق حاضر، ۲ رابطه به‌منظور تخمین ضریب دبی سرریز کنگره‌ای تحت اشکال مختلف دهانه سرریز و تحت زوایای مختلف، پیشنهاد گردید. مقدار شاخص RMSE حاصل از مقایسه ضرایب دبی حاصل از مدل عددی و مقادیر به‌دست‌آمده از روابط پیشنهادی در این تحقیق، ۰/۰۶۴۳ و ۰/۰۵۴۳ به دست آمد که حاکی از دقت مناسب رابطه ارائه‌شده برای تخمین ضریب دبی سرریز کنگره‌ای می‌باشد.

۶- شکل سرریز تحت عنوان فاکتور شکل ( $k_s$ )، بر مقدار ضریب دبی تأثیر مستقیم دارد. تطابق خطوط جریان با شکل بدنه سرریز، موجب عملکرد بهتر سرریز شده و ضریب دبی سرریز را افزایش می‌دهد.

۷- افزایش ظرفیت سرریز کنگره‌ای نسبت به سرریزهای خطی، اهمیت استفاده از این سرریز را مورد توجه قرار داده است. با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق پیشنهاد می‌شود که با در نظر گرفتن الزامات اجرایی، سرریز کنگره‌ای با شکل دهانه مثلثی و زاویه دیواره با مقادیر بالاتر در راستای افزایش ضریب دبی سرریز مورد بهره‌برداری قرار گیرند.

### تقدیر و تشکر

بدین‌وسیله از مرکز محاسبات دانشگاه سمنان به دلیل در اختیار قرار دادن سیستم‌های با قدرت پردازش بالا تشکر و قدردانی می‌شود.

### References

- 1- Azhdary Moghaddam, M. and Jafari Nodoushan, E., 2013. Optimization of Geometry of trapezoid labyrinth Spillway with using ANFIS Models and Genetic Algorithms (Ute Dam Case Study in the United States of America). *Journal of Civil Engineering*. 24(2), pp. 129-138. (In Persian).
- 2- Canholi, J. F., Canholi, A. P. and Sobral, V., 2011. Hydraulic Design of a Labyrinth Weir in Aclimação's Lake. *12<sup>nd</sup> International Conference on Urban Drainage*, Porto Alegre/Brazil.
- 3- Crookston, B. M. and Tullis, B. P., 2012a. Arced labyrinth weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*. 138(6), pp.555-562.
- 4- Crookston, B. M. and Tullis, B. P., 2012b, Hydraulic design and analysis of labyrinth weirs. I: Discharge relationships. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 139(5), pp.363-370.
- 5- Esmaeili Varaki, M. and Safarrazavi Zadeh, M., 2013. Study of Hydraulic Features of Flow Over Labyrinth Weir with Semi-circular Plan form. *Journal of Water and Soil*. 27(1), pp. 224-234. (In Persian).
- 6- Farzin, S., Karami, H. and Zamiri, E., 2016. Study of the Flow over Rubber Dam Using Computational Hydrodynamics. *Journal of Dam and Hydroelectric Powerplant*. 3(9), pp.1-11. (In Persian).
- 7- Hirt, C. W. and Richardson, J. E., 1999. The modeling of shallow flows, *Flow Science, Technical Notes*. 48, pp.1-14.

- 8- Hosseini, K., Tajnesaie, M. and Jafari Nodoush, E., 2015. Optimization of the Geometry of Triangular Labyrinth Spillways, Using Fuzzy- Neural System and Differential Evolution Algorithm. *Journal of Civil and Environmental Engineering*. 45(1), PP.81-91. (In Persian).
- 9- Khode, B. V., Tembhurkar, A. R., Porey, P. D. and Ingle, R. N., 2011. Experimental studies on flow over labyrinth weir. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 138(6), pp.548-552.
- 10- Nezami, F., Farsadizadeh, D., Hosseinzadeh Delir, A. and Salmasi, F., 2012. Experimental Study of Discharge Coefficient of Trapezoidal Labyrinth Side-Weirs. *Journal of Water and Soil Science*. 23(1), PP.247-257. (In Persian).
- 11- Nikpiek, P. and Kashefipour, S. M., 2014. Effect of the hydraulic conditions and structure geometry on mathematical modelling of discharge coefficient for duckbill and oblique weirs. *Journal of Irrigation Science and Engineering*. 39(1), pp.1-10. (In Persian).
- 12- Noori, B. M. and Aaref, N. T., 2017. Hydraulic Performance of Circular Crested Triangular Plan Form Weirs. *Arabian Journal for Science and Engineering*. pp.1-10.
- 13- Noruzi, S. and Ahadiyan, J., 2016. Effect of Vortex Breaker Blades 45 Degree on Discharge Coefficient of Morning Glory Spillway Using Flow-3D. *Journal of Irrigation Science and Engineering*. 39(4), PP. 47-58. (In Persian).
- 14- Paxson, G. and Savage, B., 2006. Labyrinth spillways: comparison of two popular USA design methods and consideration of non-standard approach conditions and geometries. Proceedings of the international junior researcher and engineer workshop on hydraulic structures, Montemor-o-Novo, Portugal, Division of Civil Engineering, 37.
- 15- Payri, R., Tormos, B., Gimeno, J. and Bracho, G., 2010. The potential of Large Eddy Simulation (LES) code for the modeling of flow in diesel injectors. *Mathematical and Computer Modelling*. 52(7), pp.1151-1160.
- 16- Rezaee, M., Emadi, A. and Aqajani Mazandarani, Q., 2016. Experimental Study of Rectangular Labyrinth Weir. *Journal of Water and Soil*. 29(6), pp. 1438-1446. (In Persian).
- 17- Seo, I. W., Do Kim, Y., Park, Y. S. and Song, C. G. 2016, Spillway discharges by modification of weir shapes and overflow surroundings. *Environmental Earth Sciences*. 75(6), pp.1-13.
- 18- Suprpto, M., 2013. Increase spillway capacity using Labyrinth Weir. *Procedia Engineering*. 54, pp. 440-446.
- 19- Tullis, J. P., Amanian, N. and Waldron, D., 1995. Design of labyrinth spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*. 121(3), pp.247-255.
- 20- Zamiri, E., Karami, H. and Farzin, S., 2016. Numerical Study of Labyrinth Weir Using RNG Turbulence Model. *15<sup>th</sup> Iranian Hydraulic Conference, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran*. (In Persian).