



Numerical investigation of flow behavior over arced trapezoidal piano key weirs

A. Edalati, R. Amini*

Department of Water Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

ABSTRACT: Weir is one of the most common artificial hydraulic structures that are used to measure flow in canals, divert flow, store water, change the flow regime in canals, and control floods during rainfall. One of the most important advantages of piano key weirs compared to linear weirs is the improvement of flow transfer capacity by increasing the length of the crest and as a result, increasing the length of the water passage in a fixed width of the construction without increasing the upstream water load. The purpose of this research is to numerically model the flow and investigate the effect of simultaneous changes in the number of cycles and the angle of the weir on the flow coefficient by trying to keep the total length of the weir crest and other geometric parameters constant for all models. After the investigations, it was found that increasing the weir angle of the piano key at a fixed length for all models increases the discharge coefficient, while increasing the number of cycles at a fixed length for all models due to the reduction of the inlet key water tank area, increasing the contraction of the current streamlines and then intensifying the local submergence in the outlet key, the current permeability coefficient will decrease significantly. Among all the weirs modeled in this research, the ATPK135-2 is known as the best model and was able to increase the discharge coefficient by 47% compared to the linear state (without curvature).

Review History:

Received: Dec. 11, 2022
Revised: Sep. 25, 2023
Accepted: Oct. 22, 2023
Available Online: Nov. 08, 2023

Keywords:

piano key weir
discharge coefficient
numerical modeling
weir angle
number of cycles

1- Introduction

The intensity of flow in weirs is directly proportional to the length of their crest. Unlike conventional linear weirs, non-linear weirs can increase the flow discharge capacity without increasing the width of the weir without increasing the upstream total head. Meanwhile, a new form of non-linear weirs is PKWs. PKW has a high discharge capacity and for this reason, it can be used as economic structures with high efficiency. Recently, various types of weirs have been developed in the same way and used in various dam construction projects. In general, PKW¹ can be divided into 4 types A, B, C, and D, and it should be noted that type A is also the subject of this research.

The hydraulic performance of free weirs for a fixed head has a direct relationship with the length of the weir and the discharge coefficient (C_d) of them is calculated using equation (1):

$$C_d = Q / \left(\frac{2}{3} L \sqrt{2g} H^{1.5} \right) \quad (1)$$

where L = total length of weir crest, H = flow head on the

weir, and Q = weir discharge.

Andersen and Tullis investigated the equal height PKWs, labyrinth, and labyrinth with inclined keys with the same rectangular plan. His results showed that in the design of a spillway with restrictions on the width of the channel and the width of the spillway if a longer length can be created with the limitations of the construction space, even if the curves of the discharge coefficient (C_d) for that geometry are lower than the spillway, the increase in the flow rate in the constant head is quite remarkable. But in general, the curve of discharge coefficient in relation to H/P (the ratio of the flow height from the weir to the energy level line to the crest of the weir) of the trapezoidal labyrinth weirs with larger angles is higher than PKWs[1].

Chartaghi, Nazari, and Shoushtari (2019) conducted a laboratory and numerical study of a series with arced- in plan. The comparison of the results obtained for arced trapezoidal piano key weirs (ATPKW²) and linear rectangular piano key weirs (LRPKW³) showed that, in lower H/P ratios (flow height on the weir to crest height) the LRPKW³ showed better performance however increasing the H/P ratio gradually but

2 Arced Trapezoidal Piano Key Weirs

3 Linear Rectangular Piano Key Weirs

1 Piano key weir

*Corresponding author's email: web2_ramin.amini@shahroodut.ac.ir



continuously improves the hydraulic performance of ATPKW models. Reducing the arc angle in the ATPKW models initially reduced the hydraulic performance of these models but later strengthened it significantly [2].

Munish Kumar et al. (2020) in their laboratory research compared the increased discharge efficiency with TPKW¹ with RPKW² and concluded that both have the same L/W ratio. The benefit from the synergistic discharge of TPKWs compared to RPKWs was between 2 and 15%. The effect of weir height in increasing the discharge capacity of both types of piano key weirs was positively observed due to the limitation of early immersion of outlet keys with low weirs. In the current research, the effect of weir height observed with TPKWs was slightly stronger than RPKWs in influencing hydraulic performance [3].

In the present research, an attempt has been made to investigate the combined effects of changing the overflow angle and the number of cycles, considering the reduction of the multifaceted effects of other geometric parameters with the help of numerical modeling. For this purpose, in the first step, numerical modeling was done by using the laboratory results of one of Anderson's models [1], and validation of the numerical model was performed by examining two turbulence models RNG³ and LES⁴. Then in the second step after validation of the numerical model and selection of the best turbulence model, the influence of changes in the geometrical parameters of the weir angle and the number of cycles was also investigated and in the last step, by analyzing the obtained results, the effect of the combined changes of the weir angle and the number of cycles on the weirs coefficient was determined and then the optimal weir with better efficiency was introduced

2- Materials and methods

2- 1- Validation of the numerical model for simulating the flow on the PKW

In this part, the analysis of the results of setting the numerical model and its comparison with the results of the corresponding laboratory model conducted by Anderson have been discussed. In the present study, a laboratory model, which will be mentioned later, is considered as the adjusted basic model. For this purpose, numerical model validation using laboratory data is provided.

2- 2- Boundary conditions

In order to achieve acceptable results, appropriate boundary conditions should be selected, corresponding to the actual laboratory conditions. The numerical model has three non-uniform grid blocks with the number of grids along (x, y, z). The optimal grid for each block is determined according to the sensitivity of that block's location and also with the help of the GCI⁵ algorithm [4].

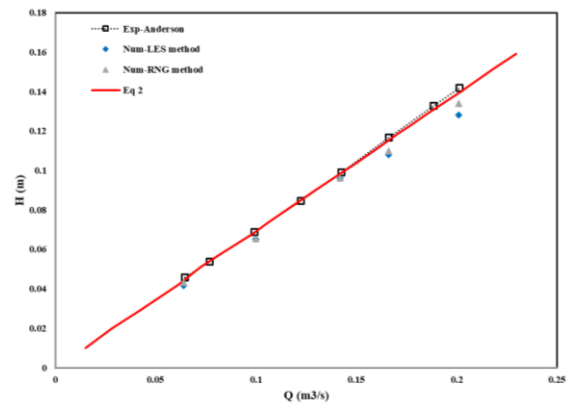


Fig. 1. Comparison of changes in water head relative to discharge in the weir.

2- 3- Choice of turbulence model

One of the most important steps in the numerical modeling of the flow is the selection of the appropriate turbulence model, and in most natural phenomena, the fluid flow is turbulent. Turbulent flow is a type of fluid flow, in which the fluid undergoes strong mixing processes. In this research, RNG and LES turbulence models have been used to model the flow for the same grid for both models.

3- Results and discussion

Figure 2 shows the streamlines in the lower and middle levels of ATPK45-2 and ATPK135-2 weirs. As can be seen, in the mentioned weirs after reaching the inlet key the lower flows are uniformly distributed on the side crests and the inlet key, of course, a better flow distribution can be seen for the ATPK135-2 weir. Regarding the flows approaching the side keys for the mentioned weirs, as can be seen, the flow passes through the entrance key with a proper distribution but some of the streamlines approaching the central key are drawn towards the side keys and change direction to the upper layers and then passes through the side crest of the weir side keys. In these areas, the flow velocity decreases and the flow recirculates. One of the reasons for this is the angular sides of the weir foundations and the distance created between the sloping surface and the place of flow transfer from the tank to the inlet key. The creation of the recirculation area in the inlet key reduces the effective width of the flow in the inlet key.

As can be seen in Figure 3, by increasing the angle of the weir or in other words by decreasing the radius of curvature with the overall length of the weir crest being constant, the amount of flow passing through the ATPKWs has increased and on the other hand with the increase in the number of cycles with the overall length of the weir crest being constant and the value of the flow passage coefficient has a downward trend which is the reason for the reduction of the area of the inlet water catchment. The above-mentioned points are directly

1 Trapezoidal Piano Key Weir

2 Rectangular piano key weir

3 Renormalization Group

4 Large Eddy Simulation

5 Grid Convergence Index

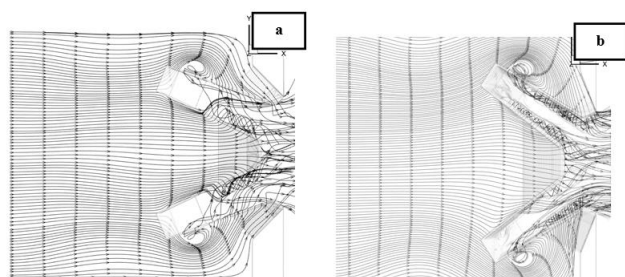


Fig. 2. Streamlines of the lower layer of the weir a) ATPK45-2 b) ATPK135-2.

related to the flow pattern passing through the weirs of the subject of the present research and regarding the investigation of their hydraulic performance. the general pattern as well as the streamlines are discussed on them.

4- Conclusions

- Among all the weirs modeled in this research, the ATPK135-2 is known as the best model and has been able to increase the discharge coefficient by 47% compared to the linear mode of the PK1.0 weir.

- In examining the effects of simultaneous changes in the weir angle and the number of cycles, one should pay attention to the economic efficiency of the design because in the present research it was found that increasing the total length of the weir, the number of cycles and the weir angle cannot necessarily lead to the achievement of a high discharge coefficient because in the sections it was mentioned before that the APK150-5 weir (reviewed by B.Noroozi) had a geometric advantage (the total length of the weir and the width of the building is larger) compared to the ATPK135-2 weir (the best model of this research) but it had a weaker hydraulic performance.

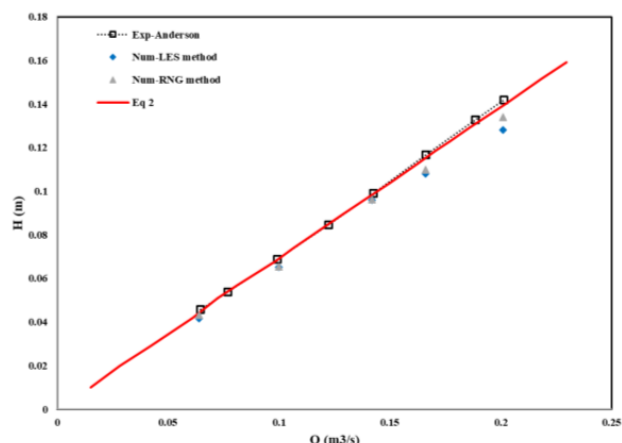


Fig. 3. Comparison of the discharge coefficient of ATP-KWs against the effect of increasing the cycle and weir angle for the same crest length of all weirs.

References

- [1] R. M. Anderson, *Piano Key Weir Head Discharge Relationships*, Utah State University, 2011.
- [2] M.K. Chahartaghi, S. Nazari, M.M. Shooshtari, *Experimental and numerical simulation of arced trapezoidal piano key weirs*, *Flow Measurement and Instrumentation*, 68 (2019) 101576.
- [3] M. Kumar, P. Sihag, N. Tiwari, S. Ranjan, *Experimental study and modelling discharge coefficient of trapezoidal and rectangular piano key weirs*, *Applied Water Science*, 10(1) (2020) 1-9.
- [4] P.J. Roache, *Perspective: A Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies*, *Journal of Fluids Engineering*, 116(3) (1994) 405-413.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

A. Edalati, R. Amini, *Numerical investigation of flow behavior over arced trapezoidal piano key weirs*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 55(11) (2024) 481-484.

DOI: [10.22060/ceej.2023.22005.7879](https://doi.org/10.22060/ceej.2023.22005.7879)





بررسی عددی رفتار جریان بر روی سرریزهای کلیدپیانویی ذوزنقه ای انحنادار

عادل عدالتی، رامین امینی*

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران .

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۲۰
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۷/۰۳
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۳۰
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۸/۱۷

کلمات کلیدی:

سرریز کلید پیانویی
ضریب عبوردهی جریان
مدل سازی عددی
زاویه سرریز
تعداد سیکل

خلاصه: سرریز از معمول ترین سازه های هیدرولیکی ساخته بشر است که جهت اندازه گیری دبی جریان در کانال ها، انحراف جریان، ذخیره آب، تغییر رژیم جریان در کانال ها و کنترل سیلاب در مواقع بارش مورد استفاده قرار می گیرند. سرریزهای آزاد به دو دسته ی خطی و غیرخطی تقسیم می شوند. سرریز کلید پیانویی، نوعی سرریز غیرخطی بوده و یکی از بهترین گزینه ها از نظر هیدرولیکی - اقتصادی به منظور استفاده در پروژه های بهسازی جهت ظرفیت تخلیه در هنگام سیلاب و افزایش حجم مخزن در پروژه های جدید سدسازی به شمار می آید. از مهم ترین مزیت های سرریزهای کلید پیانویی نسبت به سرریزهای خطی، بهبود ظرفیت انتقال جریان از طریق افزایش طول تاج و در نتیجه افزایش طول آبگذری در یک عرض ثابت ساختگاه بدون افزایش بار آبی بالادست می باشد. هدف از انجام تحقیق حاضر، مدل سازی عددی جریان و بررسی اثر تغییرات همزمان تعداد سیکل و زاویه ی سرریز بر روی ضریب عبوردهی جریان با ثابت نگه داشتن طول کل تاج سرریز و سایر پارامترهای هندسی برای دوازده مدل می باشد. پس از بررسی های صورت گرفته مشخص گردید، افزایش زاویه ی سرریز کلید پیانویی در یک طول ثابت برای تمامی مدل ها موجب افزایش ضریب عبوردهی جریان می شود در حالی که با افزایش تعداد سیکل در یک طول ثابت به دلیل کاهش مساحت آبگیر کلید ورودی، افزایش انقباض خطوط جریان و در پی آن تشدید استغراق موضعی در کلید خروجی، ضریب عبوردهی جریان کاهش چشمگیری خواهد داشت. در بین تمامی سرریزهای مدل سازی شده در تحقیق حاضر، سرریز 2-ATPK135 به عنوان مدل برتر شناخته شده و توانست ضریب عبوردهی جریان را نسبت به حالت خطی (بدون انحنا) به میزان ۴۷ درصد افزایش دهد.

۱- مقدمه

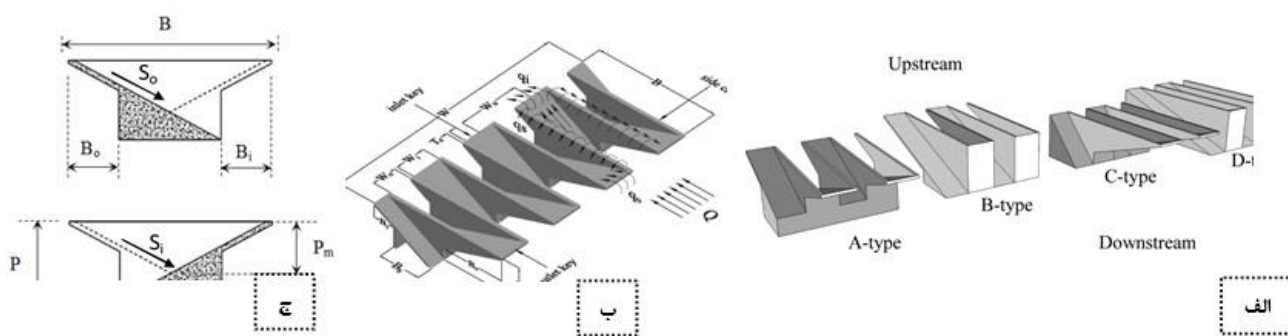
نوع D سرریز فاقد هر گونه کنسول می باشد. لازم به ذکر است که نوع A موضوع تحقیق حاضر نیز می باشد. شکل ۱ نشان دهنده ی انواع سرریزهای کلید پیانویی، پارامترهای هندسی و هیدرولیکی وابسته به هندسه ی این نوع سرریز و اجزای تشکیل دهنده ی سازه ی آن نیز می باشد. مطابق شکل ۱ مهم ترین پارامترهای هندسی سرریز کلید پیانویی نوع A عبارتند از:

- P: ارتفاع سرریز
- P_m : ارتفاع تاج تا مرکز سطوح شیب دار کلید ورودی و خروجی
- L: طول تاج
- S_1 : شیب کلید ورودی
- S_0 : شیب کلید خروجی
- B: طول تاج کناری
- B_1 : طول کنسول کلید ورودی

شدت جریان در سرریزها با طول تاج آن ها نسبت مستقیم دارد. سرریزهای غیرخطی برخلاف سرریزهای خطی معمولی می توانند ظرفیت انتقال جریان را بدون افزایش عرض سرریز و بدون افزایش بار آبی بالادست، افزایش دهند. در این میان شکل جدیدی از سرریزهای غیر خطی، سرریزهای کلیدپیانویی هستند. سرریزهای کلیدپیانویی ظرفیت تخلیه دبی بسیار بالایی دارند و به همین علت می توانند به عنوان سازه ای اقتصادی با کارایی بالا مورد استفاده قرار گیرند. اخیراً شکل های گوناگونی از سرریزها به همین روش توسعه یافته و در پروژه های مختلف سدسازی مورد استفاده قرار گرفته است. به طور کلی سرریزهای کلیدپیانویی را می توان به ۴ نوع A، B، C و D تقسیم کرد. در نوع A، سرریز شامل کنسول های مشابه در بالادست و پایین دست می باشد. انواع B و C شامل یک کنسول در بالادست یا پایین دست هستند و در

* نویسنده عهده دار مکاتبات: web2_ramin.amini@shahroodut.ac.ir





شکل ۱. انواع سرریز کلید پیانویی، ب) پارامترهای هندسی سرریز کلیدپیانویی نوع A در نمای سه‌بعدی، ج) پارامترهای هندسی سرریز کلیدپیانویی نوع A در مقطع عرضی.

Fig. 1. a) types of PKW, b) PKW geometric parameters in three-dimensional view, c) PKW geometric parameters in cross section.

- بر اساس مطالعات آزمایشگاهی لمپریه^۱، بهینه‌ترین مقدار برای نسبت عرض کلید ورودی (W_i) به کلید خروجی (W_o) برابر ۱/۲ می‌باشد. آن‌ها رابطه‌ی (۲) را به عنوان رابطه‌ی اشل-دبی^۲ برای سرریزهای کلید پیانویی ارائه دادند. در رابطه‌ی (۲)، q دبی در واحد عرض بر حسب متر مربع بر ثانیه و P_m ارتفاع مشخصه‌ی سرریز بر حسب متر است [۲].

$$q = 4.3H\sqrt{P_m} \quad (2)$$

در سال ۲۰۱۱ اندرسن و تولیس به بررسی سرریزهای هم ارتفاع کلیدپیانویی، کنگره‌ای و کنگره‌ای با کلیدهای شیبدار با پلان مستطیلی و یکسان پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که در طراحی یک سرریز با محدودیت‌هایی در عرض کانال و عرض سرریز اگر طول بیشتری بتوان با محدودیت‌های فضای ساخت ایجاد کرد، حتی اگر منحنی‌های ضریب آبگذری (C_d) برای آن هندسه از سرریز کمتر باشند، افزایش مقدار دبی در یک هد ثابت کاملاً قابل ملاحظه است. ولی به طور کلی منحنی ضریب آبگذری نسبت به (H_r/P) (نسبت ارتفاع جریان از روی سرریز تا خط تراز انرژی به تاج سرریز) در سرریزهای کنگره‌ای دوزنقه‌ای با زوایای بزرگ‌تر، نسبت به سرریزهای کلیدپیانویی بیشتر است [۳].

- B_o : طول کنسول کلید خروجی
- W_i : عرض کلید ورودی
- W_o : عرض کلید خروجی

عملکرد هیدرولیکی سرریزهای آزاد برای یک هد ثابت، رابطه‌ی مستقیم با طول سرریز داشته و ضریب آبگذری (C_d) سرریزهای مذکور به کمک رابطه‌ی (۱) محاسبه می‌شود [۱]:

$$C_d = Q / \left(\frac{2}{3} L \sqrt{2g} H^{1.5} \right) \quad (1)$$

در رابطه‌ی فوق L طول کل تاج سرریز، H هد جریان روی سرریز و Q دبی جریان است. محدودیت عرض در اجرای سرریزها منجر به کاهش ظرفیت تخلیه‌ی آن‌ها می‌شود به همین دلیل سرریزهای کنگره‌ای (غیرخطی) به عنوان یک راه حل مناسب به منظور بهبود کارایی هیدرولیکی این سرریزها توسعه داده شده است. سرریزهای کنگره‌ای قادر هستند در عرض ثابت ساختگاه، طول آبگذری جریان (L) را نیز افزایش دهند اما شکل قائم دیواره‌های این سرریزها باعث ایجاد فشردگی جریان‌های نزدیک شونده به سرریز و کاهش عملکرد هیدرولیکی سرریز می‌شود به همین منظور شکل جدیدی از سرریزهای غیرخطی یعنی سرریز کلید پیانویی توسط موسسه هیدروکووپ فرانسه و آزمایشگاه هیدرولیک و محیط زیست دانشگاه بیسکارا ارائه گردید.

1 Lempérière
2 stage-discharge

صرف نظر از مقدار L/W ، حداکثر مقدار ضریب تخلیه مربوط به نسبت H/P نزدیک به 0.7 است.

TPKW می‌تواند برای اهداف عملی مفید باشد [۶].

در سال ۲۰۱۷ صفرزاده و نوروزی به بررسی و مقایسه عددی راندمان، توزیع خطوط جریان و هیدرودینامیک سرریز کنگره‌ای و کلیدپیانویی مستطیلی یکسان در پلان پرداخته و کاهش استغراق موضعی و یکنواخت‌تر نمودن توزیع دبی بر روی تاج سرریز کلیدپیانویی نسبت به سرریز کنگره‌ای را به دلیل هندسه خاص عامل اصلی بالا بودن راندمان آن نسبت به مدل دوم معرفی نمودند. در ادامه این گروه با ثابت نگه‌داشتن اکثر نسبت‌های هندسی و ابعاد سرریز از جمله طول تاج (بالادست، پایین‌دست و جانبی) زاویه تاج جانبی را افزایش داده و به مقایسه راندمان و توزیع خطوط جریان سرریز کلیدپیانویی مستطیلی و دوزنقه‌ای در پلان پرداختند. نتایج آن‌ها حاکی از افزایش ضریب دبی مدل دوزنقه‌ای نسبت به مدل مستطیلی بوده است. نکته قابل تأمل افزایش عرض سرریز زاویه‌دار نسبت به مدل مستطیلی (کاهش L/W) است که در این حالت برای مقایسه بهتر باید دبی در واحد سرریز به عنوان معیار مقایسه مدنظر قرار گیرد [۷].

در سال ۲۰۱۸ کروکستن، اندرسن و تولیس به بررسی روش تخمین تخلیه جریان آزاد برای هندسه‌های سرریز کلید پیانویی پرداختند. نتایج مطالعات آنها درباره‌ی اعتبارسنجی روش دینامیک سیالات محاسباتی^۳ (CFD) بر روی سرریز کلید پیانویی نشان داد که شبیه‌سازی سه‌بعدی دینامیک سیالات محاسباتی، با استفاده از مدل‌های LES و $k-\epsilon$ RNG برای برآورد هیدرولیکی سرریز کلیدپیانویی با میانگین خطاهای نسبی ۳ تا ۴ درصد برای دو نمونه‌ی آزمایشی مناسب می‌باشد و همچنین بیان کردند که داده‌های تجربی برای کالیبراسیون و شبیه‌سازی نتایج CFD ضروری هستند [۸].

زینلی‌گو و همکاران در سال ۲۰۱۹، فرمول‌های ظرفیت تخلیه سرریزهای کلیدپیانویی که در سال‌های گذشته توسعه یافته را مقایسه کردند و فرمولی را براساس داده‌های آزمون موجود ارائه دادند. نتایج تجزیه و تحلیل نشان داد که مقادیر پیش‌بینی شده توسط فرمول پیشنهادی مطابقت خوبی با داده‌های آزمون شده دارند. با میانگین خطا در محدوده‌ی ۵ تا ۸ درصد اگر نسبت H/P بیشتر از 0.15 باشد. فرمول پیشنهادی یک رویکرد آسان و عملی برای پیش‌بینی ظرفیت انتشار سرریزهای کلیدپیانویی است. با در نظر گرفتن اثر مقیاس از یک مدل و تاثیر کشش سطح آب، نسبت هد در کاربردهای عملی باید بزرگتر از 0.1 باشد.

در سال ۲۰۱۳ ریبرو و همکاران یک بررسی اجمالی از تست‌های مدل انجام شده مربوط به سرریز کلیدپیانویی را ارائه دادند که شامل تحقیقات مربوط به نمونه‌های اولیه خاص و همچنین مدل‌های تحقیقاتی برای انجام تجزیه و تحلیل پارامترهای سیستمی می‌شد. نتایج اصلی عبارت بودند از [۴]: کاربرد استفاده از سرریز کلیدپیانویی به عنوان جایگزینی برای بازسازی سد و پروژه جدید سرریز طی سال‌های گذشته افزایش یافته و به دنبال آن یک پایگاه داده مهم از آزمایشات سیستماتیک ایجاد شده است.

پارامترهای کلیدی کنترل ظرفیت تخلیه سرریزهای کلیدپیانویی شامل L ، W ، P_m و H_0 هستند. این پارامترها قبلاً توسط نویسندگان مختلف براساس آزمایشات سیستماتیک انجام شده در کانال‌های آزمایشگاهی، به طور دقیق مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

مطالعات سال‌های بعدی در مورد سرریزهای کلیدپیانویی که در شرایط جریان آزاد کار می‌کنند، احتمالاً در تجزیه و تحلیل تاثیر پارامترهای ثانویه مانند شرایط نزدیک شدن، شکل و ضخامت تاج، شکل انحراف زیر کلیدهای خروجی، طول برآمدگی‌ها و وجود دیواره‌های جان‌پناه در کلیدهای خروجی متمرکز خواهد شد.

سیسرو و دلایسل در سال ۲۰۱۳ آزمایش‌های خود را بر روی یک سرریز کلیدپیانویی ساده با اشکال تاج تخت، نیمه گرد و یک چهارم گرد انجام دادند. این تجزیه و تحلیل تایید کرد که تاثیر شکل تاج بر ظرفیت تخلیه در هدهای کم و اشکال نیم گرد و یک چهارم گرد عملکرد هیدرولیکی بهتری از عملکرد شکل تخت دارد و افزایش در دبی (مربوط به تاج تخت) با افزایش ارتفاع سد می‌تواند از ۱۰٪ به ۲۰٪ در هد پایین‌دست، هنگامی که اثرات مقیاس ناچیز باشد، مؤثر باشد [۵].

مهبودی و همکاران در سال ۲۰۱۶ مطالعات آزمایشگاهی گسترده‌ای بر روی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای^۱ (TPKW) انجام دادند و در این بررسی ثابت شد که ضریب تخلیه $TPKW$ ، ۲۲ درصد بیشتر از سرریز کلیدپیانویی مستطیلی^۲ (RPKW) است. علاوه بر این، اثرات پارامترهای هندسی $TPKW$ بر ضریب تخلیه مورد بررسی قرار گرفت که می‌تواند به صورت زیر خلاصه شود:

در میان نسبت‌های هندسی، W_i/W_o و L/W به ترتیب کمترین و بالاترین تاثیر را در افزایش مقدار ضریب تخلیه (C_d) داشتند.

برای یک هد (H) معین، میزان تخلیه سرریز برای مقادیر بالاتر ارتفاع تاج (P) به طرز چشم‌گیری افزایش می‌یابد.

1 Trapezoidal Piano Key Weirs

2 Rectangular piano key weirs

درجه منجر به کاهش ضریب گذردهی سرریز به ترتیب برابر ۱۲ تا ۱۸ درصد شده است. علاوه بر این نتایج همچنین کاهش بیشتر ظرفیت تخلیه را به ازای افزایش زاویه‌ی دیوار جانبی نشان داده است. در نهایت او توصیه کرد که بهتر است تحقیقات جامع‌تری برای تاثیر متغیرهای سرریز کلید پیانویی با زاویه‌ی دیوار جانبی به منظور بهینه‌سازی هزینه‌ها و عملکرد هیدرولیکی آن انجام شود. [۱۱]

مونیش کومار و همکاران در سال ۲۰۲۰ در تحقیقات آزمایشگاهی خود، کارایی تخلیه افزایش یافته با سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای را با سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که هر دو دارای نسبت L/W یکسان هستند. سود حاصل از هم‌افزایی تخلیه سرریزهای دوزنقه‌ای نسبت به سرریزهای مستطیلی بین ۲ تا ۱۵ درصد بود. تاثیر ارتفاع سرریز در افزایش ظرفیت تخلیه هر دو نوع سرریز کلید پیانویی به دلیل محدودیت غوطه‌وری زود هنگام کلیدهای خروجی با سرریزهای کم ارتفاع، مثبت مشاهده شد. در تحقیقات فعلی، تاثیر ارتفاع سرریز مشاهده شده با سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای از سرریزهای مستطیلی کلید پیانویی در تاثیرگذاری روی عملکرد هیدرولیکی، کمی قوی‌تر بود. [۱۲]

همان‌طور که در پیشینه سرریزهای خطی و غیرخطی ملاحظه شد، بر روی سرریزهای کلید پیانویی، مطالعات تجربی و آزمایشگاهی بسیاری در زمینه‌ی بازدهی عملکرد، ابعاد و مقاطع بهینه در آزمایشگاه‌های معتبر با امکانات فراوان و به تبع آن صرف زمان بسیار زیاد، صورت پذیرفته است. البته باید به این نکته توجه کرد که جریان بر روی این سرریزها به علت کنگره‌دار بودن، شیب‌ها و فرم خاص کلیدها بسیار پیچیده بوده و تحلیل تأثیر پارامترهای گوناگون بر روی آن‌ها مشکل است چه بسا گاه به علت تعداد پارامترها، این تأثیرات دوجانبه نیز شده و تشخیص تأثیرات جداگانه هر پارامتر را دشوار ساخته است. با مرور بر روی این پیشینه به نظر می‌رسد که اختلاف نظرهایی در خصوص فرم سرریزهای کلید پیانویی در پلان (انحنادار بودن و در واقع حالت خطی یا غیرخطی این سرریزها) وجود دارد به گونه‌ای که بعضی از محققین حالت خطی سرریز کلید پیانویی و برخی دیگر حالت غیرخطی (انحنادار در پلان) آن را برتر دانسته‌اند همچنین با بررسی دقیق‌تر تحقیقات صورت گرفته در سالیان اخیر بر روی تاثیر تغییرات پارامترهای هندسی سرریز کلید پیانویی می‌توان دریافت، که در مدل‌های آزمایشگاهی و عددی ارائه شده توسط محققین، پارامترهای هندسی تاثیرگذار بر رفتار سرریز از جمله طول کل سرریز، ارتفاع تاج، عرض کلید ورودی و خروجی سرریز و عرض دهانه ساختگاه به گونه‌ای در نظر گرفته شده‌اند که نتوانسته

از آنجایی که در حال حاضر هیچ استاندارد ثابت و عملی برای طراحی و ارزیابی سرریز کلید پیانویی در دسترس نیست، از فرمول پیشنهادی می‌توان به عنوان مرجعی برای ارزیابی ظرفیت تخلیه سرریزهای کلید پیانویی نوع A و هدایت طراحی آن استفاده کرد.

در مورد یک هد بالادست کوچک (به طور معمول H/P کمتر از $0/2$) ظرفیت تخلیه سرریز کلید پیانویی نسبتاً زیاد است و نسبت بهبود تخلیه بالاتر از ۳ است که نشان‌دهنده‌ی افزایش آشکار جریان تخلیه است. با این حال، جریان مطلق هنوز به دلیل کوچک بودن هد در این مورد زیاد نیست. با در نظر گرفتن این که H/P کمتر از ۱ برای کارهای عادی، یک محدوده عملی برای نسبت بهبود تخلیه $1/2$ تا $3/5$ است، با افزایش هد بالادست، طول کلی L سرریز نقش غالب در جریان تخلیه دارد و افزایش جریان تخلیه کاهش می‌یابد.

هنگامی که H/P بزرگتر از $1/2$ باشد، ضریب نسبت جریان در محدوده $1/2$ تا $1/3$ است. بنابراین، جریان تخلیه سرریز کلید پیانویی به این معنا نمی‌تواند به روشی محدود افزایش یابد و در عوض، باید محدوده معقولی برای هد تعریف شود. لازم به ذکر است که ضخامت دیواره جانبی، ارتفاع جان‌پناه روی سرریز و شکل جان‌پناه از عوامل ثانویه هستند که ممکن است تاثیر ناچیزی بر ظرفیت تخلیه داشته باشند و اثرات خاص آن‌ها را می‌توان از نظر کمی در کارهای بعدی بررسی کرد. [۹]

در سال ۲۰۱۹ چهارطاقی، نظری و شوشتری به مطالعه‌ی آزمایشگاهی و عددی سرریز کلید پیانویی با انحنادار در پلان پرداختند. مقایسه‌ی نتایج بدست آمده برای سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای انحنادار $(ATPKW)$ و سرریز کلید پیانویی مستطیلی خطی $(LRPKW)$ نشان داد که، در نسبت‌های پایین‌تر H/P (ارتفاع جریان روی سرریز به ارتفاع تاج) سرریزهای $LR-PKW$ عملکرد بهتری به نمایش گذاشتند با این حال، افزایش نسبت H/P به تدریج اما مداوم عملکرد هیدرولیکی مدل‌های $ATPKW$ را بهبود می‌بخشد. کاهش زاویه‌ی قوس در مدل‌های $ATPKW$ در ابتدا عملکرد هیدرولیکی این مدل‌ها را کاهش داد اما بعداً به طرز چشمگیری تقویت کرد. [۱۰]

در سال ۲۰۲۰ عبدالجبار یوسف تاثیر زاویه دیوار جانبی بر ضریب گذر و ظرفیت تخلیه سرریز کلید پیانویی را به صورت آزمایشگاهی بررسی کرد. او نشان داد که سرریز کلید پیانویی مستطیلی از تمام مدل‌های غیر مستطیلی خیلی بهتر عمل می‌کند. او بیان کرد که افزایش زاویه دیوار جانبی به ۵ و ۷

- 1 Arced Trapezoidal Piano Key Weirs
- 2 Linear Rectangular Piano Key Weirs

که V_f کسر حجمی سیال^۴، ρ چگالی سیال، مولفه‌های سرعت (u, v, w) در جهات (x, y, z) می‌باشند. A_x و A_y و A_z کسر سطح باز^۵ در جهات x ، y و z می‌باشند.

۲-۲- معادله اندازه حرکت

معادلات حرکت برای مولفه‌های سرعت سیال (u, v, w) در سه جهت مختصات یا به عبارت دیگر معادلات ناویر استوکس بصورت زیر می‌باشند:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left(u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x + f_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left(u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + G_y + f_y \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left(u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + G_z + f_z \end{aligned} \quad (۴)$$

در این معادلات $G_{x,y,z}$ شتاب جرم و $f_{x,y,z}$ شتاب لزجت در سه جهت اصلی و برای متغیرهای لزجت دینامیکی μ می‌باشد.

$$\begin{aligned} \rho V_f f_x &= w s_x - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{xz}) \right\} \\ \rho V_f f_y &= w s_y - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{yz}) \right\} \\ \rho V_f f_z &= w s_z - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{zz}) \right\} \end{aligned} \quad (۵)$$

در معادلات (۵) $WS_{x,y,z}$ بیانگر تنش‌های برشی دیواره‌ها هستند. اگر این جملات حذف شوند، دیگر تنش برشی دیواره‌ای وجود نخواهد داشت زیرا جملات باقی‌مانده شامل کسر مساحت‌های جریان (A_x, A_y, A_z) می‌شوند که در آنها دیواره‌ها در نظر گرفته نشده‌اند. تنش‌های روی دیواره‌ها به وسیله فرض سرعت مماسی صفر در قسمتی از سطح محدود به جریان شبیه‌سازی می‌شوند. شبکه و مرزهای موانع متحرک جزء موارد استثنا هستند زیرا در آنها سرعت مماسی غیر صفر است.

تاثیر تغییرات پارامتر مد نظر را به درستی نشان دهد. امروزه با پیشرفت تکنولوژی و فن‌آوری، مهندسين بیشتر به دنبال طراحی و شبیه‌سازی سرریزهای پیچیده با نرم‌افزارهای مربوطه هستند تا در کنار پژوهش‌های بسیار ارزشمند تجربی، اطلاعات و نتایج پژوهش‌های عددی نیز کمکی به رفع مشکلات آن‌ها بنماید. در تحقیق حاضر، تلاش شده تاثیر همزمان تغییر زاویه سرریز و تعداد سیکل با توجه به کاهش اثر چند جانبه‌ی سایر پارامترهای هندسی به کمک مدل‌سازی عددی با نرم‌افزار فلوتری دی^۱ مورد بررسی قرار گیرد. به همین منظور در گام اول با استفاده از نتایج آزمایشگاهی یکی از مدل‌های اندرسون مدل‌سازی عددی انجام و صحت‌سنجی مدل عددی با بررسی دو مدل آشفتگی LES^2 و RNG^3 انجام گردید. در گام دوم پس از صحت‌سنجی مدل عددی و انتخاب مدل آشفتگی برتر، به بررسی تاثیر تغییرات پارامترهای هندسی زاویه سرریز و تعداد سیکل نیز پرداخته شده و در گام آخر با تحلیل نتایج به دست آمده، تاثیر تغییرات همزمان زاویه سرریز و تعداد سیکل بر ضریب آبگذری سرریز مشخص شده و سپس سرریز بهینه با کارایی بهتر معرفی شده است.

۲-۲- معادلات حاکم بر جریان در مدل ۳D- FLOW

معادلات حاکم بر جریان سیال در واقع همان قوانین بقای جرم و اندازه حرکت هستند که به صورت معادلات دیفرانسیل جزئی نوشته می‌شوند. به منظور دستیابی به معادلات جریان، سه گام باید طی شود. گام اول انتخاب قوانین پایه صحیح، گام دوم کاربرد قوانین توسط یک مدل مناسب جریان و گام سوم فراگیری معادلات ریاضی که نشان‌دهنده‌ی قوانین فیزیکی مذکور باشند. معادلات اصلی برای شبیه‌سازی جریان سه‌بعدی، چهار معادله دیفرانسیل شامل روابط پیوستگی و اندازه حرکت در جهات (x, y, z) هستند.

۲-۱- معادله پیوستگی

معادله پیوستگی جرم را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$V_f \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) = 0 \quad (۳)$$

4 Fractional volume open to flow
5 Fractional area open to flow

1 Flow3D
2 Renormalization Group
3 Large Eddy Simulation

جدول ۱. مشخصات هندسی سرریز کلید پیانویی مستطیلی مورد استفاده برای صحت‌سنجی مدل عددی (ابعاد بر حسب متر).

Table 1. Geometric characteristics of the RPKW used to validate the numerical model (dimensions in meters).

مقدار	نماد	پارامتر
۰/۱۹۶	P	ارتفاع سرریز
۴/۷۴۵	$L=N(2lc+Wi+Wo)$	طول تاج سرریز
۰/۹۳۲	W	عرض کانال
۰/۱۲۹	Wi	عرض کلید ورودی
۰/۱۲۹	Wo	عرض کلید خروجی
۵۵/۰۵۶	Si	شیب کف کلید ورودی
۵۵/۰۵۶	So	شیب کف کلید خروجی
۰/۴۸۹	lc	عرض سرریز
۰/۱۲۱	Bi	طول کنسول ورودی
۰/۱۲۱	Bo	طول کنسول خروجی
۰/۰۱۲	T	ضخامت دیواره سرریز
۴	N	تعداد سیکل‌ها
۵/۰۹۰	L/W	نسبت طول تاج سرریز به عرض کانال
۱	Wi/Wo	نسبت عرض کلید ورودی به کلید خروجی
۰/۱۰۰	lc/L	نسبت عرض سرریز به طول تاج
۴	$N=Wi+Wo+2lc$	تعداد سیکل

۳- هندسه و روش حل

۳-۱- صحت‌سنجی نرم‌افزار برای شبیه‌سازی جریان بر روی سرریز کلیدپیانویی

در این قسمت به تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از تنظیم مدل عددی و مقایسه آن با نتایج مدل آزمایشگاهی متناظر انجام شده توسط اندرسون پرداخته شده است [۳]. در مطالعه‌ی حاضر یک مدل آزمایشگاهی، که در ادامه به آن اشاره خواهد شد، به عنوان مدل پایه تنظیم شده در نظر گرفته شده است.

۳-۱-۱- داده‌های آزمایشگاهی سرریزهای کلید پیانویی

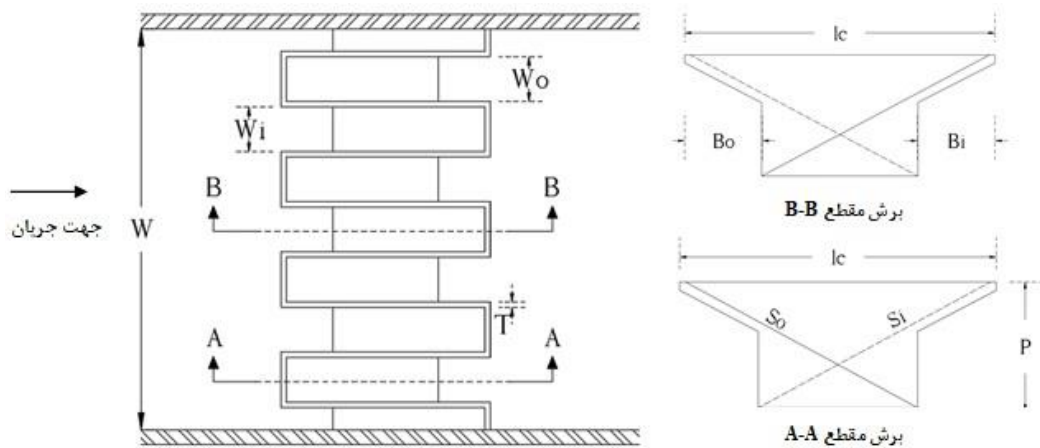
جدول ۱ شامل جزئیات هندسی سرریز کلیدپیانویی پایه‌ی تنظیمات می‌باشد [۳]. شکل ۲ پارامترهای هندسی مذکور در جدول ۱ را نشان می‌دهد.

1 Calibration

مدل‌سازی عددی به ازای ۵ مقدار دبی از ۰/۰۶۴ تا ۰/۲۰ متر مکعب بر ثانیه صورت گرفته است. لازم به ذکر است جهت انجام شبیه‌سازی دبی به عنوان شرط اولیه بالادست اعمال می‌شود سپس هد جریان روی سرریز به عنوان خروجی استخراج شده است. برای سهولت و درک بیشتر برای هر شرط کدهایی اختصاص داده شده است. در این کدها حرف اول شرط اولیه و حرف دوم معرف پارامتر خروجی از مدل است همچنین زیرنویس نام اصلی شماره‌ی آنالیزهای انجام شده است.

۳-۲- شرایط مرزی

به منظور دستیابی به نتایج قابل قبول، باید شرایط مرزی متناسب با شرایط واقعی آزمایشگاهی انتخاب شود. به منظور توسعه یافته شدن هرچه بیشتر پروفیل سرعت ورودی باید شرط مرزی ورودی به مقدار کافی از سازه‌ی سرریز فاصله داشته باشد. مدل عددی دارای سه بلوک شبکه‌بندی



شکل ۲. پارامترهای هندسی سرریزهای کلید پیاپی.

Fig. 2. Geometrical parameters of RPKW.

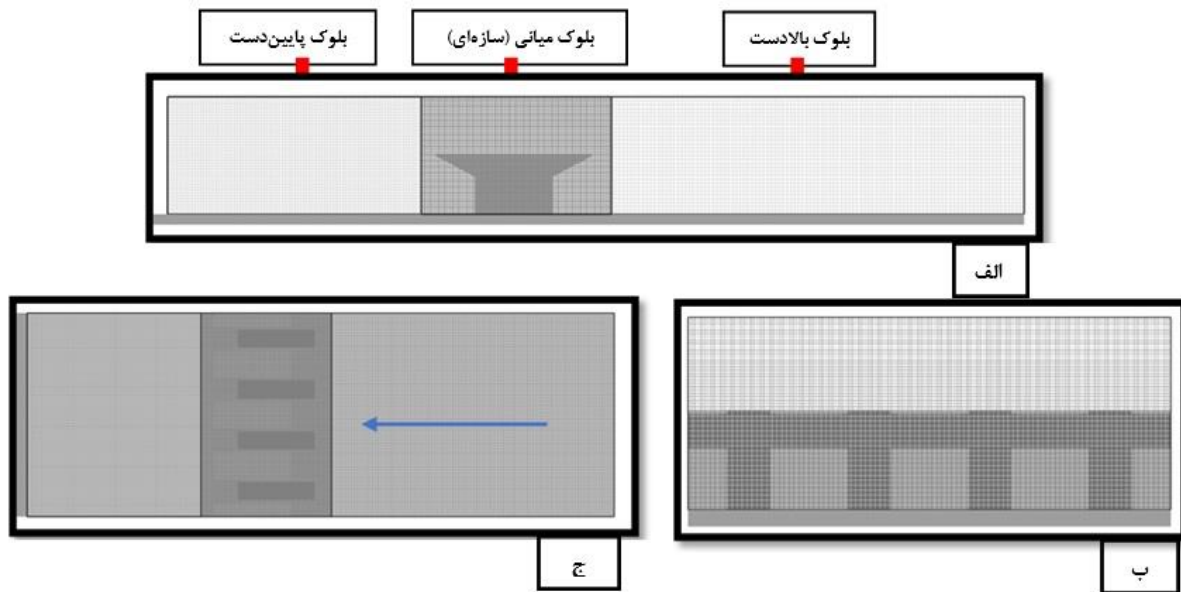
جدول ۲. دبی‌های انتخابی برای سناریوهای مختلف اجرای مدل عددی.

Table 2. Geometric characteristics of RPKW used to validate the numerical model (dimensions in meters).

کد شبیه‌سازی	دبی (مترمکعب بر ثانیه)
Q - H ₁	۰/۰۶۴
Q - H ₂	۰/۱۰۰
Q - H ₃	۰/۱۴۲
Q - H ₄	۰/۱۶۶
Q - H ₅	۰/۲۰۰

سرریز دارای حساسیت بیشتر بوده و لازم است تمامی تغییرات جریان بر روی سرریز تا حد امکان قابل مشاهده و بررسی باشد. پس از استفاده از الگوریتم GCI، تعداد شبکه‌ی بهینه (۱۰۶×۷۶×۳۰) برای بلوک بالادست، (۹۴×۱۴۸×۵۸) برای بلوک میانی و (۱۰۴×۸۸×۳۵) برای بلوک پایین‌دست انتخاب گردید. در ادامه و در جدول ۳ شرایط مرزی مورد استفاده در بلوک‌ها قابل ملاحظه می‌باشد. در شکل ۴ شرایط مرزی استفاده شده در مدل عددی نشان داده شده است.

غیریکنواخت با تعداد شبکه‌ی بهینه در امتداد (X,Y,Z) می‌باشد. شکل ۳ نشان‌دهنده‌ی نحوه‌ی شبکه‌بندی میدان حل سه بعدی می‌باشد. شبکه‌بندی بهینه برای هر بلوک با توجه به حساسیت موقعیت مکانی آن بلوک و همچنین به کمک الگوریتم GCI [۱۳] تعیین شده است. در الگوریتم مذکور، متناسب با مقدار دبی آزمایشگاهی، این پارامتر به عنوان هدف انتخاب گردید سپس با استفاده از شبکه‌بندی‌های مختلف، شبکه‌ی بهینه برای هر بلوک انتخاب شد. بدیهی است بلوک مربوط به سازه‌ی



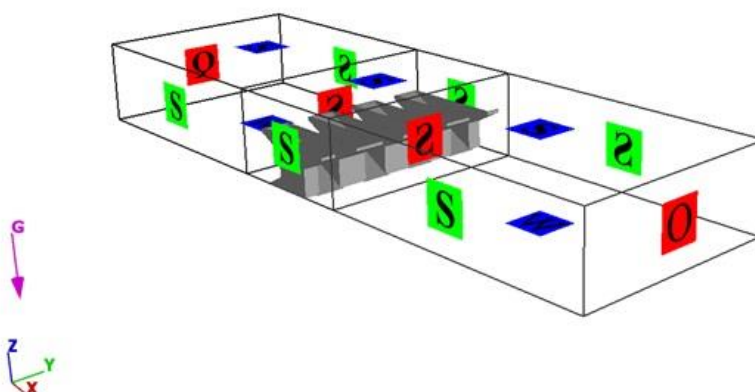
شکل ۳. شبکه‌بندی میدان حل سه بعدی سرریز کلید بیانویی در صفحه های مختصات الف) صفحه‌ی xz ب) صفحه‌ی yz ج) صفحه‌ی xy .

Fig. 3. Gridding of the three-dimensional solution field of PKW a) xz plane b) yz plane c) xy plane.

جدول ۳. شرایط مرزی مورد استفاده در بلوک‌های شبکه‌بندی.

Table 3. Boundary conditions used in grid blocks.

مقدار	نماد	پارامتر
۰/۱۹۶	P	ارتفاع سرریز
۴/۷۴۵	$L=N(2lc+Wi+Wo)$	طول تاج سرریز
۰/۹۳۲	W	عرض کانال
۰/۱۲۹	Wi	عرض کلید ورودی
۰/۱۲۹	Wo	عرض کلید خروجی
۵۵/۰۵۶	Si	شیب کف کلید ورودی
۵۵/۰۵۶	So	شیب کف کلید خروجی
۰/۴۸۹	lc	عرض سرریز
۰/۱۲۱	Bi	طول کنسول ورودی
۰/۱۲۱	Bo	طول کنسول خروجی
۰/۰۱۲	T	ضخامت دیواره سرریز
۴	N	تعداد سیکل‌ها
۵/۰۹۰	L/W	نسبت طول تاج سرریز به عرض کانال
۱	Wi/Wo	نسبت عرض کلید ورودی به کلید خروجی
۰/۱۰۰	lc/L	نسبت عرض سرریز به طول تاج
۴	$N=Wi+Wo+2lc$	تعداد سیکل



شکل ۴. شرایط مرزی استفاده شده در شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان روی سرریز کلید پیانویی.

Fig.4. Boundary conditions used in the 3D simulation of the flow over the piano key weir

۳-۲-۱- انتخاب مدل آشفتگی

یکی از مهم‌ترین مراحل در مدل‌سازی عددی جریان، انتخاب مدل آشفتگی مناسب بوده و در اکثر پدیده‌های طبیعی جریان سیال به صورت آشفتگی می‌باشد. در تحقیق حاضر از دو مدل آشفتگی 2 RNG و 3 LES به منظور مدل‌سازی جریان با شبکه‌بندی یکسان برای هر دو مدل استفاده شده است. مدل آشفتگی RNG دارای معادلات و ضرایبی است که به صورت تحلیلی با استفاده از تئوری Renormalisation group استخراج شده است همچنین قادر است جریان‌های چرخشی با عدد رینولدز^۴ پایین را به خوبی شبیه‌سازی کند. در مدل LES یا به عبارتی شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، جریان آشفتگی به وسیله‌ی گردابه‌هایی با طیف وسیعی از مقیاس‌های زمانی و طولی تعریف و توصیف می‌شود. به منظور صحت‌سنجی مدل عددی، نمودار هد جریان بالادست نمونه‌ی آزمایشگاهی سرریز به ازای دبی‌های مختلف تعیین و در شکل ۵ با نتایج آزمایشگاهی اندرسون مقایسه شده است. شکل ۵ شامل هد محاسبه شده با استفاده از رابطه (۲) می‌باشد. مطابق شکل، نتایج روش عددی به خصوص مدل آشفتگی RNG انطباق خوبی با نتایج آزمایشگاهی و رابطه (۳) دارد البته لازم به ذکر است به طور کلی روش LES نتایج دقیق‌تری از روش RNG ارائه می‌دهد، اما نیازمند صرف هزینه‌ی محاسباتی زیاد و شبکه‌بندی ریزتر می‌باشد و همانطور که در قسمت‌های قبل بیان گردید، برای هر دو روش از یک شبکه‌بندی یکسان استفاده شده است.

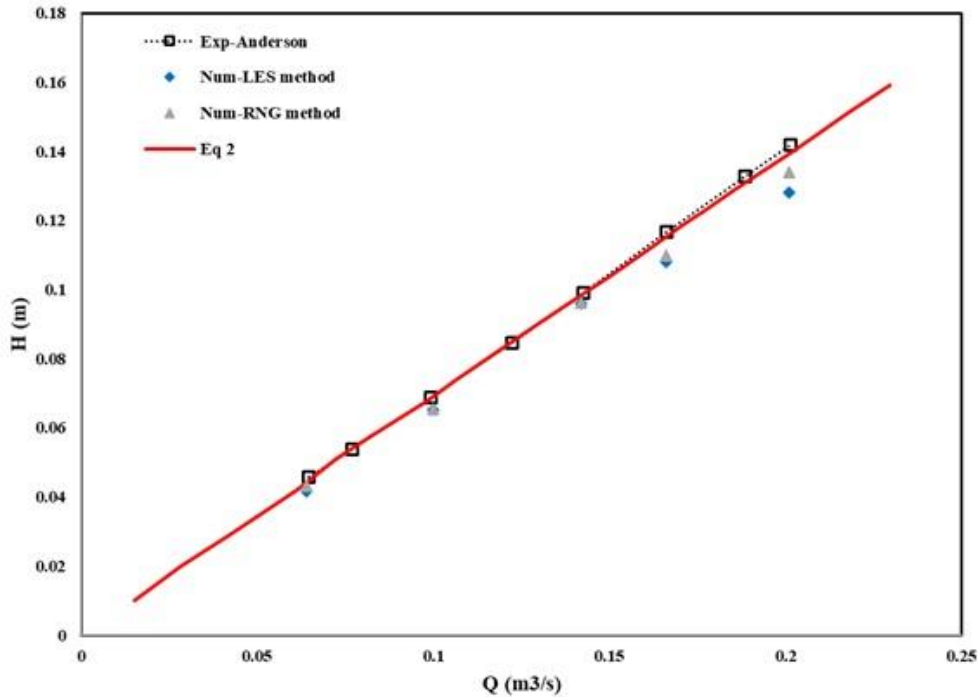
۳-۲-۲- صحت سنجی نتایج

جهت مقایسه‌ی کمی نتایج مدل عددی با مدل آزمایشگاهی، باید پارامترهایی به عنوان معیار انتخاب شوند. این معیارها در مطالعه‌ی حاضر شامل میانگین خطای مطلق^۵ (MAE)، ضریب تعیین^۶ (R^2) و مجذور میانگین مربعات خطا^۷ (RMSE) می‌باشند در معیارهای مذکور 8 O بیانگر مقدار پارامتر مشاهده شده در داده‌های مدل آزمایشگاهی، 9 P بیانگر مقدار پارامتر پیش بینی شده مطابق خروجی مدل عددی و N تعداد سناریوی مورد بررسی می‌باشد. روابط مربوط در جدول ۴ ارائه شده است. مطابق جدول ۵ مقادیر کوچک میانگین خطای مطلق و مجذور میانگین مربعات خطا، داده‌های حاصل از مدل عددی اختلاف کمی (حداکثر ۵ درصد خطا) با مقادیر آزمایشگاهی دارد همچنین مقدار بالای ضریب تعیین حاکی از همخوانی خیلی خوب روند تغییرات هد جریان، هد کل و ضریب عبوری دبی بین مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی می‌باشد.

در مدل‌سازی اولیه با در نظر گرفتن دو مدل آشفتگی، مدل اجرا و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید، تا منطبق‌ترین نتایج نسبت به کار آزمایشگاهی، مبنای مدل‌سازی‌های بعدی در این زمینه قرار گیرد. بعد از مشخص شدن شرایط مش‌بندی مدل‌ها، برای تعیین بهترین مدل آشفتگی پنج آزمایش مورد بررسی قرار گرفت و برای ارزیابی عملکرد بهترین مدل انتقال آشفتگی از سه معیار MAE، RMSE و R^2 برای پارامتر هد جریان

- | | |
|---|------------------------|
| 5 | Mean absolute error |
| 6 | R Square |
| 7 | Root Mean Square Error |
| 8 | Observed |
| 9 | Predicted |

- | | |
|---|------------------------|
| 1 | Turbulent |
| 2 | Re-Normalisation Group |
| 3 | Large Eddy Simulation |
| 4 | Reynolds number |



شکل ۵. مقایسه تغییرات هد آب نسبت به دبی در سرریز مطابق مشخصات جدول ۱، بین داده‌های آزمایشگاهی و مدل عددی برای سناریو $Q-H_3$.

Fig. 5. Comparison of changes in water head relative to discharge in the weir according to the specifications of Table 1 between the laboratory data and the numerical model for the $Q-H_3$ scenario.

جدول ۴. معیارهای استفاده شده در ارزیابی نتایج مدل عددی نمونه‌ی آزمایشگاهی.

Table 4. The criteria used in evaluating the results of the numerical model of the laboratory sample.

پارامتر	رابطه
MAE	$\frac{\sum O - P }{N}$
RMSE	$\sqrt{\frac{\sum (O - P)^2}{N}}$
R^2	$1 - \frac{ O - P ^2}{O^2 - \frac{\sum P^2}{N}}$

بوده و نتایج تحلیل این جریان توسط نرم افزار، قابل استناد است. در ادامه نتایج شبیه‌سازی جریان بر روی سرریز کلید پیانویی ارائه و تحلیل خواهد شد.

میان مدل عددی و آزمایشگاهی، استفاده گردید. بدین ترتیب براساس نتایج بدست آمده می‌توان نتیجه‌گیری کرد که نرم‌افزار FLOW_3D با دقت مناسبی قادر به شبیه‌سازی جریان سه‌بعدی بر روی سرریزهای کلید پیانویی

جدول ۵. مقادیر آمارهای مختلف به منظور مقایسه‌ی نتایج مدل عددی با داده‌های آزمایشگاهی.

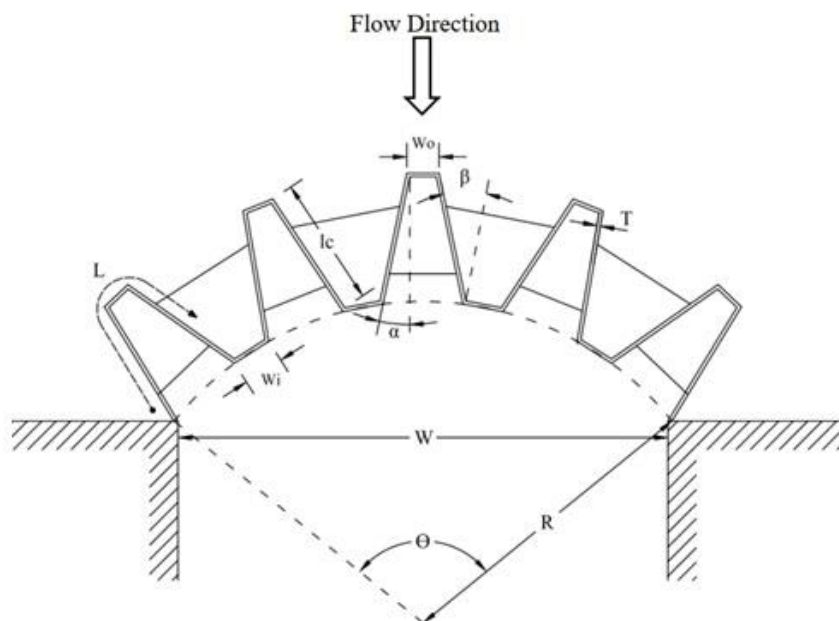
Table 5. The values of different statistics in order to compare the results of the numerical model with the laboratory data.

R2	MAE	RSME	عددی (RNG)			
			H	Q	Ht	Cd
۰/۹۷۳۰	۰/۰۰۴۶	۰/۰۰۵۱	۰/۰۶۴۰	۰/۰۴۳۳	۰/۰۴۷۸	۰/۳۵۲۷
			Ht	۰/۱۰۰۰	۰/۰۶۵۴	۰/۰۷۴۵
۰/۹۸۱۲	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۱۹	۰/۱۴۲۰	۰/۰۹۶۲	۰/۱۰۹۸	۰/۲۲۴۹
			Cd	۰/۱۶۶۰	۰/۱۱۰۰	۰/۱۲۸۶
۰/۹۸۳۸	۰/۰۰۷۵	۰/۰۰۸۰	۰/۲۰۱۰	۰/۱۳۴۰	۰/۱۵۸۰	۰/۱۸۸۰

R2	MAE	RSME	عددی (LES)			
			H	Q	Ht	Cd
۰/۹۵۶۹	۰/۰۰۶۷	۰/۰۰۷۸	۰/۰۶۴۰	۰/۰۴۱۶	۰/۰۴۵۵	۰/۳۷۹۹
			Ht	۰/۱۰۰۰	۰/۰۶۵۱	۰/۰۷۳۲
۰/۹۷۶۰	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۲۰	۰/۱۴۲۰	۰/۰۹۵۹	۰/۱۰۸۷	۰/۲۲۸۴
			Cd	۰/۱۶۶۰	۰/۱۰۸۰	۰/۱۲۶۴
۰/۹۷۴۹	۰/۰۰۶۵	۰/۰۰۹۱	۰/۲۰۱۰	۰/۱۲۸۰	۰/۱۵۰۹	۰/۱۹۷۹

پهنای سرریز در مدل‌های ارائه شده ضروری است همچنین باید توجه داشت افزایش بیش از حد طول سرریز ممکن است از نظر اقتصادی به صرفه نباشد. لذا می‌توان نتیجه گرفت در بین مدل‌های سرریز ارائه شده توسط هر محقق (با فرض ثابت بودن تمامی پارامترهای هندسی برای همه‌ی مدل‌ها) سرریزی برتر است که بتواند بیشترین دبی را در کمترین هد جریان و در کمترین طول سرریز ممکن از خود عبور دهد. به طور کلی اگر یک تابع چند متغیره مانند $u(X, Y, Z)$ داشته باشیم که به متغیرهای X, Y, Z وابسته باشد، اگر در نقطه‌ی خاصی مانند (X_0, Y_0, Z_0) بخواهیم تغییرات تابع را بررسی کنیم، بر طبق ریاضیات از گرادینان به گونه‌ای استفاده می‌شود که اولین ترم تغییرات u را فقط نسبت به X ، دومین ترم تغییرات نسبت به Y و سومین ترم تغییرات را نسبت به Z در نظر می‌گیرد. با داشتن تغییرات در سه جهت می‌توان خود تابع را تعیین نمود. مطابق آنچه که گفته شد، بدیهی است که در مقام مقایسه‌ی تاثیر یک پارامتر هندسی در مدل‌های مختلف لازم است

۳-۳- شبیه‌سازی‌های جدید بروی سرریز کلیدیپانویی
 به منظور افزایش کارایی سرریزها، همانطور که در تحقیقات گذشته اشاره شد، راهکارهای گوناگونی وجود دارد که سه مورد از مهم‌ترین این راهکارها عبارتند از:
 افزایش پهنای سرریز (W): به دلیل محدودیتی که از نظر فضا وجود دارد در بیشتر موارد قابل استفاده نیست.
 کاهش رقوم تاج سرریز (P): این اقدام باعث کاهش ظرفیت مخزن سد شده بنابراین با اهداف ساخت مخازن بزرگ‌تر سازگار نمی‌باشد.
 افزایش طول تاج سرریز (L): در یک پهنای مشخص و سطح استقرار ثابت تکیه‌گاه با جایگزین کردن سرریزهای خطی با گونه‌های غیرخطی قابل اجرا هستند همچون سرریزهای کنگره‌ای و کلیدیپانویی.
 با توجه به موارد ذکر شده در بالا به نظر می‌آید جهت بررسی پارامترهای هندسی موثر بر عملکرد هیدرولیکی سرریزها، اقدام به ثابت نگه داشتن



شکل ۶. پارامترهای هندسی سرریز کلید پیانویی انحنادار در پلان.

Fig. 6. Geometrical parameters of arced trapezoidal piano key weir (ATPKW) in plan.

در این قسمت با تغییر پارامترهای تعداد سیکل و زاویه سرریز، رفتار هیدرولیکی این نوع سرریز مورد مطالعه قرار گرفته است. سرریزها برای چهار زاویه مرکزی ۴۵، ۹۰، ۱۳۵ و ۱۸۰ درجه و تعداد سیکل ۲، ۳ و ۴ مدل سازی شده‌اند. لازم به ذکر است یکی از نقاط قوت و وجه تمایز تحقیق حاضر با سایر پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه، ثابت نگه داشتن تمامی پارامترهای موثر از جمله طول کلی سرریز (L) در تمامی مدل‌ها می‌باشد همچنین در تمامی مدل‌ها عرض سرریز (W) و ارتفاع تاج (P) ثابت هستند. از آنجا که هدف از تحقیق اثر تغییرات هم‌زمان تعداد سیکل و زاویه سرریز می‌باشد لذا مقایسه‌ی صحیح زمانی انجام می‌شود که اثر سایر پارامترهای موثر حذف شود. در ادامه‌ی پژوهش نتایج سرریز کلید پیانویی انحنادار با مدل‌های خطی آن که توسط اندرسون مورد تحقیق قرار گرفته است مقایسه گردیده است. در جدول ۷ مدل‌های مختلف و مقادیر پارامترهای هندسی آن‌ها ارائه شده است. شکل ۷ نمای سه‌بعدی سرریزها را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است مخزن بالادست سرریزها به اندازه‌ی بزرگ در نظر گرفته شده است که مرزهای میدان تحت تاثیر جریان‌های نزدیک شونده به سرریز قرار نگیرند.

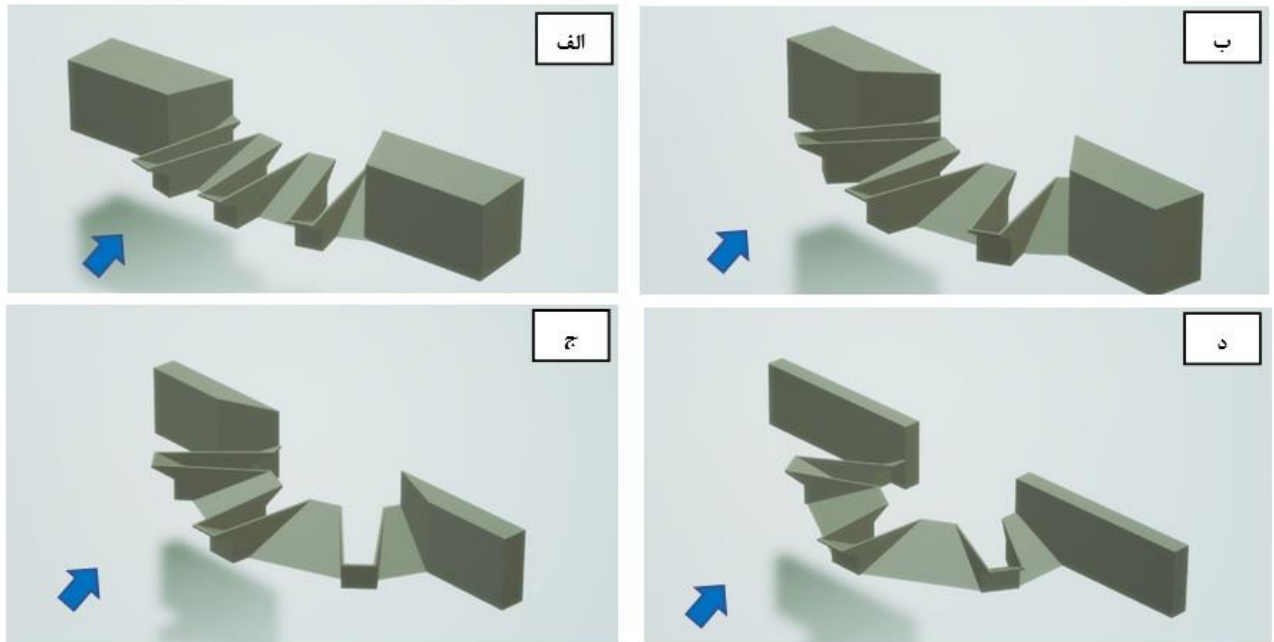
سایر پارامترها برای تمامی مدل‌ها ثابت در نظر گرفته شود به طور مثال اگر قرار است تاثیر پارامتر عرض کانال برای مقادیر مختلف و برای مدل‌های مختلف مورد بررسی قرار گیرد، برای درک بهتر تاثیر تغییرات پارامتر مذکور بهتر است سایر پارامترها از جمله ارتفاع سرریز، طول سرریز و ... در تمامی مدل‌ها ثابت در نظر گرفته شود در غیر اینصورت نمی‌توان با قطعیت در مورد تاثیرات تغییر آن پارامتر نظر داد. پس از مطالعه‌ی پایان‌نامه‌ها و مقالات متعدد که هدف آن‌ها بررسی پارامترهای هندسی سرریز کلید پیانویی بود مشاهده شد که اکثر محققین نکات مطرح شده‌ی فوق را مد نظر قرار نداده و عملاً مقایسه‌ی برابری بین مدل‌های خود ایجاد نکرده‌اند که این امر می‌تواند روند تکاملی دستیابی به بهترین روش طراحی سرریزهای کلید پیانویی را دچار مشکل سازد.

با قرارگیری سرریز کلید پیانویی بر روی مسیر انحنادار، الزاماً کلیدها به صورت دوزنقه‌ای تغییر شکل می‌دهند [۷]. در شکل ۶ هندسه عمومی سرریز کلید پیانویی با پلان انحنادار نشان داده شده است همچنین جدول ۶ نشان دهنده‌ی پارامترهای مورد استفاده در شکل ۶ می‌باشد.

جدول ۶. پارامترهای مورد استفاده در هندسه‌ی سرریز.

Table 6. Parameters used in weir geometry.

توضیحات	نشان پارامتر
زاویه سرریز	θ
شعاع انحنا	R
زاویه کلید خروجی	α
زاویه کلید ورودی	β
عرض سرریز	W
عرض کلید ورودی	Wi
عرض کلید خروجی	Wo
طول کنسول کلید ورودی	Bi
طول کنسول کلید خروجی	Bo
طول تاج کناری	le
طول تاج سرریز	L
ضخامت دیواره سرریز	T
تعداد سیکل	N



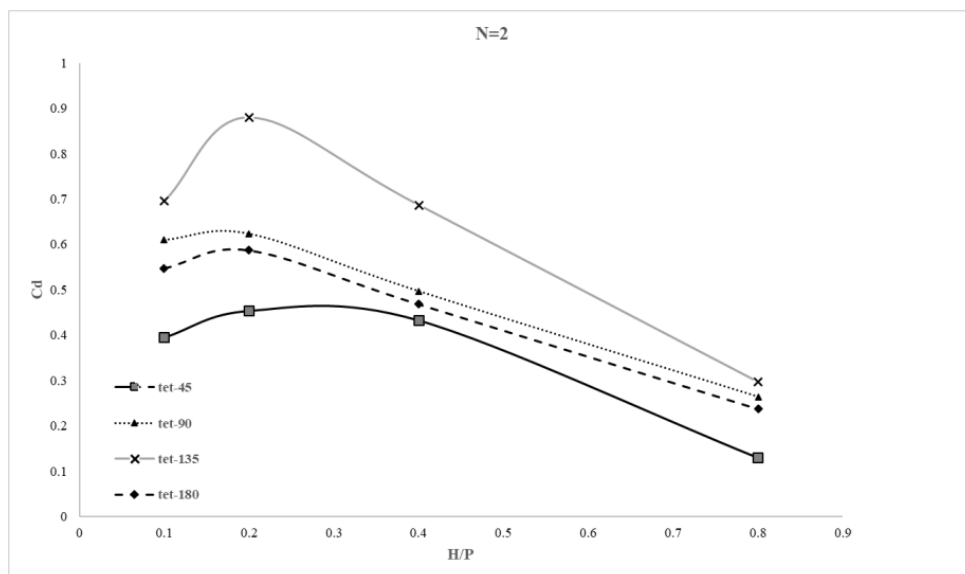
شکل ۷. نمای سه‌بعدی سرریزهای کلید پیاپی سه سیکل انحنا دار در پلان الف) زاویه ۴۵ درجه ب) زاویه ۹۰ درجه ج) زاویه ۱۳۵ درجه و د) زاویه ۱۸۰ درجه.

Fig. 7. Three-dimensional view ATPKWs with three cycles in plan a) 45 degrees b) 90 degrees c) 135 degrees and d) 180 degrees.

جدول ۷. پارامترهای هندسی سرریز کلید پیاپویی انحنادار در پلان.

Table 7. Geometrical parameters ATPKWs.

نسبت طول تاج به عرض سرریز	فضامت دیواره سرریز (m)	طول کنسول خروجی (m)	طول کنسول ورودی (m)	نسبت طول کنسول ورودی به طول تاج کناری	زاویه کلید ورودی (m)	زاویه کلید خروجی (degree)	شیب کف کلید خروجی (m)	شیب کف کلید ورودی (m)	نسبت عرض کلید ورودی به کلید خروجی	عرض کلید خروجی (m)	عرض کلید ورودی (m)	طول تاج کناری (m)	عرض سرریز (m)	طول تاج (m)	ارتفاع تاج (m)	تعداد سیگل ها	زاویه سرریز (degree)	کد مدل
L/W	T	Bo	Bi	Bi/lc	β	α	So	Si	Wi/Wo	Wo	Wi	lc	W	L	P	N	0	
۰/۵	۰/۱۲۷	۰/۱۲۱۴	۰/۱۲۱۴	۰/۱۲۰۲	۱۴	۱۱	۵۵/۵۶٪	۵۵/۵۶٪	۱	۰/۲۰	۰/۲۰	۱/۰۱	۰/۳۲۰	۴/۴۴۴	۶/۶۱/۰	۲	۴۵	ATPK-45-2
				۰/۱۸۱۱	۱۷	۱۷				۰/۱۳	۰/۱۳	۰/۶۷				۳		ATPK-45-3
				۰/۲۳۸۰	۲	۸				۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۵۱				۴		ATPK-45-4
				۰/۱۲۶۴	۲۵	۲۰				۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۹۶				۲	۹۰	ATPK-90-2
				۰/۱۸۹۶	۳	۳				۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۶۴				۳		ATPK-90-3
				۰/۲۵۲۹	۱۴	۹				۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۴۸				۴		ATPK-90-4
				۰/۱۲۹۴	۳۷	۳۱				۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۹۴				۲	۱۳۵	ATPK-135-2
				۰/۱۸۹۹	۳	۳				۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۶۴				۳		ATPK-135-3
				۰/۲۵۱۸	۲۰	۱۴				۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۴۸				۴		ATPK-135-4
				۰/۱۳۷۹	۵۰	۴۰				۰/۳۰	۰/۳۰	۰/۸۸				۲	۱۸۰	ATPK-180-2
				۰/۲۰۷۱	۴	۵				۰/۲۰	۰/۲۰	۰/۵۸				۳		ATPK-180-3
				۰/۲۷۴۰	۲۷	۱۸				۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۴۴				۴		ATPK-180-4



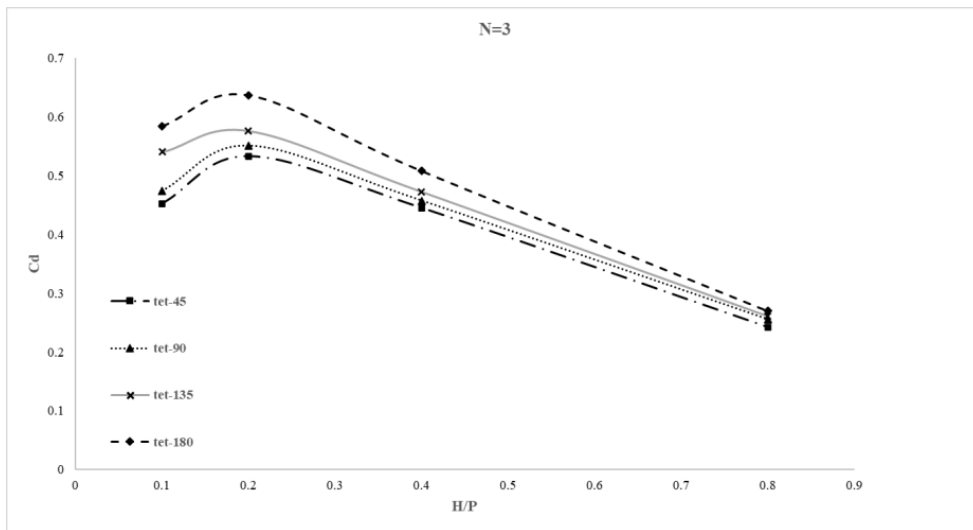
شکل ۸. مقایسه ضریب آبگذری سرریزهای با ۲ سیکل نسبت به H/P.

Fig. 8. Comparison of discharge coefficient of weirs with 2 cycles and the same weir crest length

۴- نتایج و بحث

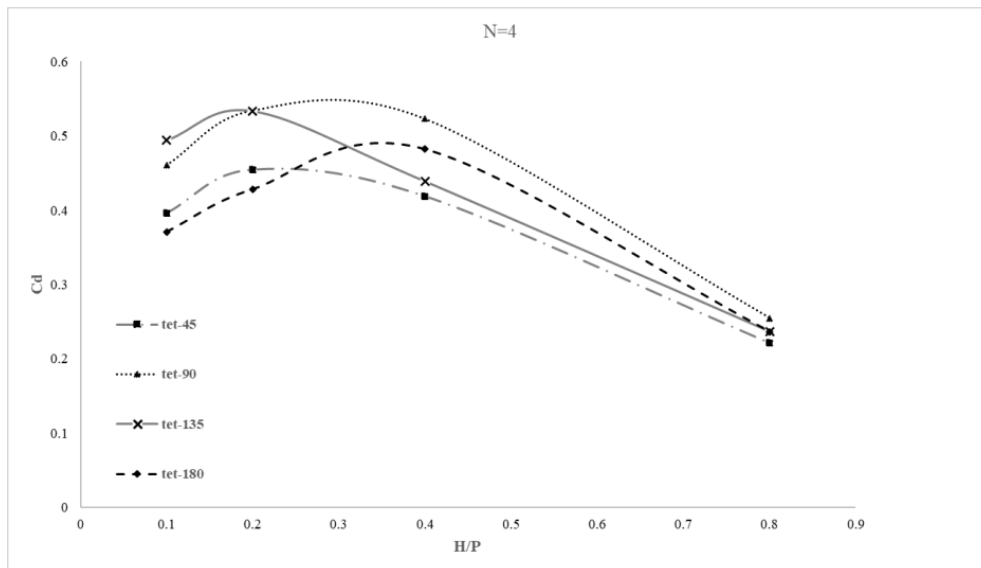
در پلان سرریز نسبت به سرریز کلید پیانویی خطی (مدل‌های اندرسون) باعث بهبود عملکرد هیدرولیکی سرریز شده است به نحوی که تاثیر انحنا، برای هددهای پایین زیاد بوده و در هددهای بالا تفاوت قابل توجهی بین ضریب آبگذری سرریزهای انحنا دار و خطی وجود ندارد. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، افزایش زاویه‌ی سیکل سرریز تا حدی موجب افزایش ضریب عبوری جریان می‌شود (با توجه به منحنی ۱۳۵ درجه و ۴۵ درجه) اما با بیشتر شدن زاویه‌ی سیکل سرریز ضریب عبوری جریان کاهش می‌یابد (با توجه به منحنی ۱۸۰ درجه). با افزایش زاویه‌ی سرریز، در سیکل ثابت، مساحت کلید ورودی افزایش یافته و اثر کلی افت هد مربوط به ورود جریان به کلید ورودی کاهش یافته و در پی آن ظرفیت تخلیه‌ی جریان در کلید ورودی افزایش می‌یابد در عین حال باید توجه داشت که با بیشتر شدن زاویه‌ی سرریز از یک حد مشخص، به علت برخورد جریان‌های ریزشی از طرفین کلید ورودی و جریان عبوری از کلید خروجی و افزایش هد جریان در کلید خروجی، توانایی کلید خروجی در جمع‌آوری جریان‌های عبوری از کلید ورودی کاهش می‌یابد. مطالب بیان شده حاکی از وجود رابطه‌ای پیچیده بین زاویه سرریز و نحوه‌ی رفتار جریان عبوری از کلیدهای ورودی و خروجی می‌باشد. با توجه به شکل ۸، بیشترین اثر انحنا تاج برای نسبت هد کل به ارتفاع ۰/۲ است به گونه‌ای که ضریب آبگذری از مقدار ۰/۴۲ به مقدار ۰/۸۷ افزایش یافته است.

در قسمت‌های قبل، جریان بر روی سرریزهای کلید پیانویی ساده (مطابق مدل آزمایشگاهی اندرسون) مدل‌سازی عددی گردید و پس از بررسی جنبه‌های مختلف آن، مشخص گردید که بهترین روش به منظور افزایش ضریب عبوری جریان سرریز، تبدیل کلیدها از مستطیلی به دوزنقه بوده که این حالت با انحنا دار کردن پلان قرارگیری کلیدها پدیدار می‌شود. در ادامه به مدل‌سازی عددی جریان بر روی سرریز کلید پیانویی با انحنا در پلان پرداخته شده و هیدرودینامیک سرریز مذکور مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۸ بیانگر تغییرات ضریب دبی به نسبت هد کل به ارتفاع سرریزهای کلید پیانویی انحنا دار در پلان برای زوایای مختلف مجموعه سرریز به ازای تعداد سیکل دو می‌باشد و اشکال ۹ و ۱۰ هم به همین ترتیب برای تعداد سه و چهار سیکل می‌باشد. در تمامی سرریزها طول تاج برابر است. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، سرریز با زاویه ۱۳۵ درجه و دو سیکل عملکرد بهتری نسبت به سایر سرریزها دارد به گونه‌ای که مقدار ضریب عبوردهی جریان برای این سرریز برابر ۰/۸۷ می‌باشد از طرفی با افزایش زاویه‌ی سرریز در یک سیکل ثابت روند تغییرات ضریب عبوردهی جریان تا زاویه‌ی ۱۳۵ درجه صعودی بوده و از آن به بعد روند نزولی دارد، همچنین از شکل ۸ می‌توان دریافت که بیشترین ضریب عبوردهی جریان در نسبت هد کل به ارتفاع سرریز برابر ۰/۲ رخ می‌دهد. با توجه به شکل ۱۱، ایجاد انحنا



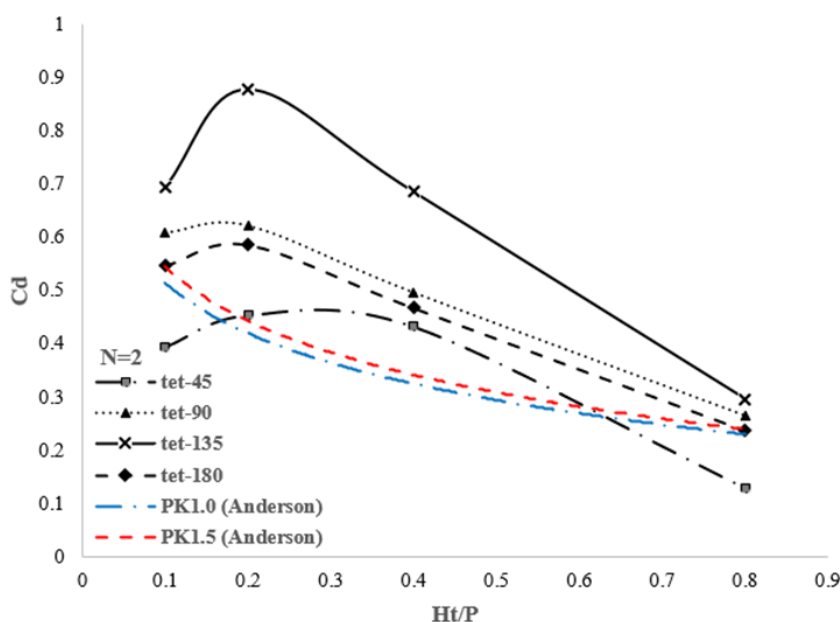
شکل ۹. مقایسه ضریب آبگذری سرریزهای با ۳ سیکل نسبت به H/P .

Fig. 9. Comparison of discharge coefficient of weirs with 3 cycles and the same weir crest length.



شکل ۱۰. مقایسه ضریب آبگذری سرریزهای با ۴ سیکل نسبت به H/P .

Fig. 10. Comparison of the water passage coefficient of weirs with 4 cycles and the same weir crest length.



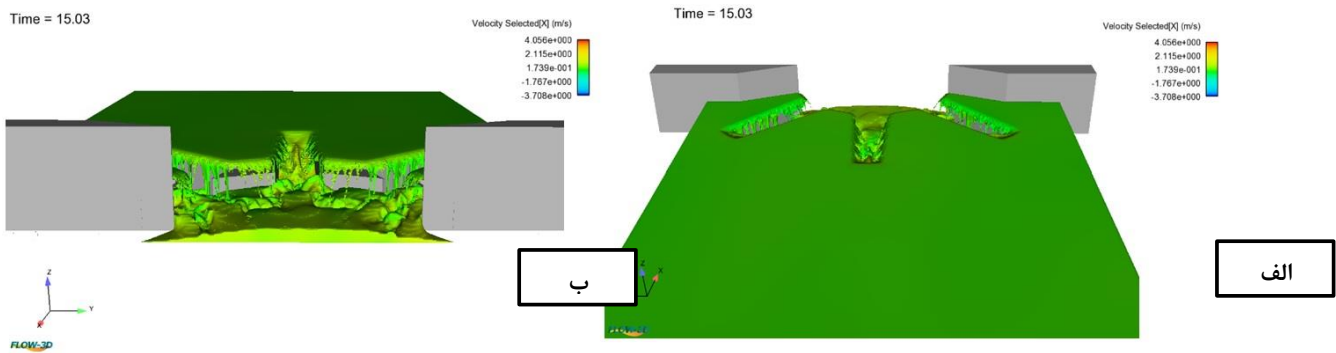
شکل ۱۱. مقایسه ضریب آبگذری سرریزهای موضوع تحقیق حاضر و نمونه سرریزهای کلید پیانویی خطی اندرسون.

Fig. 11. Comparison of discharge coefficient of the weirs of the present research and the samples of Anderson's linear PKWs.

نحوی طول موثر سرریز را کاهش داده و موجب کاهش عملکرد هیدرولیکی سرریز همچنین کاهش ضریب عبور جریان نیز می‌گردد. شکل ۱۴ به خوبی نحوه‌ی افزایش استغراق موضعی کلید خروجی متناسب با افزایش هد جریان نشان می‌دهد. پارامتر نشان‌دهنده‌ی پیشرفت استغراق موضعی در شکل مذکور، شکستگی جریان^۱ نام دارد که به اختصار با F نشان داده می‌شود. تکنیک حجم مایع^۲ (VOF) بر اساس این ایده است که در هر سلول شبکه، بخش کسری از حجم سلول که توسط مایع اشغال شده است، ثبت شود. از آنجا که حجم کسری است، F باید مقداری بین ۰ و ۱ داشته باشد. در مناطق داخلی مایع، مقدار F برابر ۱ خواهد بود، در حالی که در خارج از مایع، در مناطق گاز (به عنوان مثال هوا)، مقدار F صفر است. همانطور که قبلاً اشاره شد، استغراق موضعی زمانی رخ می‌دهد که جریان عبوری از کلید خروجی با جریان‌های عبوری از تاج کناری کلیدها برخورد می‌کند.

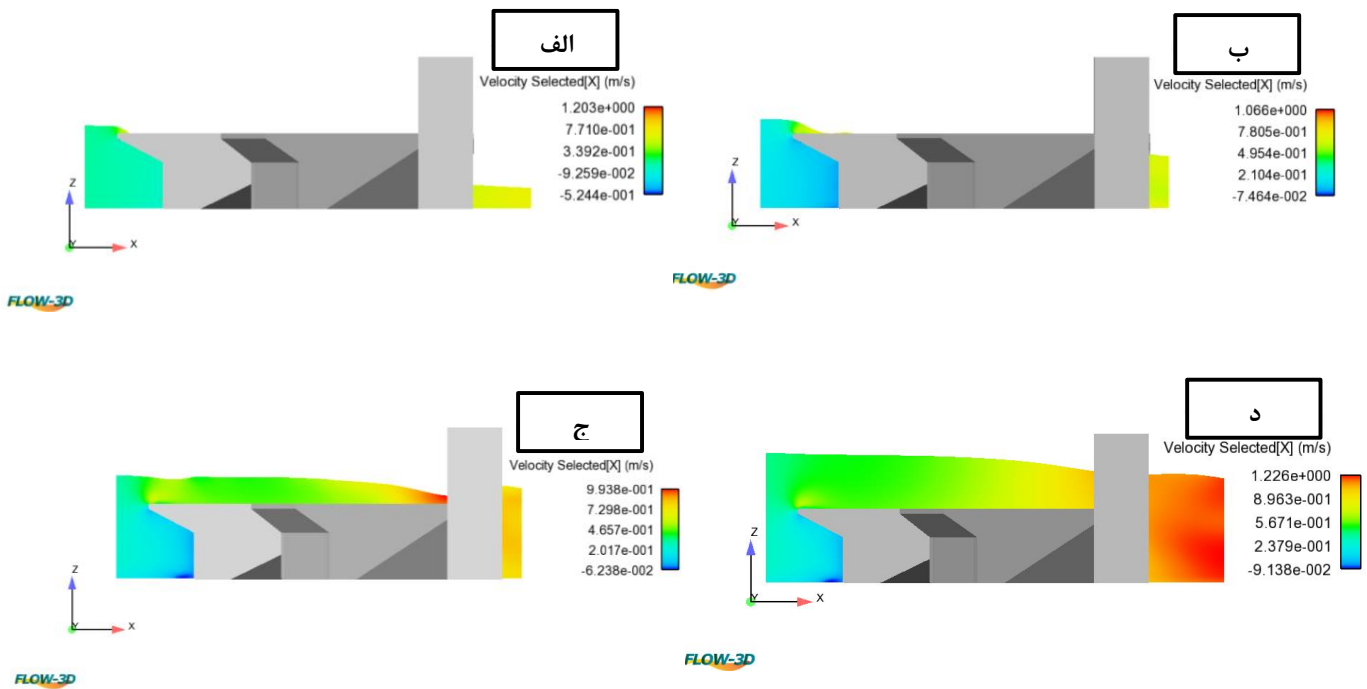
اشکال ۱۲ الی ۱۴ نشان دهنده‌ی الگوی سه بعدی جریان از زوایای مختلف بر روی سرریز 3-ATPK135 به ازای هدهای مختلف می‌باشند. در هدهای پایین، بخش عمده‌ی جریان از کلیدهای خروجی تخلیه شده و همچنین در جریان نزدیک‌شونده به سرریز، سطح آب حالت افقی داشته و افتی در آن مشاهده نمی‌شود. با افزایش هد آب بر روی سرریز، کلیدهای خروجی مستغرق شده و همانطور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، با افزایش حجم جریان عبوری از روی کلیدهای کناری، سرعت جریان نیز افزایش یافته و جریان ریزشی در ترازهای بالاتر به هم برخورد می‌کنند. نتیجه‌ی برخورد جریان‌های ریزشی طرفین، بالازدگی سطح آب در لایه‌های فوقانی داخل کلیدهای خروجی و شکل‌گیری استغراق موضعی شدید در نواحی مذکور می‌باشد. با توجه به شکل ۱۴ شکل‌گیری استغراق موضعی باعث کاهش عرض عبوری جریان در کلید خروجی شده و جریان عبوری از کلید خروجی، صرفاً از طرفین تلاقی جریان‌های ریزشی در داخل کلید خروجی عبور می‌کنند. لازم به ذکر است که پدیده‌ی استغراق موضعی به

1 Fluid Fraction
2 volume of fluid



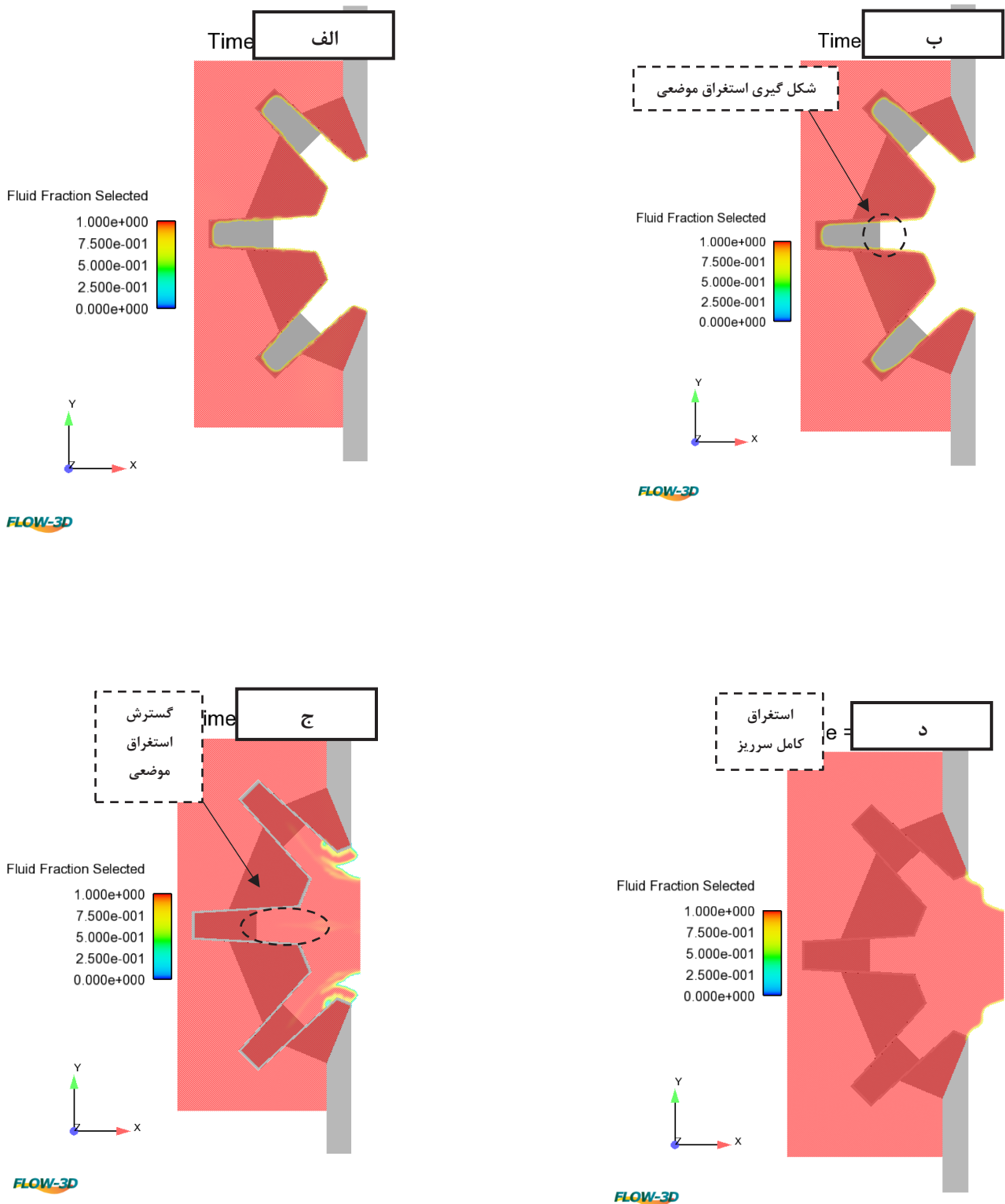
شکل ۱۲. الگوی سه‌بعدی ریزشی آزاد جریان سرریز 3-ATPK 135 در $H/P=0.1$ (الف) دید از نمای بالادست سرریز (ب) دید از نمای پایین دست سرریز.

Fig. 12. 3D pattern of free flow and view from the ATPK 135-3 weir at $H/P = 0.1$.



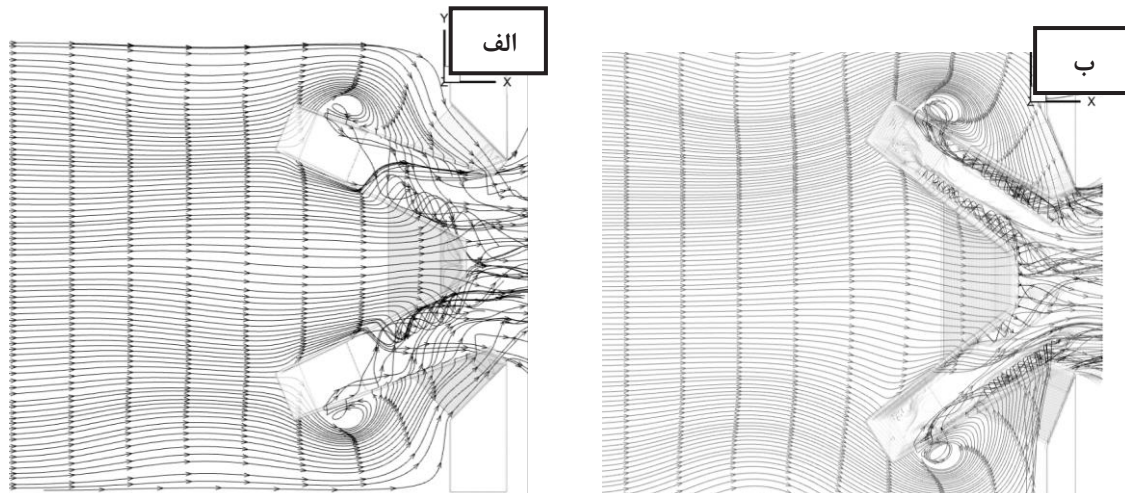
شکل ۱۳. الگوی دوبعدی جریان در صفحه‌ی $X-Z$ به ازای هدهای مختلف، (الف) $H/P = 0.1$ (ب) $H/P = 0.2$ (ج) $H/P = 0.4$ (د) $H/P = 0.8$.

Fig. 13. Two-dimensional flow pattern in the $X-Z$ plane for different heads a) $H/P=0.1$ b) $H/P=0.2$ c) $H/P=0.4$ d) $H/P=0.8$.



شکل ۱۴. نحوه‌ی افزایش استغراق موضعی کلید خروجی در سرریز ATPK 135-3 متناسب با افزایش هد جریان، الف) $H/P = 0.1$ ، ب) $H/P = 0.2$ ، ج) $H/P = 0.4$ ، د) $H/P = 0.8$.

Fig. 14. How to increase the local submergence of the outlet key in ATPK-135-3 weir according to the increase of the flow head a) $H/P=0.1$ b) $H/P=0.2$ c) $H/P=0.4$ d) $H/P = 0.8$.



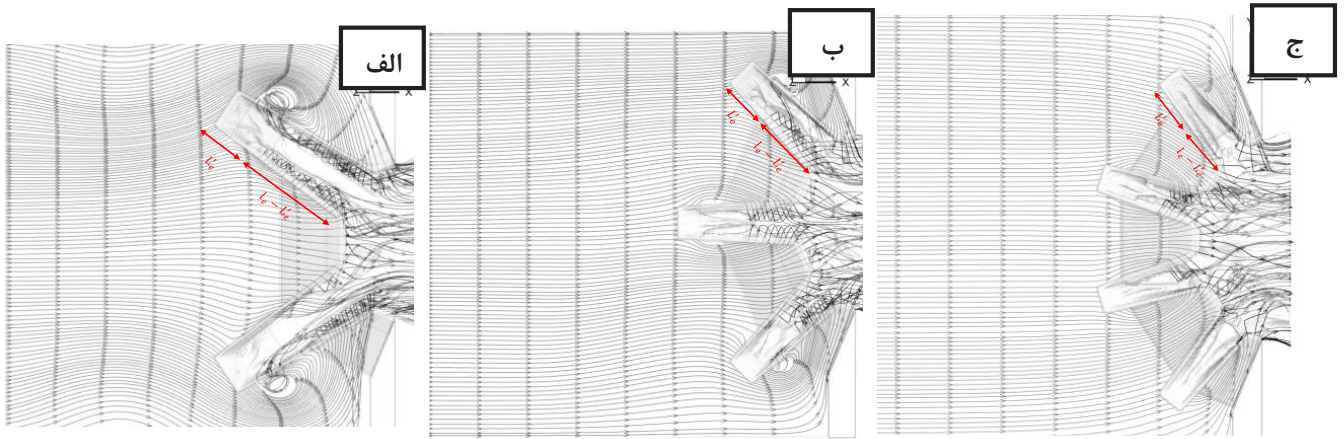
شکل ۱۵. خطوط جریان عبوری لایه‌ی تحتانی از سرریز الف) ATPK 45-2 (۴۵-۲، ب) ATPK 35-2.

Fig. 15. stream lines of the lower layer of the weir a) ATPK45-2 b) ATPK135-2.

با فشردگی بیشتر بر روی تاج‌های کناری کلیدهای ورودی شکل می‌گیرد که این مسئله موجب برخورد جریان‌های ریزشی از تاج‌های کناری شده و موجب پسزدگی جریان همچنین افزایش هد بالادست می‌گردد. شکل ۱۷ خطوط جریان نزدیک شونده لایه‌ی میانی را برای سرریزهای کلید پیاپویی با زاویه سیکل قوسی ۱۳۵ درجه و در سیکل‌های مختلف نشان می‌دهد. لایه‌های فوقانی جریان تمایل به عبور از کلید خروجی دارند اما همانطور که در شکل ۱۷ ملاحظه می‌گردد، با افزایش سیکل و مخصوصاً در سیکل‌های ۳ و ۴، خطوط جریان از ظرفیت کلید خروجی استفاده می‌نمایند در حالی که در سیکل ۲، با توجه به مساحت آبرگیری بیشتر کلید ورودی، خطوط جریان به خوبی از ظرفیت تاج‌های کناری کلید ورودی استفاده کرده و ظرفیت کلید خروجی را برای جریان‌های لایه‌های بالاتر نگه می‌دارد. شکل ۱۸ توزیع سرعت جریان (در لایه‌ی فوقانی جریان و در زیر تاج) در کلید ورودی برای سرریز با زاویه ۱۳۵ درجه و به ازای $H/P = 0.4$ را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌گردد، در سیکل دوم، توزیع سرعت به صورت یکنواخت‌تر بوده به گونه‌ای که خطوط جریان تقریباً به طور عمود از تاج کناری عبوری می‌نمایند و به خوبی از تمامی ظرفیت تاج کناری استفاده می‌گردد همچنین دلیل اصلی توزیع یکنواخت‌تر سرعت در سیکل دوم، افزایش سطح آبرگیر کلید ورودی در سیکل دوم بوده که این پدیده موجب کاهش اینرسی جریان در امتداد کلید ورودی و ایجاد شرایط بهتر تخلیه جریان در تاج‌های کناری می‌شود.

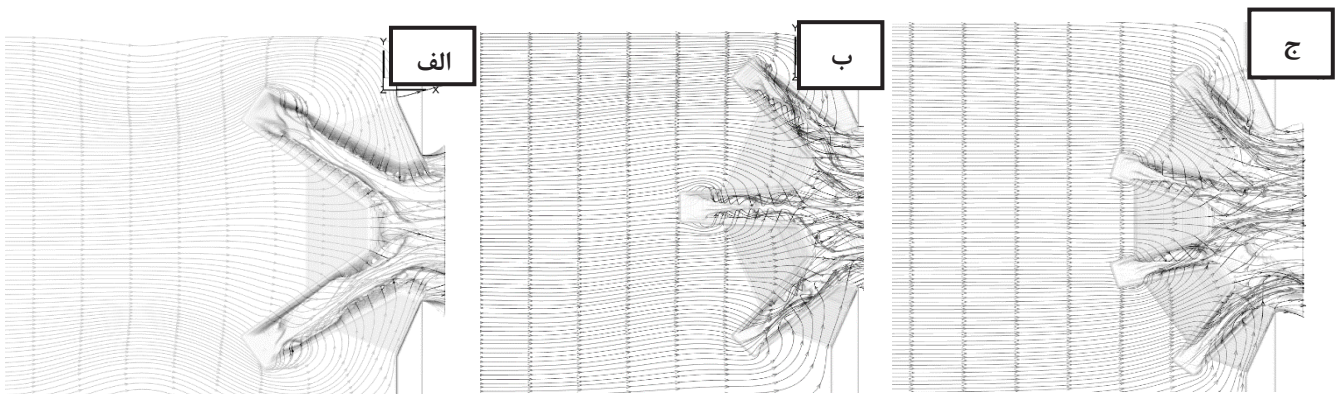
شکل ۱۵ نشان‌دهنده‌ی خطوط جریان در ترازهای تحتانی و میانی سرریزهای ATPK45-2 و ATPK135-2 می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود، در سرریزهای مذکور جریان‌های تحتانی پس از رسیدن به کلید ورودی به صورت یکنواخت بر روی تاج‌های کناری و ورودی توزیع شده که البته توزیع جریان بهتری برای سرریز ATPK135-2 قابل مشاهده می‌باشد. در خصوص جریان‌های نزدیک شونده به کلیدهای کناری برای سرریزهای مذکور، همانطور که مشاهده می‌شود جریان با توزیع بسیاری مناسبی از کلید ورودی عبور می‌نماید اما بعضی از خطوط جریان نزدیک شونده به کلید مرکزی، به سمت کلیدهای کناری کشیده شده و به سمت لایه‌های فوقانی تغییر مسیر می‌دهند و سپس از تاج کناری کلیدهای طرفین سرریز عبور می‌کنند. در این نواحی سرعت جریان کم شده و جریان دچار چرخش مجدد می‌شود. یکی از دلایل این امر کناره‌های زاویه دار پایه‌های سرریز و فاصله‌ی ایجاد شده میان سطح شیب‌دار و محل انتقال جریان از مخزن به کلید ورودی می‌باشد. ایجاد ناحیه‌ی چرخش مجدد در کلید ورودی، موجب کاهش عرض موثر عبوری جریان در کلید ورودی می‌گردد. شکل ۱۶ خطوط جریان لایه‌ی تحتانی را برای سرریزهای کلید پیاپویی با زاویه سیکل قوسی ۱۳۵ درجه و در سیکل‌های مختلف نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌گردد، با افزایش تعداد سیکل (در یک زاویه و طول سرریز ثابت)، خطوط جریان در کلید ورودی منقبض‌تر شده و توزیع خطوط جریان

1 Recirculation zone



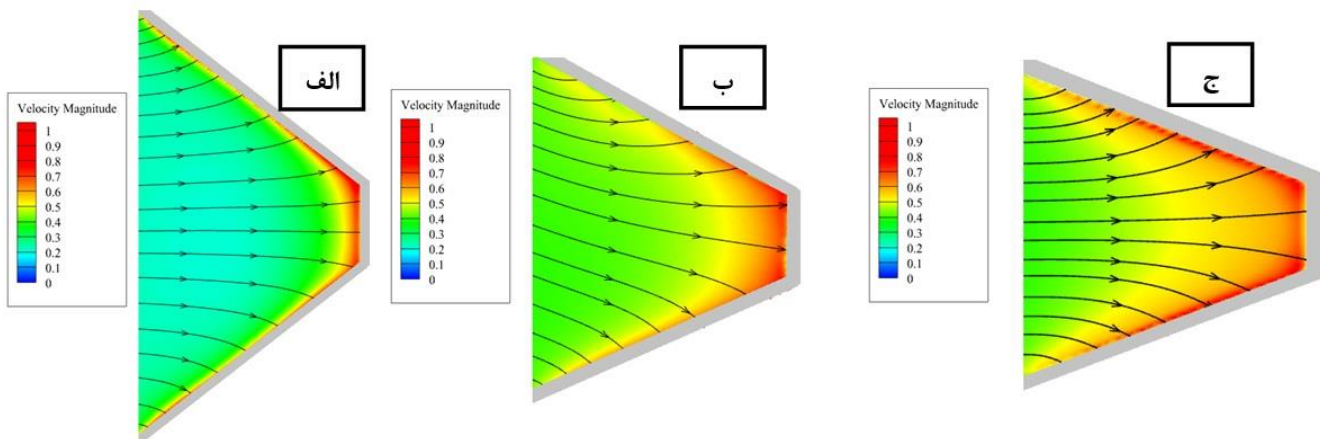
شکل ۱۶. خطوط جریان عبوری لایه‌ی تحتانی در سرریزهای کلید بیانویی با زاویه ۱۳۵ درجه و تعداد سیکل‌های الف) دو، ب) سه، ج) چهار.

Fig. 16. stream lines of the lower layer in the overflows of the ATPKW with an angle of 135 degrees and the number of cycles a) two b) three c) four.



شکل ۱۷. خطوط جریان عبوری لایه‌ی میانی در سرریزهای کلید بیانویی با زاویه ۱۳۵ درجه و تعداد سیکل‌های مختلف الف) ۲ سیکل، ب) ۳ سیکل، ج) ۴ سیکل.

Fig. 17. The stream lines of the middle layer in the overflows of the ATPKW with an angle of 135 degrees and the number of cycles a) two b) three c) four.

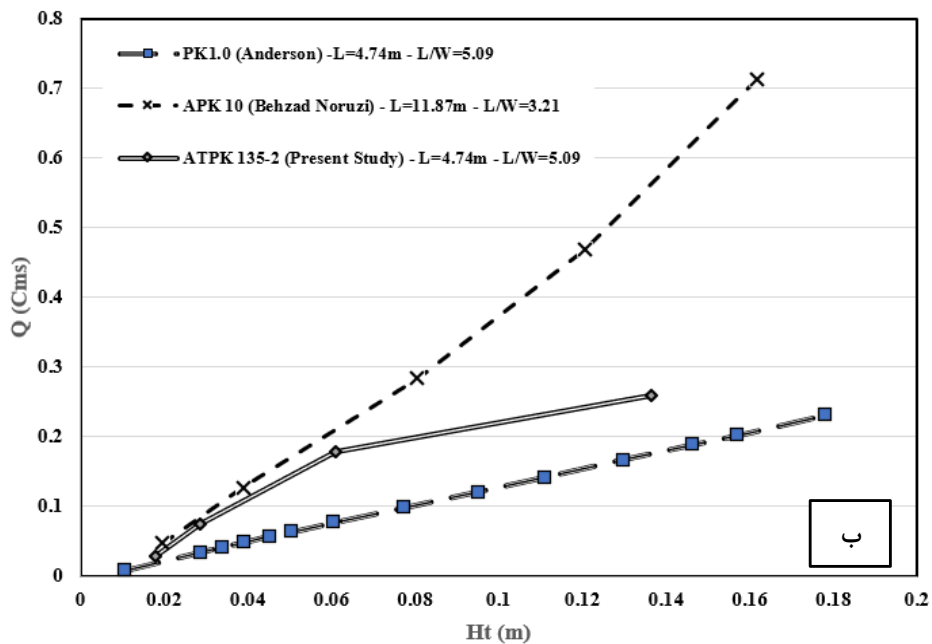
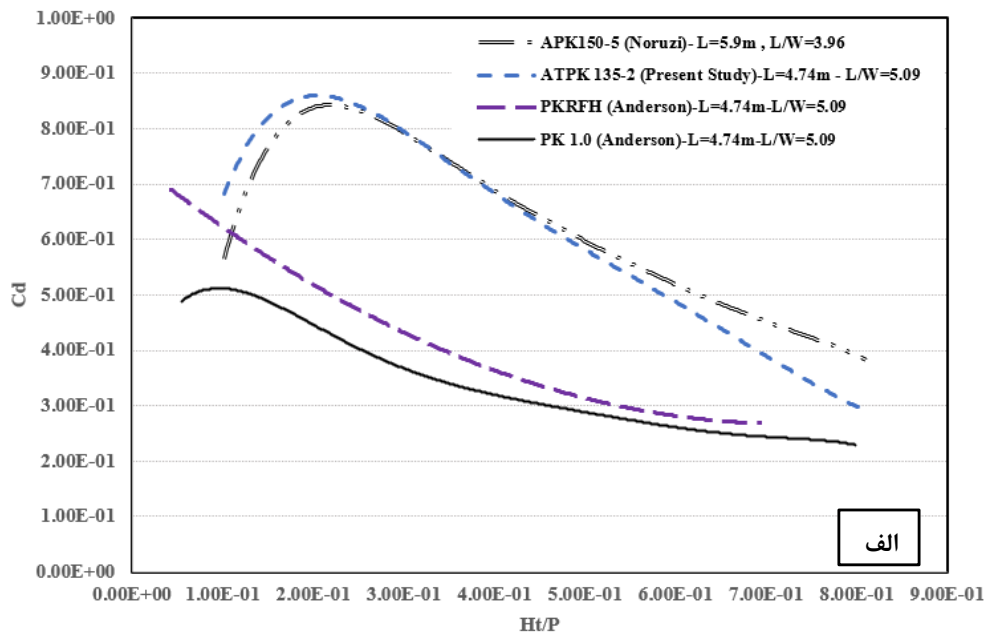


شکل ۱۸. توزیع سرعت جریان لایه‌ی فوقانی (زیر تاج) در کلید ورودی به ازای $H/P = 0.4$ برای سرریز با زاویه ۱۳۵ درجه الف) تعداد سیکل دو (ب) تعداد سیکل سه ج) تعداد سیکل چهار.

Fig. 18. Distribution of the flow velocity of the upper layer (under the crown) in the inlet key for $H/P = 0.4$ for the overflow with an angle of 135 degrees a) Two cycles b) three cycles c) four cycles.

همانطور که در منحنی دبی-اشل مشاهده می‌شود، برای سرریز APK10 نوروژی (که شامل ۱۰ سیکل بوده و طول کلی سرریز برابر ۱۱/۸۷ متر می‌باشد و عملاً دارای برتری ابعادی نسبت به سایر سرریزها در نمودار مذکور است) دبی عبوری از روی سرریز افزایش یافته و همچنین برای هدهای بالاتر نیز این روند کاملاً صعودی بوده و شدت حجمی جریان عبوری از روی سرریز با شیب تندتری افزایش می‌یابد. برای سرریز ATPK135-2 نیز دبی عبوری از روی سرریز صعودی می‌باشد اما در هدهای بالاتر نیز شدت حجمی جریان عبوری از روی سرریز با شیب کندتری ادامه می‌یابد اما برای سرریز PK1.0 اندرسون با افزایش هد جریان شدت حجمی جریان عبوری نسبت به سایر سرریز کمتر بوده اما با نرخ ثابتی ادامه می‌یابد. از نمودار دبی-اشل سرریزهای مذکور می‌توان دریافت که، افزایش شیب شدت حجمی جریان عبوری از روی سرریز بیانگر افزایش ناحیه استغراق موضعی در کلیدهای خروجی سرریز بوده و موجب کاهش راندمان هیدرولیکی سرریز می‌شود و عملاً هرچه شیب شدت حجمی جریان عبوری از روی سرریز بیشتر باشد، سرریز عملکرد خود را زودتر از دست می‌دهد. یکی از اهداف طراحی سرریزها، باید دستیابی به بهترین نتیجه با صرف کمترین هزینه باشد که مشخص گردید پدیده‌ی استغراق موضعی می‌تواند این اصل را در طراحی‌ها دچار مشکل کرده و هزینه‌های مضاعفی را به سازنده و طراح تحمیل کند.

شکل ۱۹ نشان‌دهنده‌ی تغییرات ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی مورد تحقیق بهزاد نوروژی، توماس اندرسون، تحقیق حاضر و سرریز PK1.0 (که به صورت خطی می‌باشد) در مقابل هد کل به ارتفاع سرریز و منحنی دبی-اشل می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌گردد، سرریز ATPK135-2 و سرریز APK150-5 دارای ضریب آبگذری بیشتر نسبت به سرریزهای کلید پیانویی خطی آزمایش شده توسط اندرسون بوده و این در حالتی است که طول کل سرریز ATPK135-2 برابر ۴/۷ متر، سرریز APK150-5 برابر ۵/۹ متر، سرریز PKRFH برابر ۴/۷ متر و سرریز PK1.0 برابر ۴/۷ متر می‌باشد. لازم به ذکر است سایر پارامترهای هندسی از جمله ارتفاع تاج (P)، ضخامت دیواره (T) و عرض دهانه‌ی ساختگاه سرریز (W) ... برای تمامی سرریزهای مذکور به جز سرریز APK150-5 ارائه شده توسط نوروژی برابر است. برای سرریز APK150-5 عرض ساختگاه سرریز (W) برابر ۱/۴۹ متر و برای سایر سرریزهای مذکور برابر ۰/۹۳ متر می‌باشد. آنچه که از مطالب بیان شده در خصوص سرریزهای مورد مقایسه حاصل می‌گردد این است که، سرریز APK150-5 از نظر هندسی دارای برتری نسبت به سایر سرریزها بوده و انتظار می‌رود عملکرد هیدرولیکی بهتری را داشته باشد که البته اینگونه نیست. سرریز ATPK135-2 با حداقل طول کل سرریز توانسته است ضریب آبگذری بیشتری نسبت به سرریز APK150-5 کسب کند که این امر نشان‌دهنده‌ی اهمیت اثرات استغراق موضعی شکل گرفته در کلید خروجی برای سرریزهای کلید پیانویی است.



شکل ۱۹. الف) تغییرات ضریب دبی سرریزهای کلید بیانویی مورد تحقیق بهزاد نوروزی، توماس اندرسون، تحقیق حاضر و سرریز PK1.0 (که به صورت خطی می‌باشد) در مقابل هد کل به ارتفاع سرریز، ب) منحنی اشل-دبی سرریزهای موضوع بحث.

Fig. 19. (a) Head-Discharge curve of the weirs discussion topic (b) Changes in the discharge coefficient of ATP-KWs researched by B.Noroozi [6], R.M.Anderson [3], present research and PK1.0 Weir (which is linear) against the head to the height of the weirs.

۵- نتیجه گیری

هدف از انجام تحقیق حاضر، دستیابی به بهترین هندسه‌ی سرریز کلید پیانویی غیرخطی با توجه به صرف کمترین هزینه (حداقل طول کل سرریز) می‌باشد. به همین منظور سرریزهایی در زوایا و سیکل‌های مختلف و درعین حال با طول کل سرریز و عرض ساختگاه ثابت (برای تمامی مدل‌ها) مدل و شبیه‌سازی گردید و نتایج حاصل شده به شرح زیر می‌باشد:

۱- مدل‌سازی سه‌بعدی و عددی جریان بر روی سرریز کلید پیانویی (آزمایش شده توسط اندرسون) و مقایسه‌ی نتایج به دست آمده با داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که نرم افزار Flow_3D قابلیت شبیه‌سازی جریان‌های سطح آزاد و همچنین پیش‌بینی هیدرولیک مسائل مربوط به سازه‌های هیدرولیکی را نیز دارد.

۲- مقایسه‌ی عملکرد سرریزهای کلید پیانویی خطی و غیرخطی نشان داد که به طور کلی ضریب عبوردهی جریان سرریزهای کلید پیانویی غیرخطی (انحدار در پلان) بیشتر از سرریزهای کلید پیانویی خطی بوده و در هدهای بالا به علت استغراق کل مجموعه، تفاوت چندانی در عملکرد هیدرولیکی سرریزهای مذکور مشاهده نمی‌شود.

۳- انحادار کردن مجموعه‌ی سرریز موجب تغییر شکل کلیدها از حالت مستطیلی به دوزنقه شده و این امر موجب توزیع یکنواخت خطوط جریان، کاهش فشردگی خطوط جریان و توزیع مناسب سرعت جریان در امتداد تاج کناری کلیدهای ورودی می‌گردد.

۴- به طور کلی، افزایش زاویه‌ی سرریز کلید پیانویی در یک طول ثابت برای تمامی مدل‌ها موجب افزایش ضریب عبوردهی جریان شده اما برعکس با افزایش تعداد سیکل در یک طول ثابت برای تمامی مدل‌ها به دلیل کاهش مساحت آبگیر کلید ورودی، افزایش انقباض خطوط جریان و درپی آن تشدید استغراق موضعی در کلید خروجی، ضریب عبوردهی جریان کاهش چشم‌گیری خواهد داشت.

۵- در بین تمامی سرریزهای مدل‌سازی شده در تحقیق حاضر، سرریز ATPK135-2 به عنوان مدل برتر شناخته شده و توانسته ضریب عبوردهی جریان را نسبت به حالت خطی سرریز کلید پیانویی PK1.0 به میزان ۴۷ درصد افزایش دهد.

۶- در بررسی اثرات تغییرات همزمان زاویه سرریز و تعداد سیکل باید به صرفه اقتصادی طرح توجه داشت زیرا در تحقیق حاضر مشخص گردید لزوماً افزایش طول کل سرریز، تعداد سیکل و زاویه سرریز نمی‌تواند منجر به دستیابی ضریب عبوردهی جریان بالایی گردد چرا که در بخش‌های قبل

مطرح گردید، سرریز APK150-5 (مورد بررسی توسط بهزاد نوروزی) با اینکه دارای برتری هندسی (طول کل سرریز و عرض ساختگاه بزرگتر) نسبت به سرریز ATPK135-2 (مدل برتر تحقیق حاضر) بود ولی دارای عملکرد هیدرولیکی ضعیف‌تری نسبت به سرریز ATPK135-2 نیز می‌باشد.

۶- فهرست علائم

علائم انگلیسی	
A	مساحت، m^2
A_x	سطح مقطع جریان در راستای محور X ، m^2
A_y	سطح مقطع جریان در راستای محور Y ، m^2
A_z	سطح مقطع جریان در راستای محور Z ، m^2
B_i	طول طره کلید ورودی (پایین دست چرخه جریان)، m
B_o	طول طره کلید ورودی (بالا دست چرخه جریان)، m
Cd	ضریب آبگذری جریان
E	مدول الاستیسیته، N/m^2
F_x, F_y, F_z	مولفه‌های شتاب لزجت
G_x, G_y, G_z	ترم‌های شتاب جرم
g	شتاب ثقل، m/s^2
Ha	هد سرعت، m
H_t	هد کل (هد پیژومتریک به علاوه هد سرعت)، m
H	هد پیژومتریک، m
L	طول سرریز، m
N	تعداد چرخه‌های سرریز (تعداد سیکل)
P	فشار
P	ارتفاع سرریز، m
P_i, P_m	ارتفاع تاج سرریز تا محل برخورد شیب کف کلید ورودی و خروجی، m
Q	دبی جریان، m^3/s
q	دبی جریان در واحد عرض کانال، m^2/s
Re	عدد رینولدز جریان
S_i	شیب کف کلید ورودی سرریز
S_o	شیب کف کلید خروجی سرریز
T_s	ضخامت دیوارها، m
T	دمای سیال
V	سرعت جریان سیال، m/s
V_x	سرعت جریان در راستای محور X ، m/s
V_y	سرعت جریان در راستای محور Y ، m/s
V_z	سرعت جریان در راستای محور Z ، m/s
W_i	عرض کلید ورودی، m
W_o	عرض کلید خروجی، m
W	عرض کل سرریز، m
Z	عمق جریان نسبت به کف کانال، m
α	زاویه داخلی کنگره با افق
$\delta x, \delta y, \delta z$	ابعاد سلول
δt	گام زمانی

- [8] B. Crookston, R.M. Anderson, B. Tullis, Free-flow Discharge Estimation Method for Piano Key Weir Geometries, *Journal of Hydro-environment Research*, 19 (2018) 160-167.
- [9] X. Guo, Z. Liu, T. Wang, H. Fu, J. Li, Q. Xia, Y. Guo, Discharge capacity evaluation and hydraulic design of a piano key weir, *Water Supply*, 19(3) (2019) 871-878.
- [10] M.K. Chahartaghi, S. Nazari, M.M. Shooshtari, Experimental and numerical simulation of arced trapezoidal piano key weirs, *Flow Measurement and Instrumentation*, 68 (2019) 101576.
- [11] A. Yousif, Experimental Investigation On Hydraulic Performance Of Non-Rectangular Piano Key Weir (PKW), (2020).
- [12] M. Kumar, P. Sihag, N. Tiwari, S. Ranjan, Experimental study and modelling discharge coefficient of trapezoidal and rectangular piano key weirs, *Applied Water Science*, 10(1) (2020) 1-9.
- [13] P.J. Roache, Perspective: A Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies, *Journal of Fluids Engineering*, 116(3) (1994) 405-413.
- [1] H.F. M, *Open-Channel Flow*, Macmillan, New York, 1966.
- [2] A. Ouamane, F.Lempérière, The Piano Key Weir is the solution to increase the capacity of the existing spillways, 2008.
- [3] R. M.Anderson, Piano Key Weir Head Discharge Relationships, Utah State University, 2011.
- [4] M.L. Ribeiro, M. Pfister, A.J. Schleiss, Overview of Piano Key weir prototypes and scientific model investigations, *Labyrinth and Piano Key Weirs II*, 273 (2013).
- [5] G. Cicero, J. Delisle, Discharge characteristics of Piano Key weirs under submerged flow, *Labyrinth and Piano Key Weirs II-PKW 2013*, (2013) 101-109.
- [6] A. Safarzadeh, B. Noroozi, 3D Hydrodynamics of Trapezoidal Piano Key Spillways, *International Journal of Civil Engineering*, 15 (2016) 1-13.
- [7] A. Mehboudi, J. Attari, S. Hosseini, Experimental study of discharge coefficient for trapezoidal piano key weirs, *Flow Measurement and Instrumentation*, 50 (2016) 65-72.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Edalati, R. Amini, Numerical investigation of flow behavior over arced trapezoidal piano key weirs, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 55(11) (2024) 2285-2310.

DOI: 10.22060/ceej.2023.22005.7879



