



## Numerical investigation of scour downstream of piano key Weirs using Flow-3D software

M. Dehghan<sup>1</sup>, H. Karami<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

**ABSTRACT:** In this research, the numerical simulation of the scouring of the downstream bed of two types of trapezoidal and triangular piano key series in the same geometric and hydraulic conditions has been done using the Flow-3D numerical model. To carry out the calibration process of the desired numerical model, the laboratory study of Ghodsian et al. (2021) was used in the conditions of sediment transfer. After the software calibration, the accuracy of the R2 criterion for the longitudinal profile of scour and the maximum depth of scour downstream of the weir was equal to 0.9338 and 0.873, respectively. Eighteen numerical simulations for scour downstream of two types of trapezoidal and triangular piano key weirs were carried out under the conditions of changes in discharge and depth of abutment, and the local changes of scour in a trapezoidal piano key weir at a depth of 0.05, 0.075 and 0.1 meters and all three The flow rate of 25, 35 and 45 liters second was observed less than the weir of the triangular piano key. By doubling the depth of the weir in the trapezoidal weir up to 29% and in the triangular weir up to 26.6%, the scour depth decreases. Also, with a 44% decrease in discharge at a constant depth of the aquifer, a 40% and 37.4% decrease in the maximum scour hole depth was observed in the trapezoidal and triangular weir, respectively. The increase in the depth of the floodplain causes the loss of energy of the falling jets from the weir, and by reducing the capacity of the bed sediments carried by the water flow, it causes a decrease in the maximum scour depth downstream of the desired weirs. It was observed that with the increase of the flow through both types of trapezoidal and triangular piano key weirs in the condition of constant depth of the abutment, the scour rate in the sedimentary bed for both types of weirs approaches.

### Review History:

Received: Sep. 09, 2023

Revised: Dec. 24, 2023

Accepted: Jan. 06, 2024

Available Online: Jan. 19, 2024

### Keywords:

Triangular piano key weir

Trapezoidal piano key weir

scour hole

Numerical simulation

Validation of Flow-3D software

### 1- Introduction

For the passage of excess water and floods from the upstream to the downstream of dams, weirs are of high importance, which form one of the important structures of any dam. Weirs should be both in terms of strong devices and in terms of design in such a way that they have the ability to transfer water to the required amount [1]. One of the types of weirs are piano key weirs, these types of weirs are a new form of long crest non-linear weirs [2]. In addition to the greater water-passing capacity that piano key weirs have compared to simple weirs, they are also economical [3]. Other advantages of piano key weirs include an increase in flow rate per unit of width passing through the weirs up to 100 cubic meters per second per meter, at least 4 times increase in flow rate compared to linear weirs, and lower maintenance cost [4]. These features make piano key weirs efficient structures. This type of weir is mainly used to increase the water-passing capacity of existing structures and also as a control structure in newly built weirs [5]. In dams, due to the relatively high hydrostatic pressure exerted by the water in the reservoir

on this structure, it is necessary to control the stability of the structure in addition to controlling the hydraulic conditions. Local erosion is one of the important issues in river engineering and flow hydraulics in alluvial beds. If in a studied period, the amount of sediment entered is less than the amount of sediment left, the erosion of the river bed occurs and the river bed is gradually hollowed out. Among the effects of river bed hollowing downstream, we can mention the disruption of the hydraulic jump upstream and the transfer of the hydraulic jump downstream. With the increase of the hydraulic gradient, which ultimately leads to the increase of the lifting pressure and the phenomenon of seepage, the scouring risks in the structure are increased. Therefore, the scouring phenomenon in structures is very important and it is necessary to predict it before building the structure [2]. The very high costs of building energy-consuming structures such as absorption ponds, relaxation ponds, etc., have caused an increase in scour investigations in the river bed and its greater protection.

\*Corresponding author's email: hkarami@semnan.ac.ir



## 2- Methodology

In this research, the experiments of Ghodsian et al. (2021) have been used to calibrate the numerical model, the experiments were carried out in a flume with a length of 10 meters and a width of 0.75 meters with a height of 0.8 meters. In order to determine the scour rate of the downstream bed of the piano key weir, uniform sand with an average diameter of  $d_{50}=1.64\text{mm}$  and a standard deviation of  $\sigma_g=1.24$  was used. The length of the downstream erodible bed is 200 cm, and the width and depth of the sediment layer are 75 and 42.5 cm, respectively. The weir used for validation in the present study was selected from the trapezoidal type weir in the experiment of Ghodsian et al [6]. Due to the nature of the current research, which is related to the depth and longitudinal profile of the scour pit, in the numerical simulations, half of the length of the erodible bed, i.e. the first 100 cm of the erodible bed, was examined and the rest of the length of the sedimentary bed was omitted in the modeling. Because the purpose of this research is only to numerically investigate the scour downstream of the piano key weir and considering that in the laboratory study of Ghodsian et al. The last 1 m of sediment bed for the numerical simulation does not make a difference in the scour pit results and only causes a huge increase in the simulation time. In the numerical studies carried out to validate the software used (Flow-3D), due to time and hardware limitations, only 20 minutes of the scouring process of the study of Ghodsian et al. The time has happened, so the numerical modeling done was compared with the first 20 minutes of the laboratory results.

## 3- Results and Discussion

The values related to the maximum scour depth per minute until the end of the simulation and the scour longitudinal profile for each of the modeling performed in Tecplot software were called and compared in the form of graphs with similar laboratory results. Also, the measures of root mean square error RMSE, mean absolute value of error MAE, and coefficient of determination  $R^2$  were obtained for each of the performed simulations and compared to select the optimal mesh and suitable disturbance model. The most appropriate measures of root mean square error RMSE, mean absolute magnitude of error MAE and coefficient of determination  $R^2$  obtained in software calibration were obtained in table (1) for medium mesh size meshing and K- $\epsilon$  turbulence model.

To investigate and compare the scour downstream of the triangular and trapezoidal piano key weirs with Flow-3D software, among the selected characteristics are the type of grid, the size of the meshes in the modeling, and the turbulence model, which gives the closest results to the desired laboratory study (results mentioned in table 1) provided to us was used. According to the obtained results, the largest local decrease in the bed level in all three flow rates of 25, 35, and 45 liters per second and the depths of 0.05, 0.075, and 0.1 meters occurred downstream of the triangular piano key weir. According to the results obtained from the numerical modeling of scour downstream of piano key weirs, the local changes of the

**Table 1. The measures of root mean square error RMSE, mean absolute value of error MAE and determination coefficient  $R^2$  extracted for the selected numerical model**

Parameter	dsm	Profile of Scour
RMSE	3.77	0.2056
MAE	3.15	0.168
$R^2$	0.8731	0.9338

downstream bed level in the trapezoidal piano key weir for all modeled hydraulic conditions are lower than the triangular piano key weir and it varies between 12% and 25%.

By examining the longitudinal profile of the scour downstream of the trapezoidal piano key weir, it was found that at a flow rate of 45 liters per second, the increase in the depth of the weir does not cause a noticeable change in the distance of the maximum depth of the scour hole from the base of the weir, and it only affects the dimensions of the scour hole. This is despite the fact that at a flow rate of 25 liters per second and a water depth of 0.05 meters, the difference between the maximum scour depth and the maximum bed depth at the edge of the weir base is less than 0.003 meters, and it can be said that the maximum scour depth has occurred at the edge of the weir base. Is.

In the investigation of the longitudinal profile of the scour downstream of the weir, a triangular piano key was observed, respectively, at constant depths of 0.05, 0.075, and 0.1 meters with a 40% increase in the flow rate, changes in the maximum depth of the scour hole to the base of the weir in all three depths. The catchment is 5% and with an increase of 80%, the flow through the weir is 5%, 5%, and 10%, respectively. Therefore, the two parameters of discharge and depth of the weir have a direct relationship with the distance of the maximum depth of the scour hole from the base of the weir.

## 4- Conclusion

In general, it can be said that if the sediment characteristics are constant, such as the average diameter of the sediment particles, the geometric standard deviation of the particles, and the density of the sediments, among the factors influencing the transfer of sediments downstream of the trapezoidal and triangular piano key weirs, according to the results obtained from the numerical simulation, the depth of the reservoir and The flow is the passage of the weir. In this way, the increase in the depth of the aquifer in the condition of a constant flow rate causes more energy loss of the falling jets from the weir keys of the piano key, and with the reduction of the impact force on the sedimentary bed, the dimensions of scouring are reduced. This reduction in the dimensions of the scour hole with the increase in the depth of the abutment includes a decrease in the length of the scour hole, a decrease in the maximum depth of the scour hole, a decrease in the depth of

the scour hole at the foot of the weir, and a decrease in the maximum distance of the depth of the scour hole from the base of the weir. According to the variability graphs of scour hole characteristics in exchange for changes in the depth of the aquifer, it can be concluded that approximately with the increase of the depth of the aquifer, the characteristics of the scour hole change with a constant trend as a numerical progression. Also, flow rate changes change the geometric dimensions of the scour hole; However, unlike the weir depth, the increase in flow through the weir in both trapezoidal and triangular piano key weirs causes an increase in the depth of the scour hole and an increase in the length of the scour hole, an increase in the maximum depth of the scour hole, an increase in the scour depth at the weir foot and an increase in the maximum distance. The depth of the scour hole is from the base of the desired weirs. In general, all the dimensions of the scour hole are similar to the flow passing through the weir and the depth of the weir for the triangular piano key weir, except for the length of the scour hole and the maximum distance of the scour hole depth from the base of the weir, it is greater than the trapezoidal piano key weir.

## References

- [1] A. Afshar, G. Nik Sefat, Designing hydraulic structures of small dams, University of Science and Iranian industry, (1367) 320, (In Persian).
- [2] A. Ahmadi Dehrashid, S. Gohari, Experimental Study of Downstream Scour of Piano Key Weirs, J. Water and Soil Conservation, 26(1) (2019) 91-109, (In Persian).
- [3] A. Mehboudi, J. Attari, S.A. Seyed Abbas Hosseini, M.R. Jalili Ghazizadeh, Experimental study comparing Piano Key weir with artillery and linear Weirs, in: 13th Iranian Hydraulic Conference, University of Tabriz, Iran, 2014, (In Persian).
- [4] O. Machiels, Experimental study of the hydraulic behavior of Piano Key Weirs, University of Liège, 2012.
- [5] Master's thesis, M., 2015. "Numerical Modeling of the Piano Key Weir and Study on Geometrical Parameters Function". Master's thesis, Shahrood University of Technology, Faculty of Civil Engineering.
- [6] M. Ghodsian, C. Abdi Choploo, A. Ghafouri, Scouring Downstream of Triangular and Trapezoidal Pianos Key Weirs. Journal of Hydraulics, Civil Engineering Journal, 16(2) (2021) 43-58, (In Persian)

### HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Dehghan, H. Karami, Numerical investigation of scour downstream of piano key Weirs using Flow-3D software, Amirkabir J. Civil Eng., 56(2) (2024) 45-48.

DOI: [10.22060/ceej.2024.22659.8019](https://doi.org/10.22060/ceej.2024.22659.8019)







## بررسی عددی آبشستگی پایین دست سرریزهای کلید پیانویی با استفاده از نرم افزار Flow-3D

محمد دهقان، حجت کرمی\*

گروه آموزشی عمران-آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران .

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۱۸  
بازنگری: ۱۴۰۲/۱۰/۰۳  
پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۱۶  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۱۰/۲۹

### کلمات کلیدی:

سرریز کلید پیانویی مثلثی  
سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای  
حفره آبشستگی  
شبیه‌سازی عددی  
اعتبارسنجی نرم‌افزار Flow-3D

**خلاصه:** سرریزهای کلید پیانویی نوع جدیدی از سرریزها می‌باشند که برای بهبود ظرفیت تخلیه سدها طراحی می‌شوند. در این تحقیق با توجه به آزمایشگاهی بودن اکثر مطالعات صورت گرفته روی آبشستگی پایین‌دست سرریزهای کلید پیانویی به مطالعه عددی آبشستگی پایین‌دست سرریزهای کلید پیانویی با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D پرداخته شده است. در این پژوهش شبیه‌سازی آبشستگی بستر پایین‌دست دو نوع سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای و مثلثی در شرایط هندسی و هیدرولیکی یکسان صورت گرفت. برای کالیبراسیون مدل از مطالعه‌ی آزمایشگاهی قدسیان و همکاران (۲۰۲۱) در شرایط انتقال رسوب استفاده شد، سپس تعداد ۱۸ شبیه‌سازی عددی برای آبشستگی پایین‌دست دو نوع سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای و مثلثی در شرایط تغییرات دبی و عمق پایاب صورت پذیرفت. تغییرات موضعی آبشستگی در سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای در عمق‌های پایاب ۰/۰۵، ۰/۰۷۵ و ۰/۱ متر و هر سه دبی ۲۵، ۳۵ و ۴۵ لیتر بر ثانیه کمتر از سرریز کلید پیانویی مثلثی مشاهده شد. با افزایش ۲ برابری عمق پایاب در سرریز دوزنقه‌ای تا ۲۹٪ و در سرریز مثلثی تا ۲۶/۶٪ از عمق آبشستگی کاسته می‌شود. همچنین با کاهش ۴۴ درصدی دبی در یک عمق پایاب ثابت به ترتیب در سرریز دوزنقه‌ای و مثلثی ۴۰٪ و ۳۷/۴٪ کاهش در بیشینه عمق حفره آبشستگی مشاهده گردید. افزایش عمق پایاب موجب اتلاف انرژی جت‌های ریزشی از سرریز شده و با کاهش ظرفیت حمل رسوبات بستر توسط جریان آب، باعث کاهش بیشینه عمق آبشستگی در پایین‌دست سرریزهای مورد نظر می‌شود.

### ۱- مقدمه

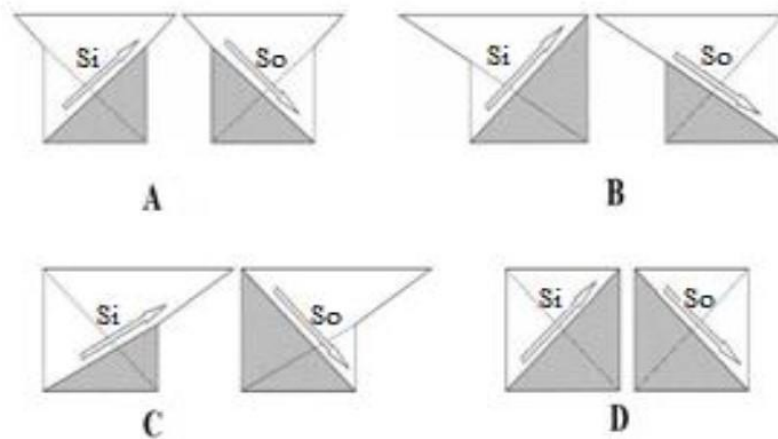
دانشگاه بیسکارا الجزایر در سال ۱۹۹۸ ارائه شده است [۳]. سرریزهای کلید پیانویی افزون بر ظرفیت آبگذری بیشتری که نسبت به سرریزهای ساده دارند، از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه می‌باشند [۴]. برتری‌های دیگر سرریزهای کلید پیانویی عبارت‌اند از: افزایش دبی بر واحد عرض عبوری از سرریز تا ۱۰۰ متر مکعب بر ثانیه بر متر، افزایش حداقل ۴ برابری دبی نسبت به سرریزهای خطی و هزینه نگهداری کم‌تر [۵]. این ویژگی‌ها سرریزهای کلید پیانویی را به سازه‌های کارآمدی تبدیل کرده است. این نوع سرریز به طور عمده با هدف افزایش ظرفیت آبگذری روی سازه‌های موجود و همچنین به عنوان سازه کنترلی در سرریزهای نوساز استفاده می‌شود [۱]. به طور کلی سرریزهای کلید پیانویی به چهار نوع تقسیم می‌شوند:

- نوع A: دارای دو لبه‌ی آویزان (بیرون زدگی) همسان در بالادست و پایین‌دست سرریز است.
- انواع B و C: که دارای یک لبه آویزان به ترتیب در بالادست و پایین‌دست است.
- نوع D: بدون لبه‌ی آویزان.

از جمله مهم‌ترین سازه‌هایی که امروزه برای افزایش دادن ذخایر آب‌های سطحی مورد استفاده قرار می‌گیرند سدها هستند. وجود یک طراحی دقیق برای اجزای این سازه‌ها اهمیت فوق‌العاده‌ای دارد. از جمله اجزای مهم سدها می‌توان به سرریزها اشاره کرد که در سدهای بزرگ برای تخلیه سیلاب از آن استفاده می‌شود. سرریزها نقش بسیار مهمی در تضمین ایمنی سدها ایفا می‌کنند [۱]. برای عبور آب‌های اضافی و سیلاب‌ها از بالادست به پایین‌دست سدها سرریزها دارای اهمیت بالایی هستند که یکی از سازه‌های مهم هر سد را تشکیل می‌دهند. سرریزها باید هم از لحاظ سازه‌ای محکم و هم از جهت طراحی به‌گونه‌ای باشند که توانایی انتقال آب به میزان مورد نیاز را داشته باشند [۲]. یکی از انواع سرریزها، سرریزهای کلید پیانویی هستند این نوع سرریزها شکل جدیدی از سرریزهای غیر خطی تاج طولانی هستند که توسط مؤسسه هیدروکوئوپ فرانسه و آزمایشگاه هیدرولیک و محیط زیست

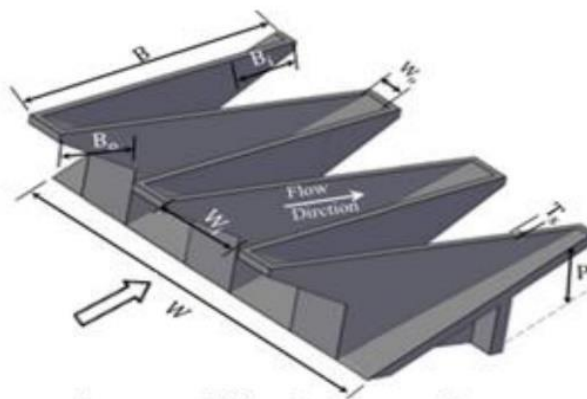
\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: hkarami@semnan.ac.ir





شکل ۱. انواع سرریز کلید پیانویی [۶].

Fig. 1. Types of piano key weirs [6].



شکل ۲. مشخصات هندسی سرریز کلید پیانویی نوع A [۶].

Fig. 2. Geometrical specifications of a type piano key weir [6].

در سدها به علت فشار هیدرواستاتیکی نسبتاً زیاد اعمالی از طرف آب موجود در مخزن بر این سازه، لازم است علاوه بر کنترل شرایط هیدرولیکی و سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی از جمله حوضچه‌های آرام، کنترل‌های پایداری سازه نیز بایستی به طور دقیق صورت پذیرد. آبستگي موضعی از موضوعات مهم در مهندسی رودخانه و هیدرولیک جریان در بسترهای آبرفتی است. اگر در یک بازه مورد بررسی، مقدار رسوب وارد شده کم‌تر از مقدار رسوب خارج شده باشد، عمل فرسایش کف رودخانه رخ می‌دهد و بستر رودخانه به تدریج گود می‌شود. از جمله اثرات گود شدن بستر رودخانه در

چهار نوع مختلف سرریز کلید پیانویی در شکل (۱) قابل مشاهده است. همچنین این سرریزها دارای اشکال مختلف در پلان شامل مستطیلی، دوزنقه‌ای و مثلثی هستند.

اجزای یک سرریز کلید پیانویی نوع A که در شکل (۲) نشان داده شده عبارت‌اند از: ارتفاع سرریز،  $P$  عرض کل سرریز،  $W$  عرض کلیدهای ورودی و خروجی،  $S_0$  و  $S_1$  به ترتیب شیب کف کلیدهای ورودی و خروجی،  $B$  طول دیوار جانبی سرریز،  $B_0$  و  $B_1$  به ترتیب طول بیرون‌زدگی‌های ورودی و خروجی سرریز می‌باشند [۶].

از جمله تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی آبستگي پايين دست سرريزه‌های کلید پيانویی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

طبق آزمایش‌هایی که بر روی مشخصات حفره آبستگي بستر فرسایش پذیری با رسوبات یکنواخت در پايين دست سرريز کلید پيانویی دوزنقه‌ای و تغییر در میزان دبی و عمق پایاب انجام شد، افزایش عمق پایاب باعث کاهش بیشینه عمق آبستگي می‌شود، همچنین افزایش دبی موجب افزایش ابعاد حفره آبستگي می‌شود [۱۱].

در مطالعات آزمایشگاهی حول آبستگي پايين دست سرريزه‌های کلید پيانویی مستطیلی و بررسی تاثیر فراسنجه‌هایی از قبیل دانه‌بندی رسوبات غیر چسبنده، دبی جریان، ارتفاع جت و عمق پایاب بر حفره آبستگي مشخص شد که بیشینه عمق حفره آبستگي به ویژگی‌های رسوب، دبی، اختلاف ارتفاع جریان بالادست و پايين دست سرريز و عمق پایاب بستگی دارد [۱۲].

در مطالعه آزمایشگاهی آبستگي پس از کف‌بند تعبیه شده در پايين دست سرريز کلید پيانویی مستطیلی این مهم حاصل شد که با افزایش طول مؤثر سرريز، عمق آب روی سرريز کاهش یافته و با کاهش سرعت برخورد جریان با بستر پايين دست میزان عمق آبستگي نیز کاهش می‌یابد. افزون بر این، کاهش عمق پایاب موجب افزایش بیشینه عمق آبستگي و دور شدن محل رخداد بیشینه عمق آبستگي از انتهای کف‌بند می‌شود [۳]. در بررسی فیزیکی ابعاد حفره آبستگي و همچنین تغییرپذیری‌های عوارض بستر در پايين دست سرريز کلید پيانویی دوزنقه‌ای با تغییر دبی جریان و عمق پایاب مشخص شد برای دبی ثابت با افزایش ۱۱۲ درصدی عمق پایاب بیشینه عمق آبستگي ۳۷ درصد کاهش یافت و با افزایش عمق پایاب فاصله بیشینه حفره آبستگي از پایه سرريز افزایش می‌یابد و شکل عوارض بستر در شرایط مختلف، به تقریب با هم یکسان می‌باشند [۶].

طبق مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته بر آبستگي پايين دست سرريزه‌های کلید پيانویی مثلثی و دوزنقه‌ای در شرایط تغییرات عمق پایاب و دبی مشخص شد که در سرريزه‌های کلید پيانویی دو نوع جریان قالب وجود دارد؛ کلید ورودی جریان‌های نزدیک شونده را به سمت خود کشیده و جریان از روی تاج ورودی به صورت ریزشی به سمت پايين دست تخلیه می‌شود. الگوی دوم جریان بر روی کلیدهای خروجی شکل می‌گیرد در این قسمت از سرريز جریان عبوری از روی تاج خروجی همانند یک جت به سمت پايين دست بخش شیب‌دار سرريز تخلیه می‌شود. همچنین جریان خروجی از کلید ورودی به سطح بستر در پايين دست برخورد کرده و با

پايين دست، می‌توان به مختل شدن پرش هیدرولیکی در بالادست و انتقال پرش هیدرولیکی به پايين دست اشاره کرد. با افزایش گرادیان هیدرولیکی که در نهایت افزایش فشار بالابرنده و ایجاد پدیده تراوش را به همراه دارد بر خطرات آبستگي در سازه افزوده می‌شود. از این رو پدیده آبستگي در سازه‌ها بسیار دارای اهمیت است و پیش‌بینی آن قبل از ساخت سازه امری ضروری است [۳]. گسترش آبستگي در سازه‌های هیدرولیکی می‌تواند عملکرد سازه را تحت تاثیر قرار داده و پایداری آن را به خطر اندازد [۷]. هزینه‌های بسیار زیاد ساخت سازه‌های مستهلک کننده انرژی مانند حوضچه‌های استغراق، حوضچه‌های آرامش مسبب افزایش بررسی‌های آبستگي در بستر رودخانه‌ها و محافظت بیشتر آن شده است. در صورت استفاده از سازه‌های مستهلک کننده انرژی در پايين دست سرريزه همچنان بررسی آبستگي پايين دست این سازه‌ها دارای اهمیت است و از این جهت همواره پیش‌بینی شکل و ابعاد حفره آبستگي در پايين دست این سازه‌ها مورد توجه پژوهشگران بوده است.

مطالعات محدودی در رابطه با سرريزه‌های کلید پيانویی صورت گرفته که در این بین تعداد معدودی آبستگي پايين دست سرريزه‌های کلید پيانویی را مورد بررسی قرار داده‌اند. بخشی از یافته‌ها و نتایج تحقیقات در رابطه با سرريزه‌های کلید پيانویی در ادامه ارائه می‌شود:

نتایج مطالعات بر روی سرريزه‌های کلید پيانویی نشان می‌دهد؛ در ترازهای پايين، زیاد کردن تعداد دهانه‌های سرريز باعث افزایش کارایی سرريز می‌شود [۸]. با بررسی نسبت عرض کلید ورودی به خروجی در سرريزه‌های کلید پيانویی، نسبت عرض کلید ورودی به خروجی  $(W_1/W_0)$  در محدوده‌ی ۱/۲۵ تا ۱/۵ بیشترین راندمان سرريز را به همراه داشت و همچنین با بررسی فنی-اقتصادی نسبت‌های  $(W_1/W_0=1/25)$ ،  $(B_1/B_0=0/333)$  و  $(P/W_u=1/33)$  به عنوان بهینه هیدرولیکی و نسبت‌های  $(W_1/W_0=1/5)$ ،  $(B_1/B_0=1)$  و  $(P/W_u=0/5)$  به عنوان بهینه اقتصادی پیشنهاد شد [۵]. در مطالعه‌ی هیدرولیکی سرريزه‌های کلید پيانویی مشخص شد که با ایجاد شیب و عرض کافی برای کلیدهای خروجی می‌توان از تاثیر استغراق تاج اجتناب کرد و به طور کلی این سرريزه‌ها کارآمدتر از سرريزه‌های کنگره‌ای مستطیلی بدون شیب و با شیب ورودی و خروجی هستند [۹]. با زیگزگی شدن نیم‌رخ تاج جانبی، بیشینه ضریب دبی در نسبت  $(H_u/P)$  کمتری رخ می‌دهد. به طوری که افزایش ۱۰ درصدی در میانگین میزان ضریب دبی سرريزه‌های کلید پيانویی با شکل هندسی زیگزگی نسبت به استاندارد گزارش شده است [۱۰].

عمق نسبی حفره آبستنگی در سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای نسبت به سرریز کلید پیانویی مستطیلی ۷ درصد کاهش می‌یابد. درکالیبراسیون و مدل‌سازی عددی آبستنگی پایین‌دست سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای و مستطیلی با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D، نتایج قابل قبول و با خطای کم در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی بدست آمد، در این مدل‌سازی در شرایط دبی، عمق پایاب و اختلاف ارتفاع بین پایاب و سرآب زیاد اختلاف پروفیل آبستنگی سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی و دوزنقه‌ای کاهش می‌یابد [۱۷]. در مطالعه حاضر با بهره‌گیری از قابلیت‌های نرم‌افزار Flow-3D، بعد از انجام اعتبارسنجی به شبیه‌سازی عددی آبستنگی پایین‌دست سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای و مثلثی و مقایسه ویژگی‌های آبستنگی بستر پایاب این دو سرریز پرداخته شده است. لازم به ذکر است در این پژوهش زاویه شیب در کلیدهای ورودی و خروجی سرریزهای مورد نظر از سرریزهای مطالعه شده در آزمایش‌های پیشین بیشتر شده و تاثیر افزایش شیب در کلیدهای سرریز بر زاویه برخورد جت ریزی به بستر پایاب و به دنبال آن تغییر در روند آبستنگی مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- مواد و روش‌ها

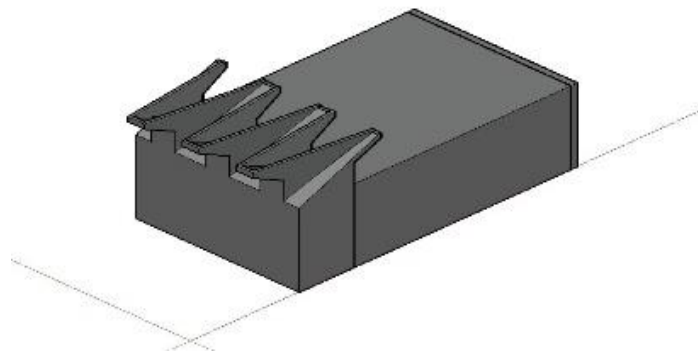
### ۲-۱- تجهیزات آزمایشگاهی

در این تحقیق از آزمایشات قدسیان و همکاران (۲۰۲۱) برای واسنجی مدل عددی استفاده شده است، آزمایشات در یک فلوم به طول ۱۰ متر و عرض ۰/۷۵ متر با ارتفاع ۰/۸ متر انجام شده است، جنس کف فلوم از ورق گالوانیزه و دیواره‌های آن از شیشه نشکن می‌باشد. عمق آب درون فلوم به وسیله دریچه تعبیه شده در انتهای آن کنترل می‌شود. جریان آب از یک مخزن زیرزمینی به وسیله‌ی یک پمپ با بیشینه دبی ۸۵ لیتر بر ثانیه تامین شده و سرریز کلید پیانویی مورد نظر در دو شکل پلان، به صورت مثلثی و دوزنقه‌ای در فاصله ۲ متری از انتهای فلوم نصب شده و آب‌بندی آن صورت گرفته است. به منظور تعیین میزان آبستنگی بستر پایین‌دست سرریز کلید پیانویی، از ماسه یکنواخت با قطر میانگین  $d_{50} = 1.64 \text{ mm}$  و انحراف معیار برابر با  $\sigma_p = 1.24$  استفاده شده است. طول بستر قابل فرسایش پایین‌دست ۲۰۰ سانتی‌متر و عرض و عمق لایه رسوبات به ترتیب ۷۵ و ۴۲/۵ سانتی‌متر است. سرریز مورد استفاده برای امر صحت‌سنجی در پژوهش حاضر از سرریز نوع دوزنقه‌ای موجود در آزمایش قدسیان و همکاران انتخاب شد. این سرریز در نرم‌افزار Auto CAD ترسیم شد که به صورت شکل (۳) می‌باشد. ابعاد این سرریز در جدول (۱) موجود است [۱۳].

توجه به عمق پایاب موجود به صورت چرخش سطحی در عمق پایاب کم و اغتشاش سطحی در عمق پایاب زیاد ظاهر می‌شود. در هر دو نوع سرریز کلید پیانویی مثلثی و دوزنقه‌ای تغییرات عمق حفره آبستنگی در اعداد فرود ذره کمتر از ۳ ( $Fr_d < 3$ ) تا حد زیادی نزدیک به هم است. فاصله بیشینه عمق حفره آبستنگی تا پای سرریز و طول حفره آبستنگی در سرریز کلید پیانویی مثلثی به طور میانگین ۳۷ درصد و ۱۵/۵ درصد بیشتر از سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای است همچنین میانگین عمق آبستنگی در پنجه سرریز کلید پیانویی مثلثی ۱۴/۷۳ درصد بیشتر از سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای است. حجم حفره آبستنگی در پایین‌دست سرریز کلید پیانویی مثلثی ۳/۵ درصد بیشتر از سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای بوده است [۱۳].

امروزه نرم‌افزار Flow-3D به عنوان یک ابزار قدرتمند برای مدل‌سازی جریان سطح آزاد سه بعدی در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی شناخته شده است [۱۴، ۱۵]. در این مطالعه، جهت شبیه‌سازی عددی آبستنگی پایین‌دست سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی، دو سرریز کلید پیانویی مستطیلی ۵ و ۹ کلیدی توسط نرم‌افزار Flow-3D مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که نرم‌افزار Flow-3D به خوبی مشخصات حفره آبستنگی در پایین‌دست سرریز کلید پیانویی ۵ و ۹ کلیدی را مدل‌سازی کرده و تا حد زیادی با نتایج آزمایشگاهی شباهت دارد [۱۵]. مدل‌سازی عددی آبستنگی پایین‌دست سرریز کلید پیانویی مستطیلی با شکل تاج معمولی و تاج زیگزاگی با نرم‌افزار Flow-3D و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی نشان داد که نرم‌افزار مذکور حفره آبستنگی پایین‌دست سرریز کلید پیانویی را با خطای قابل قبولی مدل‌سازی می‌کند. در این مدل‌سازی چهار نوع تاج زیگزاگی با اشکال مثلثی، سینوسی، مستطیلی و نیم‌دایره مورد استفاده قرار گرفت و با زیگزاگی شدن تاج سرریز کلید پیانویی ابعاد حفره آبستنگی کاهش می‌یابد، بیشترین کاهش عمق آبستنگی با مثلثی شدن تاج سرریز به میزان ۴۰ درصد بود و همچنین بیشترین کاهش حجم حفره آبستنگی در این نوع سرریز مشاهده شد. دورترین فاصله بیشینه عمق آبستنگی در سرریز با تاج زیگزاگی مستطیلی رخ داد [۱۶]. مقایسه آزمایشگاهی آبستنگی پایین‌دست سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی و دوزنقه‌ای با استفاده از دبی‌های مختلف و سه عمق پایاب که جنس بستر پایین‌دست سرریز از مصالح شنی با قطر متوسط  $d_{50} = 1.64 \text{ mm}$  به ارتفاع ۰/۲۵ متر بود، نشان داد با افزایش دبی و کاهش عمق پایاب ویژگی‌های هندسی حفره آبستنگی افزایش می‌یابد. همچنین عمق آبستنگی در سرریز کلید پیانویی مستطیلی بیش از سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای بوده به طوری که در همه‌ی دبی‌ها به طور میانگین





شکل ۳. سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای [۱۳]

Fig. 3. Trapezoidal piano key weir [13].

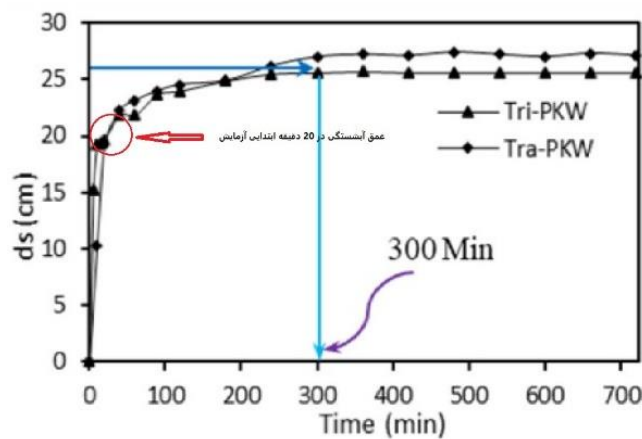
جدول ۱. مشخصات هندسی سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای [۱۳].

Table 1. Geometric characteristics of trapezoidal piano key weir [13].

Parameter	Value
Number of key of the weir (N)	۳
Total width of the weir (W:m)	۰/۷۵
Width of the inlet key (W <sub>i</sub> :m)	۰/۱۷۵
Width of the outlet key (W <sub>o</sub> :m)	۰/۰۵۱
Sidewall thickness (T <sub>s</sub> :m)	۰/۰۱۲
Lateral length of the weir (B:m)	۰/۵
Upstream and Downstream overhang length (B <sub>i</sub> and B <sub>o</sub> :m)	۰/۱۲۵
Height of the PKW crest (P:m)	۰/۲
Slope of the inlet and outlet key (S <sub>i</sub> and S <sub>o</sub> : degree)	۲۸

به دلیل ماهیت پژوهش حاضر که در رابطه با عمق و پروفیل طولی گودال آبستگي می‌باشد، در شبیه‌سازی‌های عددی صورت گرفته نیمی از طول بستر فرسایش‌پذیر یعنی ۱۰۰ سانتی‌متر ابتدایی بستر فرسایشی مورد بررسی قرار گرفته و از اعمال مابقی طول بستر رسوبی در مدل‌سازی صرف‌نظر شده است، زیرا هدف از این پژوهش صرفاً بررسی عددی آبستگي در پایین‌دست سرریز کلید پیانویی است و با توجه به اینکه در مطالعه آزمایشگاهی قدسیان و همکاران (۲۰۲۱) محل حفر گودال آبستگي در طول کمتر از ۱ متر از پایین‌دست سرریز کلید پیانویی واقع شده و از طرفی اعمال ۱ متر انتهایی بستر رسوبی برای شبیه‌سازی عددی، تفاوتی در نتایج گودال آبستگي ایجاد نمی‌کند و فقط باعث افزایش بسیار زیاد در زمان شبیه‌سازی می‌شود.

نحوه آماده سازی مدل عددی Flow-3D و هندسه‌های سرریزهای مورد نظر برای کالیبره کردن نرم‌افزار نام برده شده در این قسمت برای حالت دارای رسوب در پایین‌دست سرریز توضیح داده می‌شود. با توجه به اینکه پدیده آبستگي تابع زمان است، در مطالعه آزمایشگاهی قدسیان و همکاران (۲۰۲۱)، دو آزمایش درازمدت ۱۲ ساعته برای بررسی زمانی آبستگي پایین‌دست سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای و مثلثی انجام شد (شکل (۴)). در پژوهش مذکور با توجه به شیب نمودار و بر اساس معیار چيو (Chiew, 1992) جهت تعیین عمق تعادل آبستگي، عمق آبستگي پس از حدود ۵ ساعت به عنوان آبستگي تعادلی انتخاب شده است [۱۳].



شکل ۱. نمودار توسعه زمانی عمق گودال آبستگن در ۱۲ ساعت و زمان تعادل آبستگن [۱۳].

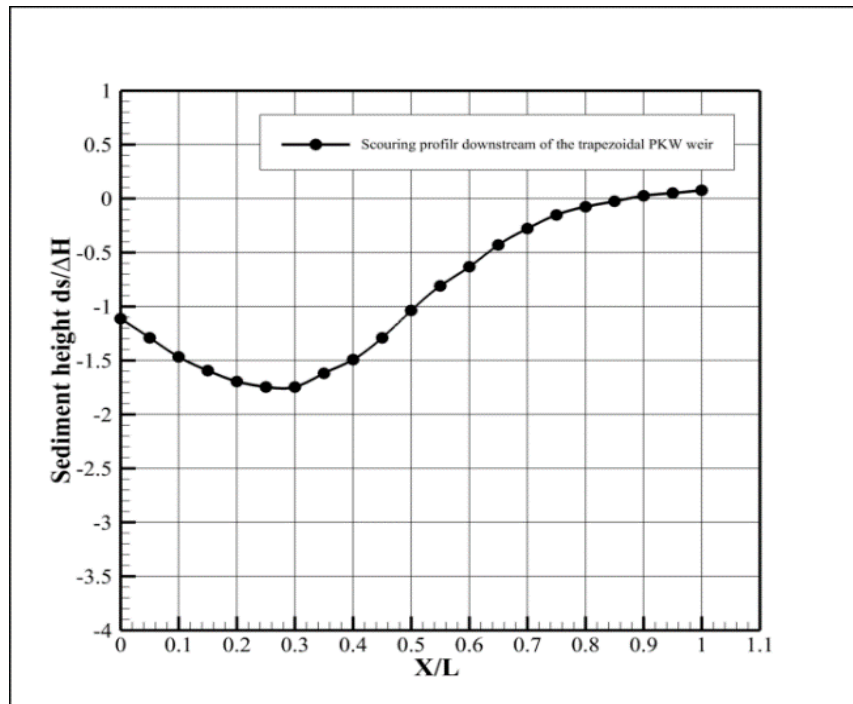
Fig. 4. Time development graph of scour pit depth in 12 hours and scour equilibrium time [13].

استفاده از این نوع شبکه‌بندی پردازش با دقت بالاتر جریان عبوری در محل سرریز کلید پیاپویی می‌باشد، مش بلوک اول مش اصلی و مش بلوک دوم مش فرعی (داخلی) است. تعداد ۱۳۹۰۲۰ مش محاسباتی در شبکه‌بندی متوسط استفاده شد که سایز این مش‌ها در مش بلوک اول ۰/۱۵ متر و در مش بلوک دوم ۰/۰۱ متر است. مختصات مش بلوک اصلی به صورت  $X_{min}:-0.5$  ،  $Z_{min}:0.0$  ،  $Y_{min}:0.0$  ،  $Y_{max}:0.4$  ،  $X_{max}:1.5$  ،  $Z_{max}:0.3$  متر است و مش فرعی نیز در مختصات  $X_{min}:-0.05$  ،  $Z_{min}:0.0$  ،  $Y_{min}:0.0$  ،  $Y_{max}:0.4$  ،  $X_{max}:0.55$  ،  $Z_{max}:0.28$  متر می‌باشد.

پروفیل طولی آبستگن آزمایشگاهی پایین‌دست سرریز کلید پیاپویی ذوزنقه‌ای بعد از گذشت ۲۰ دقیقه در شکل (۵) مشاهده می‌شود که  $X/L$  فاصله بی‌بعد از سرریز (فاصله ۱ متری از دیواره سرریز در پایین‌دست) و  $ds/\Delta H$  عمق آبستگن بی‌بعد شده با اختلاف ارتفاع سطح آب سرآب و پایین‌دست می‌باشد. در آزمایش منتخب از مطالعه آزمایشگاهی قدسیان و همکاران (۲۰۲۱) سطح آب در پایین‌دست در رقوم ۰/۵۶ متر و در بالادست سرریز ۰/۶۷۲ متر و دبی ۴۵ لیتر بر ثانیه است. حداکثر عمق آبستگن پایین‌دست سرریز کلید پیاپویی ذوزنقه‌ای در مطالعه آزمایشگاهی ۰/۱۹۳ متر برای آزمایش منتخب می‌باشد.

در مطالعات عددی صورت گرفته برای صحت‌سنجی نرم‌افزار مورد استفاده به علت محدودیت زمانی و سخت‌افزاری، فقط ۲۰ دقیقه از روند آبستگن مطالعه قدسیان و همکاران (۲۰۲۱) مدل‌سازی شد که البته میزان ۷۵٪ از کل عمق حفره آبستگن در این مدت زمان اتفاق افتاده است، بنابراین این مدل‌سازی‌های عددی صورت گرفته با ۲۰ دقیقه ابتدایی نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت. ضمناً این نکته قابل توجه است که با توجه به نمودار توسعه زمانی آبستگن ارائه شده از مطالعه‌ی آزمایشگاهی قدسیان و همکاران (۲۰۲۱) بعد از گذشت ۲۰ دقیقه ابتدایی از زمان کل آبستگن، سرعت حفر گودال آبستگن نسبت به زمان بسیار کاهش پیدا کرده، به نحوی که در محدوده بازه زمانی ۲۰ تا ۳۰۰ دقیقه (۳۰۰ دقیقه برابر است با ۵ ساعت و زمان تعادل آبستگن) تنها حدود ۰/۰۷ متر افزایش پیدا کرده است. به صورت میانگین به ازای هر ۲۰ دقیقه بعد از ۲۰ دقیقه ابتدایی روند آبستگن تنها ۰/۰۰۵ متر افزایش عمق گودال صورت خواهد گرفت. از نظر هزینه محاسبات و زمان چند برابری برای شبیه‌سازی کل زمان تعادل آزمایش (۵ ساعت زمان تعادل) به ازای اضافه شدن هر ۲۰ دقیقه به زمان شبیه‌سازی، تاثیری در مقایسه بین نتایج مطالعه آزمایشگاهی مبنا و مطالعه عددی حاضر نمی‌کند و نتایج صحیح مدل‌سازی عددی در ۲۰ دقیقه ابتدایی آزمایش قابل اتکاء خواهد بود.

در این پژوهش از نوع شبکه‌بندی تودرتو بهره گرفته شد. هدف از



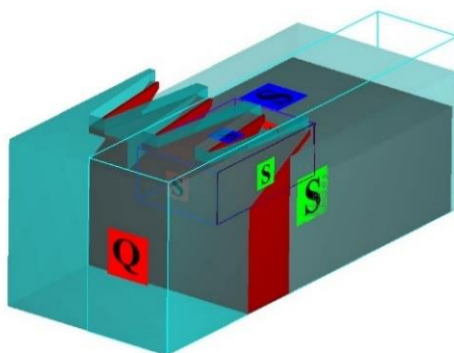
شکل ۵. پروفیل طولی آبشستگی بستر پایاب سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای [۱۳].

Fig. 5. Longitudinal scouring profile of trapezoidal piano key weir bed [13].

Physics > Sedi- پارامتر شیلدز مورد نیاز برای اعمال در بخش  
 ment scour > Critical sheilds number از نمودار شیلدز  
 استخراج شده و برای ذرات رسوبی مطالعه آزمایشگاهی مورد نظر، با قطر  
 متوسط  $0.0164$  متر برابر با  $\theta_{cr} = 0.034$  بدست آمد. زاویه اصطکاک  
 داخلی رسوبات  $32$  درجه در نظر گرفته شد. مدل سازی توسط شبکه بندی  
 با تعداد کل مش ها  $105120$  عدد مش و نوع شبکه بندی مورد استفاده  
 در کالیبراسیون مدل عددی Flow-3D از نوع تودرتو می باشد. مش  
 بلوک اصلی (اول) اعمال شده بر مسئله دارای مختصات  $(X(0.0-1.78$ ،  
 $Y(0.375-0.75$  و  $Z(0.0-0.43-0.7$ ) به همین ترتیب مش فرعی  
 (دوم) دارای مختصات  $(X(0.3-0.9$ ،  $Y(0.375-0.75$  و  $Z(0.0-$   
 $0.64-0.625)$  است. برای هر دو مش بلوک اعمالی بر مدل در جهت  
 $Z$  از سه مش پلان استفاده شده که در مش بلوک اصلی به علت جدا سازی  
 بخش حاوی رسوب از بخش بدون رسوب و اعمال سایز مش متفاوت برای  
 دو بخش است، که طبق مش بهینه کسب شده در شبیه سازی های صورت  
 گرفته برای کالیبراسیون جریان بدون رسوب در بلوک اصلی از سایز مش  
 $0.15$  متر در بین مش پلان ۲ و ۳ در جهت  $Z$  استفاده شده و کاربرد  
 سه مش پلان در جهت  $Z$  برای مش بلوک فرعی در راستای شناخته شدن

۲-۲- شرایط مدل سازی های انجام شده برای کالیبراسیون آبشستگی  
 نرم افزار ۳D-Flow

- به علت تنظیم جریان پایدار، عدم وجود اغتشاش در سطح آب و همچنین تنظیم ارتفاع سطح سیال در ابتدای کانال در مطالعه ای آزمایشگاهی قدسیان و همکاران (۲۰۲۱) شرایط ماندگار برای جریان وجود دارد و در شبیه سازی های صورت گرفته برای کالیبراسیون مدل سازی آبشستگی پایین دست سرریز کلید پیانویی از طول کانال بالادست سرریز به میزان  $7/5$  متر کاسته شده و به  $0/5$  متر کاهش یافته است.
- در شبیه سازی عددی از طول  $2$  متری پایین دست سرریز به علت اینکه حفره آبشستگی در  $1$  متر ابتدایی از طول پایین دست سرریز ایجاد شده، به  $1$  متر کاهش پیدا کرده است.
- در شبیه سازی عددی از شرط مرزی Symmetry (مرز تقارن) در مرز Ymin به علت کاهش زمان شبیه سازی استفاده شده است.
- برای اعمال شرایط آزمایشگاهی بر مدل عددی، در پایین دست فلوم یک دیواره به ضخامت  $3$  سانتی متر و ارتفاع  $42/5$  سانتی متر (برابر با ارتفاع رسوبات) در پایین دست سرریز قرار داده شده تا جریان سیال موجب ریزش بسته رسوبی نشود.



شکل ۶. شبکه‌بندی بکار رفته در مدل کالیبراسیون آبشستگی پایین‌دست سرریز کلید پیانویی با نرم‌افزار 3D-Flow.

Fig. 6. The grid used in the calibration model of scour downstream of the piano key weir with Flow-3D software.

انتقال رسوب میر-پیتر و مولر به انجام رسید و با مشخص شدن مش بهینه در محل رسوبات، ۲ شبیه‌سازی دیگر برای انتخاب مدل آشفستگی مناسب با مدل‌های آشفستگی  $K-\epsilon$  و  $K-\omega$  صورت گرفته و نتایج برای انتخاب مناسب‌ترین مدل آشفستگی مقایسه شد. ضمناً توجه به این نکته ضروری است که در نرم‌افزار Flow-3D تنها از مدل انتقال رسوب میر-پیتر و مولر استفاده می‌شود و امکان کالیبراسیون مدل‌های مختلف انتقال رسوب به وسیله این نرم‌افزار وجود ندارد. در پژوهش حاضر از شبیه‌سازی فیزیکی شماره ۱۱ مطالعه قدسیان و همکاران (۲۰۲۱) برای کالیبراسیون نرم‌افزار بهره گرفته شد، که در این شبیه‌سازی سرریز به کار برده شده از نوع دوزنقه‌ای و شرایط دبی ۴۵ لیتر بر ثانیه، عمق پایاب ۰/۱۳۵ متر با ارتفاع آب از لبه سرریز در بالادست ۰/۰۴۷ متر می‌باشد. نتایج حاصل از هر شبیه‌سازی مشاهده و ثبت گردید، این اطلاعات شامل حداکثر عمق آبشستگی در رسوبات پایین‌دست سرریز و پروفیل طولی آبشستگی در پایان زمان ۲۰ دقیقه در جدول (۲) است. در جدول (۲)، مقادیر حداکثر عمق آبشستگی طی زمان و مقادیر آبشستگی به ازای فواصل ۵ سانتی‌متر از پایین‌دست سرریز کلید پیانویی برای مدل بهینه عددی (که از میان ۵ شبیه‌سازی انتخاب شده است) به همراه مقادیر حاصل از مطالعه آزمایشگاهی ارائه شده است.

مقادیر مربوط به حداکثر عمق آبشستگی در هر دقیقه تا پایان شبیه‌سازی و پروفیل طولی آبشستگی برای هر یک از مدل‌سازی‌های انجام شده در نرم‌افزار Tecplot فراخوانی و در قالب نمودارهایی با نتایج مشابه آزمایشگاهی مقایسه شد. همچنین معیارهای جذر میانگین مربعات

بهبتر لبه تاج سرریز در نرم‌افزار است. شرایط مرزی به کار برده شده در این مدل‌سازی برای مرز ورودی Volume flow rate  $X_{min}$ ، در مرز خروجی Specified pressure  $X_{max}$ ، مرز Wall  $Y_{min}$  و  $Y_{max}$ ، Symmetry، مرز Wall  $Z_{min}$  و  $Z_{max}$  می‌باشد، در شکل (۶) شبکه‌بندی بکار رفته در مدل‌سازی مذکور قابل مشاهده است. همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود برای اعمال رسوبات به مدل عددی یک مکعب مستطیل به ترتیب با طول، عرض و ارتفاع ۱۰۰، ۷۵ و ۴۲/۵ با فرمت STL در نرم‌افزار 3D-Flow به عنوان بسته رسوبی اضافه شد.

### ۳- کالیبراسیون انتقال رسوب و آبشستگی پایین‌دست سرریز کلید پیانویی

پس از صحت‌سنجی نرم‌افزار Flow-3D از نظر عملکرد صحیح در شبیه‌سازی هیدرولیکی جریان عبوری از سرریز کلید پیانویی و دبی عبوری، سپس دریافت و ارائه نتایج قابل قبول از مدل‌سازی‌های صورت گرفته، به کالیبراسیون آبشستگی پایین‌دست سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای با بهره‌گیری از مطالعه آزمایشگاهی قدسیان و همکاران (۲۰۲۱) پرداخته شد. در این بخش ۵ شبیه‌سازی عددی اجرا شد که از این تعداد ۳ شبیه‌سازی در جهت رسیدن به مش بهینه برای صحت‌سنجی انتقال رسوب و آبشستگی با اعمال مدل آشفستگی RNG (علت انتخاب مدل آشفستگی RNG در ابتدا، قابلیت‌های این مدل آشفستگی در شبیه‌سازی بوده است) و با استفاده از مدل

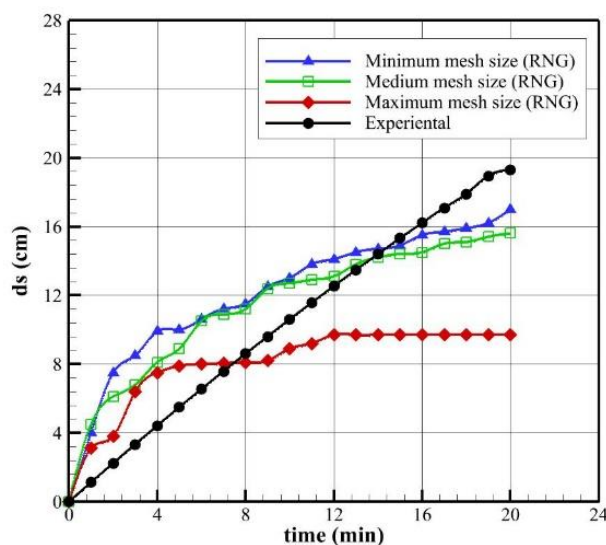
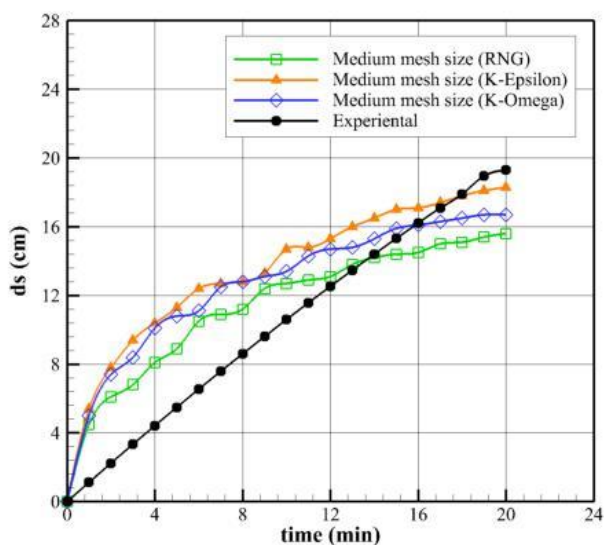
جدول ۲. پروفیل طولی آبشستگی و تغییرات زمانی عمق آبشستگی در پایین دست سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای.

**Table 2. Longitudinal scour profile and temporal changes of scour depth in downstream of the trapezoidal piano key weir.**

time (min)	dsm in Flow-3D Model (m)	dsm in Experimental (m)	Distance (cm)	Scouring depth in Flow-3D model	Scouring depth in Experimental
صفر	صفر	صفر	صفر	-/۳۳۸۸	-/۳
۱	۰/۰۵۴	۰/۰۱۱۲	۵	-/۲۹۱۲۶	-/۲۲۷
۵	۰/۰۷۸	۰/۰۲۲۳	۱۰	-/۲۶۵۳	-/۲۵۸۵
۳	۰/۰۹۴	۰/۰۳۳۴	۱۵	-/۲۴۶۶۸	-/۲۴
۴	۰/۱۰۵	۰/۰۴۴۲	۲۰	-/۲۴۰۷	-/۲۲۸۷
۵	۰/۱۱۳	۰/۰۵۵	۲۵	-/۲۴۶۸	-/۲۳
۶	۰/۱۲۴	۰/۰۶۵۴	۳۰	-/۲۶۲۵۴	-/۲۴۳۵
۷	۰/۱۲۷	۰/۰۷۶	۳۵	-/۲۷۹۴	-/۲۶۵۳
۸	۰/۱۲۸	۰/۰۸۶۲	۴۰	-/۳۰۶۱۲	-/۲۸۴۲
۹	۰/۱۳۳	۰/۰۹۶۱	۴۵	-/۳۴۷۷۳	-/۳۰۳۲
۱۰	۰/۱۴۷	۰/۱۰۶	۵۰	-/۳۸۰۴۲	-/۳۲۷۵۵
۱۱	۰/۱۴۸	۰/۱۱۵۷	۵۵	-/۳۸۹	-/۳۵۰۲
۱۲	۰/۱۵۳	۰/۱۲۵۳	۶۰	-/۳۹۲۳۱	-/۳۷
۱۳	۰/۱۶	۰/۱۳۴۴	۶۵	-/۳۹۵۳	-/۳۸۷
۱۴	۰/۱۶۵	۰/۱۴۴	۷۰	-/۳۹۸	-/۴۰۳۳
۱۵	۰/۱۷	۰/۱۵۳۲	۷۵	-/۴۰۱	-/۴۱۴۲
۱۶	۰/۱۷۱	۰/۱۶۲۱	۸۰	-/۴۰۴۲	-/۴۱۹۶
۱۷	۰/۱۷۴	۰/۱۷۱	۸۵	-/۴۰۷	-/۴۲۵
۱۸	۰/۱۷۸	۰/۱۷۹	۹۰	-/۴۱۳	-/۴۲۷
۱۹	۰/۱۸۱	۰/۱۸۹۵	۹۵	-/۴۲۲	-/۴۳۱
۲۰	۰/۱۸۳	۰/۱۹۳	۱۰۰	-/۴۲۸	-/۴۳۲

نرم‌افزار Flow-3d صورت گرفت که مقادیر بدست آمده برای پروفیل طولی آبشستگی و نمودار زمانی بیشینه عمق آبشستگی بدست آمده بعد از استخراج معیارهای جذر میانگین مربعات خطا RMSE، میانگین قدرمطلق خطا MAE و ضریب تعیین  $R^2$  برای پنج شبیه‌سازی عددی صورت گرفته استخراج شد. جدول (۳) معیارهای جذر میانگین مربعات خطا RMSE، میانگین قدرمطلق خطا MAE و ضریب تعیین  $R^2$  را برای مدل بهینه نمایش می‌دهد، بنابراین در شبیه‌سازی‌های مورد نظر در رابطه با آبشستگی پایین دست سرریزهای کلید پیانویی از سایز مشی که در نوع شبکه‌بندی Medium mesh size بکار رفته و مدل آشفستگی K- $\epsilon$  استفاده می‌شود.

خطا RMSE، میانگین قدرمطلق خطا MAE و ضریب تعیین  $R^2$  برای هر یک از شبیه‌سازی‌های صورت گرفته بدست آمده و برای انتخاب مش بهینه و مدل آشفستگی مناسب مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. شکل‌های (۷) و (۸) نمودار تغییرات زمانی بیشینه عمق آبشستگی رسوبات و پروفیل طولی آبشستگی در انتهای زمان شبیه‌سازی را در پایین دست سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای برای هر پنج مدل‌سازی عددی صورت گرفته نمایش می‌دهند. به صورت کلی بعد از انجام شبیه‌سازی‌ها در جهت انتخاب شبکه‌بندی مناسب و انتخاب Medium mesh size به عنوان مش بهینه، دو شبیه‌سازی جهت انتخاب مناسب‌ترین مدل آشفستگی برای کالیبراسون



شکل ۷. مقایسه نمودار تغییرات زمانی عمق آبشستگی برای سه نوع شبکه‌بندی مختلف در شکل سمت چپ، و سه مدل آشفستگی K- $\omega$  و RNG، K- $\epsilon$  در شکل سمت راست.

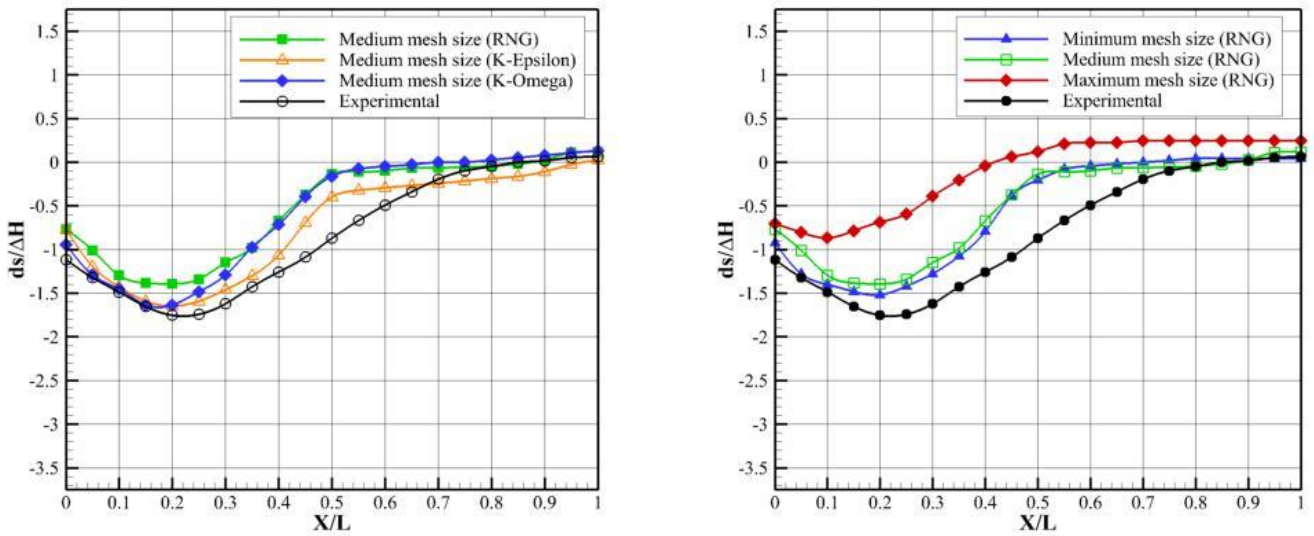
Fig. 7. Comparison of the graph of time changes of scour depth for three different grid types in the left Fig., and three RNG, K- $\epsilon$  and K- $\omega$  disturbance models in the right Fig..

در این پژوهش مدل‌سازی عددی آبشستگی پایین‌دست سرریزهای کلید پیانویی مثلثی و دوزنقه‌ای به ازای تغییرات دبی و عمق پایاب مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت، برای رسیدن به این هدف تعداد ۱۸ شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D صورت پذیرفت که مشخصات شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در جدول (۵) آمده که شامل:

شماره شبیه‌سازی، نوع شبیه‌سازی (TRA: دوزنقه‌ای، TRI: مثلثی)، دبی عبوری از سرریز (Q)، عمق پایاب (ht)، ارتفاع آب لبه تاج سرریز (H) و اختلاف ارتفاعی سطح آب در پایین‌دست سرریز و لبه تاج سرریز ( $\Delta H$ ) است.

شرایط اولیه اعمال شده به مدل‌ها برای سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای و مثلثی شامل ارتفاع آب بالادست و پایین‌دست سرریزهای کلید پیانویی است. این شرایط برای هر دو نوع سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای و مثلثی در پایین‌دست شامل هد آب ۰/۳، ۰/۳۲۵ و ۰/۳۵ متر و در بالادست ارتفاع سطح آب ۰/۴۷ متر می‌باشد. شرایط اولیه اعمال شده در بالادست سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای و مثلثی در نرم‌افزار اتوکد ترسیم شده و با فرمت STL در بخش مربوط به اعمال شرایط اولیه در مدل عددی Flow-3D فراخوانی شده است.

برای بررسی آبشستگی پایین‌دست سرریزهای کلید پیانویی با نرم‌افزار Flow-3D از مشخصات منتخب شامل نوع شبکه‌بندی، سایز مش‌ها در مدل‌سازی و مدل آشفستگی می‌باشد که نزدیک‌ترین نتایج را به مطالعه آزمایشگاهی مورد نظر در اختیار ما قرار داده‌اند. در این پژوهش از دو سرریز کلید پیانویی مثلثی و دوزنقه‌ای نوع A شامل مشخصاتی که در جدول (۴) آمده استفاده شد. سرریزهای مذکور به‌علاوه‌ی رسوبات پایین‌دست و حجم آب بالادست هر دو نوع سرریز مثلثی و دوزنقه‌ای در نرم‌افزار Auto CAD 2022 ترسیم سپس با فرمت STL که فرمت قابل اجرا برای نرم‌افزار Flow-3D است ذخیره و در نرم‌افزار Flow-3D فراخوانی شد. سرریزهای کلید پیانویی طراحی شده روی سکویی به ارتفاع  $Pd = 0.25 \text{ m}$  واقع شده‌اند و به منظور بررسی آبشستگی پایین‌دست سرریزهای کلید پیانویی از ماسه یکنواخت با قطر میانگین  $d_{50} = 0.0164 \text{ m}$  استفاده شد. طول بستر فرسایش‌پذیر پایین‌دست سرریز ۱ متر با عرض ۰/۶ و ارتفاع ۰/۲۵ متر می‌باشد، همچنین طول کانال و آب بالادست سرریزها به ترتیب ۰/۵ و ۰/۴ متر از پایه و لبه تاج بالادست سرریزهای کلید پیانویی انتخاب شده است. شکل (۹) دو نوع سرریز کلید پیانویی مثلثی و دوزنقه‌ای به همراه حجم آب بالادست و رسوبات پایین‌دست را نمایش می‌دهد.



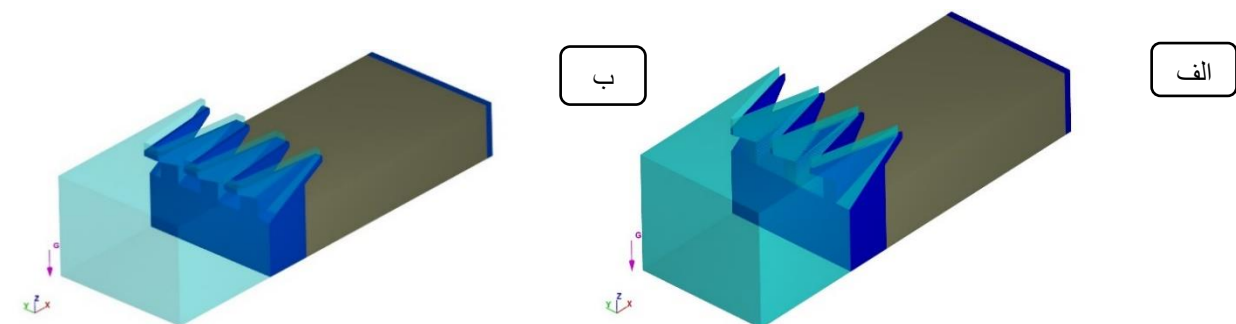
شکل ۸. مقایسه پروفیل طولی آبشستگی بی‌بعد، در پایان ۲۰ دقیقه شبیه‌سازی عددی برای سه نوع شبکه‌بندی مختلف شکل سمت چپ و سه نوع مدل آشفتگی مورد استفاده در شکل سمت راست

Fig. 8. Comparison of the longitudinal scour profile without unit, at the end of 20 minutes of numerical simulation for three different types of grids in the left Fig. and three types of turbulence models used in the right Fig.

جدول ۳. معیارهای جذر میانگین مربعات خطا RMSE، میانگین قدرمطلق خطا MAE و ضریب تعیین R2 برای مدل عددی منتخب.

Table 3. The measures of root mean square error RMSE, mean absolute value of error MAE and determination coefficient R2 extracted for the selected numerical model.

Parameter	$ds_m$	Profile of Scour
RMSE	۳/۷۷	۰/۲۰۵۶
MAE	۳/۱۵	۰/۱۶۸
R <sup>2</sup>	۰/۸۷۳۱	۰/۹۳۳۸



شکل ۹. شرایط اولیه آب بالادست سرریز و رسوبات در پایین‌دست سرریزهای کلید بیانونی مدل شده، الف: سرریز کلید بیانونی ذوزنقه‌ای، ب: سرریز کلید بیانونی مثلثی.

Fig. 9. Initial water conditions upstream of the weir and sediments downstream of the modeled piano key weir, a: trapezoidal piano key weir, b: triangular piano key weir.

جدول ۴. مشخصات هندسی سرریز کلید پیانویی مثلثی و ذوزنقه‌ای.

Table 4. Geometric characteristics of triangular and trapezoidal piano key overflow.

Parameter	Values Weir	
	Trapezoidal	Triangular
Number of key of the weir (N)	۳	۳
Total width of the weir (W: m)	۰/۶	۰/۶
Width of the inlet key (W <sub>i</sub> : m)	۰/۰۵۵	۰/۲
Width of the outlet key (W <sub>o</sub> : m)	۰/۱۴۵	-
Sidewall thickness (T <sub>s</sub> : m)	۰/۰۱۲	۰/۱۲
Lateral length of the weir (B: m)	۰/۴	۰/۴
Upstream and Downstream overhang length (B <sub>i</sub> and B <sub>o</sub> : m)	۰/۱	۰/۱
Height of the PKW crest (P:m)	۰/۱۸	۰/۱۸
Slope of the inlet and outlet key (S <sub>i</sub> and S <sub>o</sub> : degree)	۳۲	۳۲

جدول ۵. مشخصات هیدرولیکی شبیه‌سازی‌های عددی صورت گرفته با نرم‌افزار 3D-Flow.

Table 5. Hydraulic characteristics of numerical simulations made with Flow-3D software.

Test No	Test Names	Q (Lit/s)	ht (m)	H (m)	ΔH (m)
1	TRI 1	۰/۲۵	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۱۷
2	TRI 2	۰/۲۵	۰/۰۷۵	۰/۰۴	۰/۱۴۵
3	TRI 3	۰/۲۵	۰/۱	۰/۰۴	۰/۱۲
4	TRI 4	۰/۳۵	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۱۷
۵	TRI 5	۰/۳۵	۰/۰۷۵	۰/۰۴	۰/۱۴۵
۶	TRI 6	۰/۳۵	۰/۱	۰/۰۴	۰/۱۲
۷	TRI 7	۰/۴۵	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۱۷
۸	TRI 8	۰/۴۵	۰/۰۷۵	۰/۰۴	۰/۱۴۵
۹	TRI 9	۰/۴۵	۰/۱	۰/۰۴	۰/۱۲
۱۰	TRA 1	۰/۲۵	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۱۷
۱۱	TRA 2	۰/۲۵	۰/۰۷۵	۰/۰۴	۰/۱۴۵
۱۲	TRA 3	۰/۲۵	۰/۱	۰/۰۴	۰/۱۲
۱۳	TRA 4	۰/۳۵	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۱۷
۱۴	TRA 5	۰/۳۵	۰/۰۷۵	۰/۰۴	۰/۱۴۵
۱۵	TRA 6	۰/۳۵	۰/۱	۰/۰۴	۰/۱۲
۱۶	TRA 7	۰/۴۵	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۱۷
۱۷	TRA 8	۰/۴۵	۰/۰۷۵	۰/۰۴	۰/۱۴۵
۱۸	TRA 9	۰/۴۵	۰/۰۷۵	۰/۰۴	۰/۱۲



#### ۴- انجام تحقیق و ارائه یافته‌ها

حاصل شده بیشترین کاهش موضعی در تراز بستر در هر سه دبی ۲۵، ۳۵ و ۴۵ لیتر بر ثانیه و عمق‌های پایاب ۰/۰۵، ۰/۰۷۵ و ۰/۱ متر در پایین‌دست سرریز کلید پیاپایی مثلثی رخ داده است.

با توجه به نتایج حاصل شده از مدل‌سازی عددی آبستتگی پایین‌دست سرریزهای کلید پیاپایی، تغییرات موضعی سطح بستر پایین‌دست در سرریز کلید پیاپایی دوزنقه‌ای برای تمام شرایط هیدرولیکی مدل‌سازی شده کمتر از سرریز کلید پیاپایی مثلثی بوده و بین ۱۲٪ تا ۲۵٪ متغیر است. اختلاف حداکثر عمق آبستتگی پایین‌دست بین سرریز کلید پیاپایی دوزنقه‌ای و مثلثی به همراه درصد اختلاف بیشینه عمق آبستتگی بستر رسوبی بین دو سرریز کلید پیاپایی دوزنقه‌ای و مثلثی در جدول (۶) مشاهده می‌شود.

با افزایش عمق پایاب، بیشینه عمق آبستتگی در پایین‌دست هر دو نوع از سرریزهای کلید پیاپایی مثلثی و دوزنقه‌ای به ازای دبی ثابت کاهش یافته است. افزایش عمق پایاب موجب اتلاف انرژی جت‌های ریزشی از سرریز شده و با کاهش ظرفیت حمل رسوبات بستر توسط جریان آب، باعث کاهش بیشینه عمق آبستتگی در پایین‌دست سرریزهای مورد نظر می‌شود. در صورتی که در عمق پایاب ثابت با افزایش دبی عبوری از سرریز عمق حفره آبستتگی افزایش می‌یابد. کاهش تراز بستر رسوبی پایین‌دست سرریز کلید پیاپایی دوزنقه‌ای به ترتیب در دبی‌های ۲۵، ۳۵ و ۴۵ لیتر بر ثانیه با افزایش ۱/۵ برابری عمق پایاب، ۱۱٪، ۱۱/۴۶٪ و ۸٪ و با افزایش ۲ برابری عمق پایاب، ۲۹٪، ۱۴٪ و ۱۰٪ کاهش می‌باشد، همچنین برای سرریز کلید پیاپایی مثلثی با افزایش ۱/۵ برابری عمق پایاب، ۲۰٪، ۱۲/۸٪ و ۱۰٪ و با افزایش ۲ برابری عمق پایاب عمق حفره آبستتگی در پایین‌دست سرریز کلید پیاپایی مثلثی به میزان‌های ۲۶/۶٪، ۱۸/۸٪ و ۱۱/۷۴٪ کاهش پیدا کرد است. تاثیرات دبی نیز به ترتیب در سه عمق پایاب ۰/۰۵، ۰/۰۷۵ و ۰/۱ متر در سرریز کلید پیاپایی دوزنقه‌ای با کاهش ۲۲ درصدی دبی عبوری از سرریز ۱۱/۳٪، ۱۴/۲٪ و ۱۵٪ کاهش عمق حفره آبستتگی و با کاهش ۴۴ درصدی دبی عبوری از سرریز به میزان‌های ۲۳/۷٪، ۲۵/۹٪ و ۴۰٪ کاهش در بیشینه عمق آبستتگی بستر پایین‌دست سرریز کلید پیاپایی دوزنقه‌ای و در مدل‌سازی عددی آبستتگی پایین‌دست سرریز کلید پیاپایی مثلثی با کاهش ۲۲ و ۴۴ درصدی دبی عبوری از سرریز به ترتیب ۱۲٪، ۱۴٪ و ۱۹٪ کاهش و به میزان‌های ۲۴/۸٪، ۳۳/۵٪ و ۳۷/۴٪ کاهش در بیشینه عمق آبستتگی به ترتیب در عمق‌های پایاب ۰/۰۵، ۰/۰۷۵ و ۰/۱ متر مشاهده شد. برای درک بهتر تاثیر تغییرات دبی و عمق پایاب بر عمق حفره آبستتگی، شکل (۱۱) به صورت نمودار ارائه گردیده است. در شکل

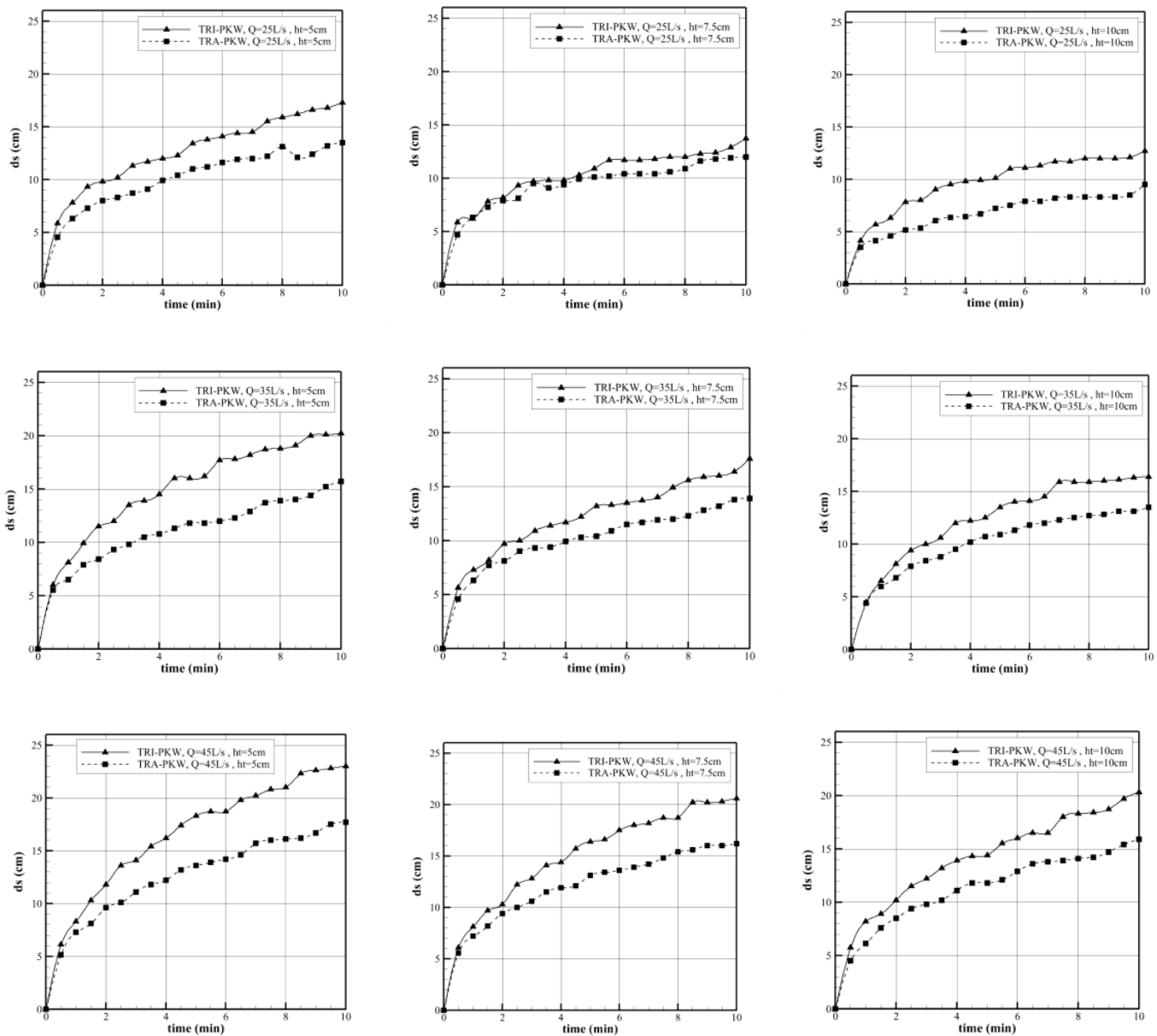
مختصات شبکه محاسباتی اعمال شده به مدل‌ها در نرم‌افزار Flow-3D شامل  $X_{min}:0/0m, X_{max}:1/73m, Y_{min}:0/0m, Y_{max}:0/6m, Z_{min}:0/0m, Z_{max}:0/5m$  است. شبکه‌بندی مورد استفاده در این پژوهش مطابق با مش‌سایزهای منتخب در صحت‌سنجی انتخاب گردید. همچنین شرایط مرزی سانتخاب شده برای شش وجه شبکه محاسباتی اصلی به صورت زیر است:

- شرط مرزی بالادست (ورودی)؛ در این قسمت شرط مرزی Volume flow rate انتخاب شد که در این مرز دبی عبوری و ارتفاع سطح آب وارد شد.
- شرط مرزی پایین‌دست (خروجی)؛ در این بخش شرط مرزی Specified pressure انتخاب شد و ارتفاع سطح آب در مرز خروجی نیز وارد گردید.
- شرط مرزی برای دیواره‌ها و کف کانال؛ برای این قسمت‌ها  $(Z_{min}, Y_{max}, Y_{min})$  شرط مرزی Wall انتخاب شد.
- شرط مرزی سطح آزاد؛ در بخش بالای کانال  $Z_{max}$  از این شرط مرزی بهره گرفته شد.

برای هر شش وجه مش‌بلوک فرعی (تو در تو) شرط مرزی سطح آزاد Symmetry جهت تبادل اطلاعات بین دو مش‌بلوک مورد استفاده قرار گرفت. بعد از انجام شبیه‌سازی‌های نام برده در جدول ۸ پیغام Solution is nearly steady در زمان شبیه‌سازی کمتر از ۶۰۰ ثانیه توسط نرم‌افزار Flow-3D نمایش داده شد که حاکی از رسیدن شبیه‌سازی به پایداری می‌باشد، بنابراین شبیه‌سازی‌ها عددی در زمان ۶۰۰ ثانیه متوقف شدند. نتایج مورد نظر شامل تغییرات زمانی عمق آبستتگی پایین‌دست سرریزهای کلید پیاپایی دوزنقه‌ای و مثلثی، پروفیل طولی آبستتگی در پایان زمان شبیه‌سازی و پروفیل عرضی آبستتگی استخراج و ارائه شده است. در پژوهش حاضر آبستتگی پایین‌دست سرریزهای کلید پیاپایی دوزنقه‌ای و مثلثی با تغییر در دبی و عمق پایاب مورد مقایسه قرار گرفته است.

#### ۵- نتایج و بحث

نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D شامل تغییرات زمانی بیشینه عمق حفره آبستتگی نسبت به زمان در سرریزهای کلید پیاپایی دوزنقه‌ای و مثلثی است. شکل (۱۰) این نتایج را برای هر دو سرریز مورد نظر به صورت نمودار نمایش می‌دهد. طبق نتایج



شکل ۱۰. نمودار توسعه زمانی حفره آبشستگی در ۱۰ دقیقه برای سرریزهای کلید پیانویی ذوزنقه‌ای و مثلثی.

Fig. 10. Time development graph of scour hole in 10 minutes for trapezoidal and triangular piano key weirs.

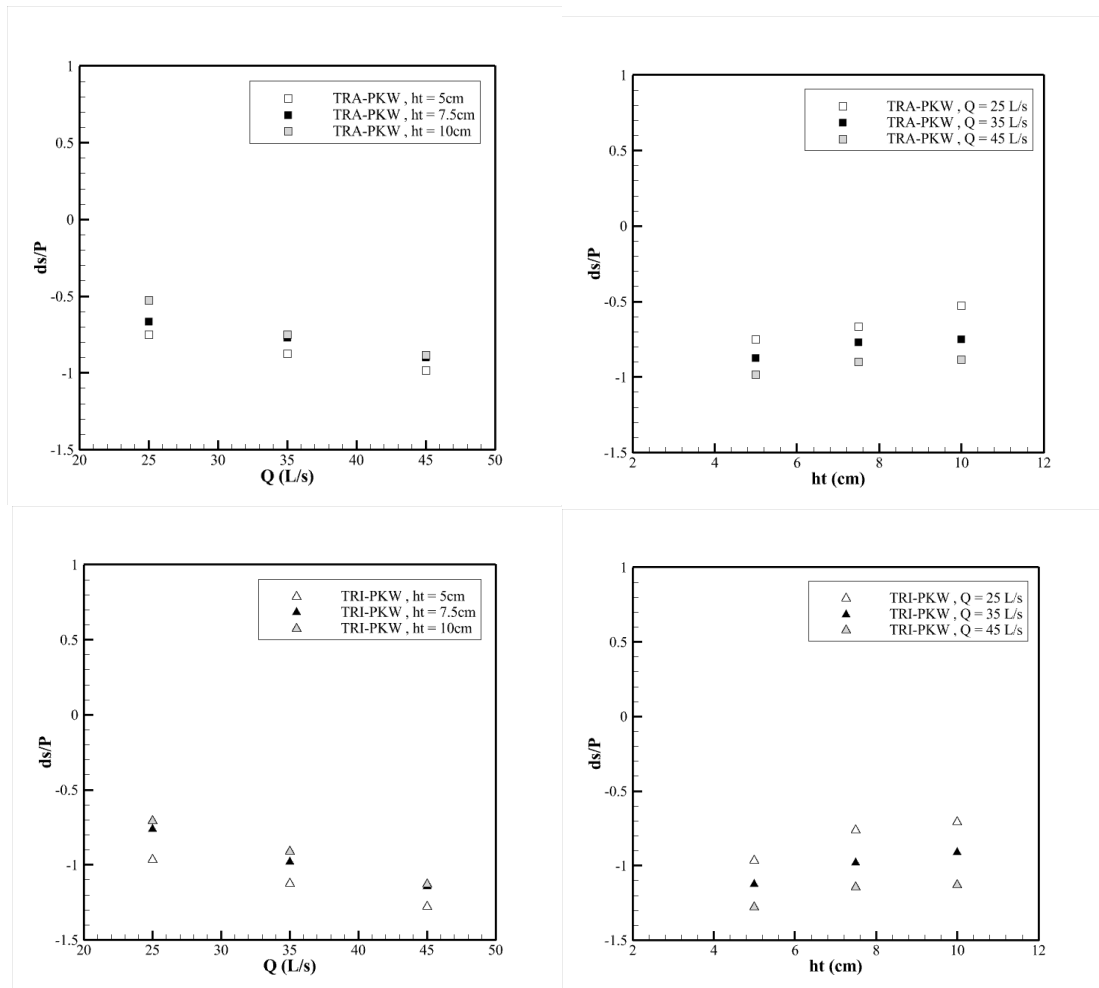
از سرریزهای کلید پیانویی ذوزنقه‌ای و مثلثی با هر میزان از عمق پایاب نتایج افزایش بیشینه عمق حفره بستر رسوبی به یکدیگر نزدیک می‌شود و برعکس در مدل‌سازی‌های انجام شده برای هر دو نوع سرریز در هر دبی با افزایش عمق پایاب تغییرات بیشینه عمق آبشستگی با یک الگوی ثابت تغییر کرده است.

(۱۱) محور عمودی عمق بی‌بعد شده آبشستگی پایین‌دست سرریز با ارتفاع سرریز و محور افقی مقدار دبی و عمق پایاب را نمایش می‌دهد. همان‌طور که از نتایج برداشت می‌شود افزایش عمق پایاب در مدل‌سازی‌ها در حالت کمترین میزان دبی جریان عبوری از سرریز بیشترین تاثیر را در کاهش بیشینه عمق آبشستگی پایین‌دست هر دو نوع سرریز کلید پیانویی ذوزنقه‌ای و مثلثی داشته است. با توجه به نمودارهای شکل (۱۱) با افزایش دبی عبوری

جدول ۶. مقایسه حداکثر عمق آبشستگی شبیه‌سازی شده برای دو نوع سرریز کلید پیاونوی دوزنقه‌ای و مثلثی توسط نرم‌افزار 3D-Flow.

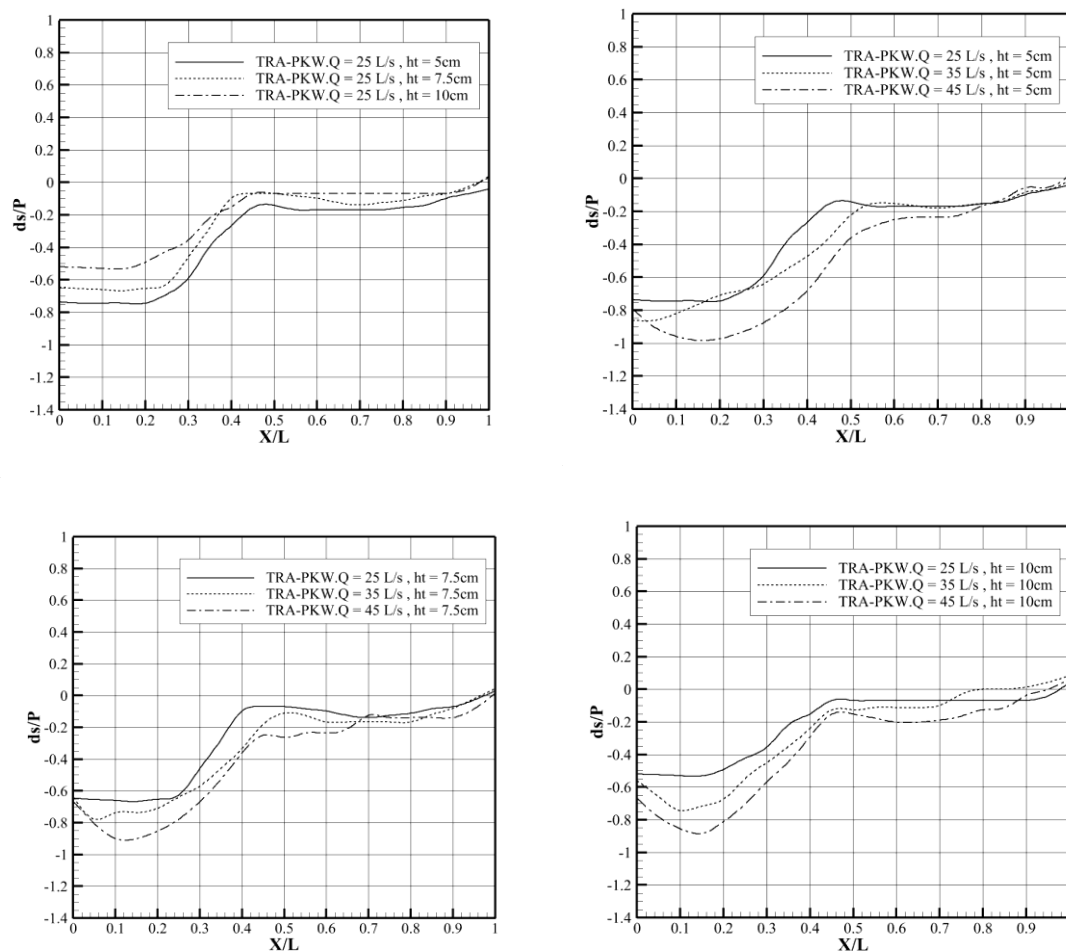
Table 6. Comparison of the maximum scour depth simulated for two types of trapezoidal and triangular piano key weir by Flow-3D software

Test No	Maximum flow depth TRI-PKW (m)	Maximum flow depth TRA-PKW (m)	درصد اختلاف بیشینه عمق آبشستگی
Q=25 liter , h <sub>t</sub> =5cm	۰/۱۷۳	۰/۱۳۵	۲۱/۷۹
Q=25 liter , h <sub>t</sub> =7.5 cm	۰/۱۳۷	۰/۱۱۲	۱۲/۷۴
Q=25 liter , h <sub>t</sub> =10 cm	۰/۱۲۷	۰/۰۹۵	۲۵/۷۲
Q=35 liter , h <sub>t</sub> =5 cm	۰/۲۰۲	۰/۱۵۷	۲۲/۷۲
Q=35 liter , h <sub>t</sub> =7.5 cm	۰/۱۷۶	۰/۱۳۹	۷/۲۱
Q=35 liter , h <sub>t</sub> =10 cm	۰/۱۶۴	۰/۱۳۵	۱۷/۷۷
Q=45 liter , h <sub>t</sub> =5 cm	۰/۲۳۴	۰/۱۷۷	۷/۲۳
Q=45 liter , h <sub>t</sub> =7.5 cm	۰/۲۰۶	۰/۱۶۲	۲۱/۷۳
Q=45 liter , h <sub>t</sub> =10 cm	۰/۲۰۳	۰/۱۵۹	۲۱/۷۷



شکل ۱۱. نمودار تغییرات عمق حفره آبشستگی به ازای افزایش عمق پایاب و افزایش دبی عبوری از سرریز.

Fig. 11. The graph of changes in the depth of the scour hole due to the increase in the depth of the footing and the increase in the flow through the weir.



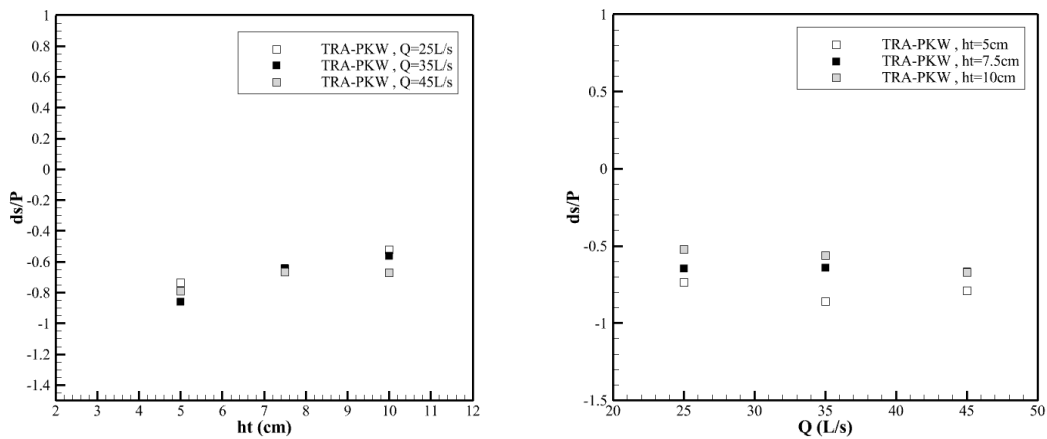
شکل ۱۲. پروفیل طولی آبشستگی پایین دست سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای

Fig. 12. Longitudinal profile of scour downstream of trapezoidal piano key weir.

دوزنقه‌ای مشخص شد که بیشینه عمق آبشستگی به ترتیب در دبی‌های ۲۵، ۳۵ و ۴۵ لیتر بر ثانیه با افزایش ۱/۵ برابری عمق پایاب ۱۵٪، ۰/۰٪ و ۰/۰٪ در فاصله بیشتری از پایه سرریز ایجاد شده سپس با افزایش ۲ برابری عمق پایاب به میزان ۱۵٪، ۵٪ و ۰/۰٪ افزایش فاصله بیشینه عمق آبشستگی از پایه سرریز مشاهده شد. طبق پروفیل طولی آبشستگی موجود در شکل (۱۲) برای دبی ۴۵ لیتر بر ثانیه افزایش عمق پایاب تغییر محسوسی در فاصله بیشینه عمق حفره آبشستگی از پایه سرریز ایجاد نمی‌کند و فقط بر ابعاد حفره آبشستگی تاثیر گذار است. این در حالی است که در دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه و عمق پایاب ۰/۰۵ متر اختلاف بین بیشینه عمق آبشستگی و حداکثر عمق بستر در لبه پایه سرریز کمتر از ۰/۰۳ متر است و می‌توان گفت بیشینه عمق آبشستگی در لبه پایه سرریز اتفاق افتاده است.

## ۶- پروفیل طولی آبشستگی

در پایین دست سرریز، جریان عبوری از روی بستر رسوبی، باعث آبشستگی بستر می‌شود. محل آغاز آبشستگی بی‌درنگ پس از دیواره سرریز می‌باشد. با گذشت زمان، ابعاد حفره آبشستگی بزرگ‌تر شده و جریان عبوری درون این حفره به صورت جریان چرخشی در می‌آید. پروفیل طولی آبشستگی پایین دست سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای در حالت‌های مختلف مدل‌سازی شده، مورد مقایسه قرار گرفت و تاثیر شرایط هیدرولیکی مختلف بر کیفیت و کمیت حفره آبشستگی در بستر رسوبی بررسی شد. شکل (۱۲) پروفیل طولی آبشستگی بستر فرسایشی پایین دست را برای سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای نمایش می‌دهد. با بررسی پروفیل طولی آبشستگی پایین دست سرریز کلید پیانویی



شکل ۱۳. نمودار تغییرات آبستگي در لبه پایه سرریز کلید پيانویی دوزنقه‌ای در ازای تغییرات دبی و عمق پایاب.

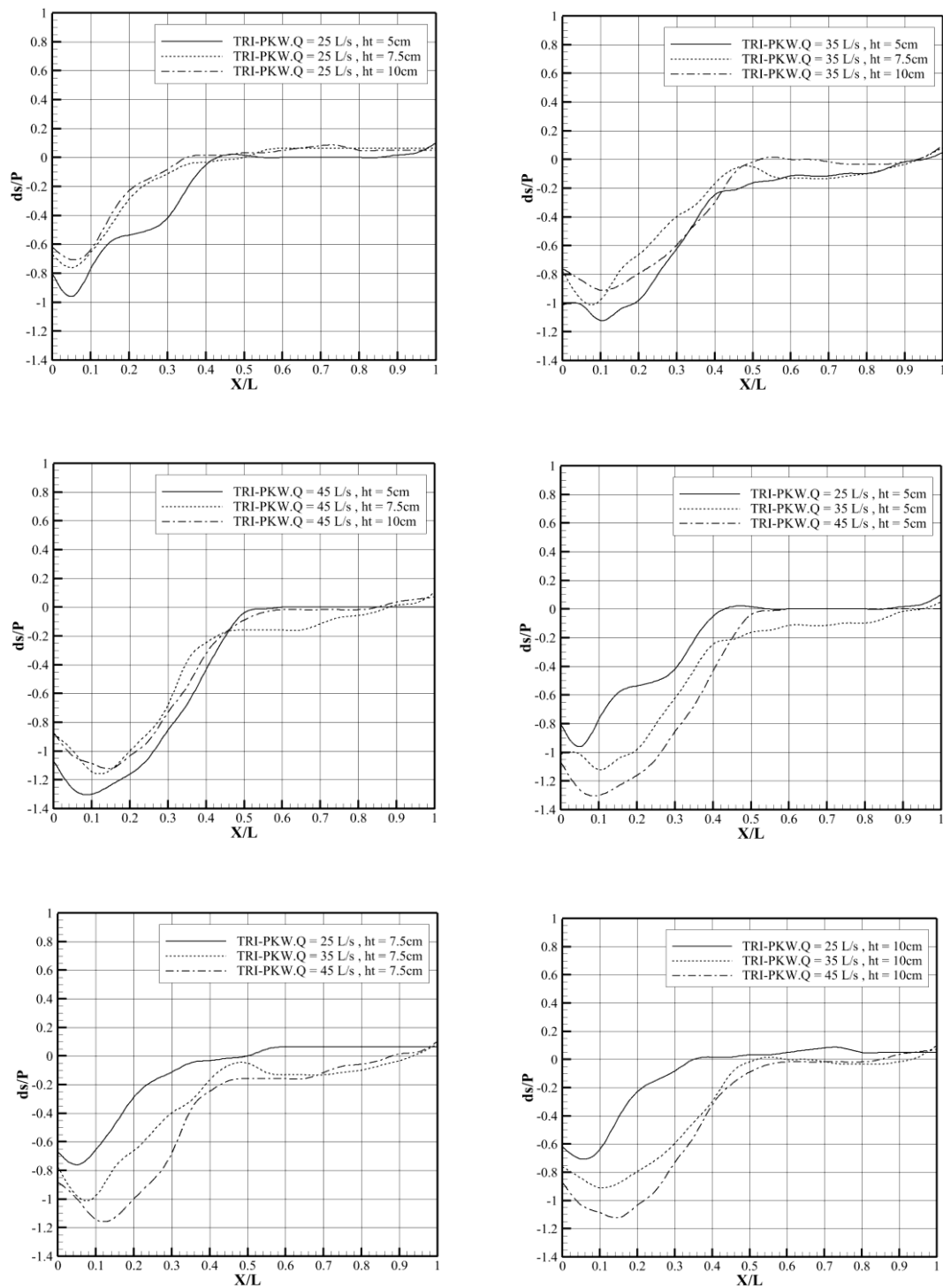
Fig. 13. The diagram of scouring changes at the base edge of the trapezoidal piano key weir in exchange for changes in flow rate and depth of abutment.

این افزایش عمق آبستگي با افزایش ۸۰ درصدی دبی بیشتر شده و برابر با ۱۵٪، ۱۱/۶٪ و ۶۹٪ می‌باشد. در حالت دبی ثابت به ترتیب برای دبی‌های ۲۵، ۳۵ و ۴۵ لیتر بر ثانیه با افزایش ۱/۵ برابری عمق پایاب ۱۳٪، ۱۹٪ و ۱۵/۸٪ کاهش عمق آبستگي در لبه پایه سرریز رخ داده و با بیشتر شدن عمق پایاب به میزان ۲ برابر مقدار اولیه ۴۲٪، ۲۹٪ و ۱۵/۸٪ کاهش در عمق آبستگي در لبه پایه سرریز کلید پيانویی دوزنقه‌ای ایجاد شد. در شکل (۱۳) تغییرات آبستگي لبه پایه سرریز به صورت نمودار در ازای تغییرات دبی و عمق پایاب نمایش داده شده است، که محور افقی تغییرات دبی و عمق پایاب و محور عمودی میزان آبستگي بستر در لبه پایه سرریز کلید پيانویی دوزنقه‌ای را نشان می‌دهد.

پروفیل طولی آبستگي پایین‌دست سرریز کلید پيانویی مثلثی در شرایط هیدرولیکی مختلف استخراج شده و به صورت شکل (۱۴) قابل نمایش است. با توجه به پروفیل طولی آبستگي پایین‌دست سرریز کلید پيانویی مثلثی در دبی‌های ۲۵، ۳۵ و ۴۵ لیتر بر ثانیه با افزایش ۱/۵ برابری عمق پایاب، ۵٪ افزایش در فاصله بیشینه عمق آبستگي از پایه سرریز ایجاد می‌شود، این در حالی است که با افزایش ۲ برابری عمق پایاب افزایش فاصله بیشینه عمق آبستگي از پایه سرریز کلید پيانویی مثلثی در دبی ۲۵ و ۳۵ لیتر بر ثانیه نسبت به حالت قبل تغییری نمی‌کند، اما این تغییرات برای دبی‌های ۴۵ لیتر بر ثانیه بیشتر بوده و ۱۰٪ است.

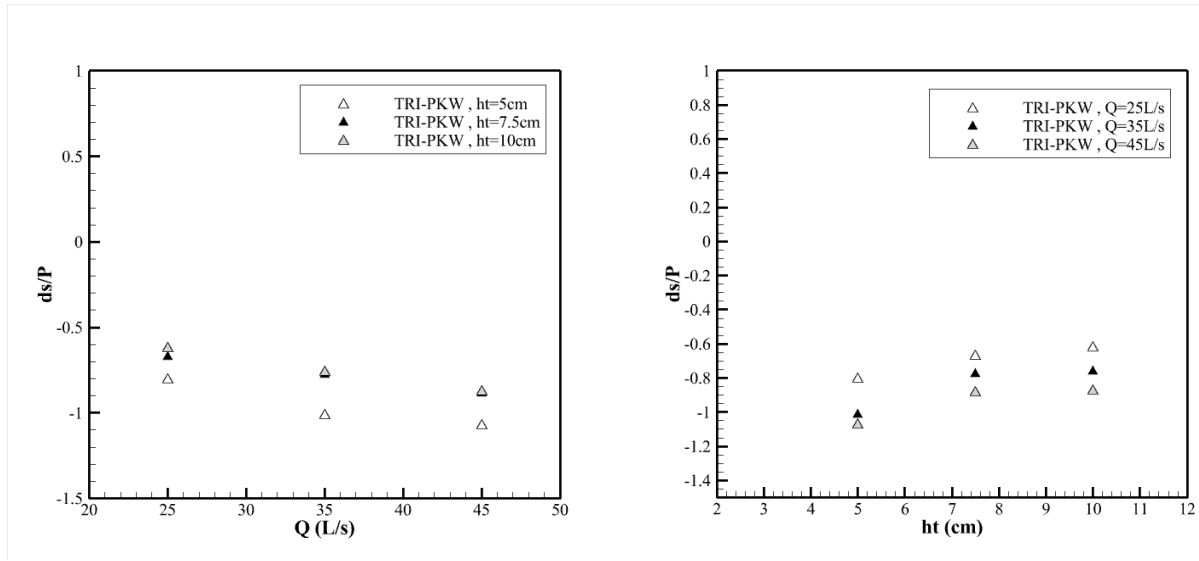
طول حفره آبستگي پایین‌دست سرریز کلید پيانویی دوزنقه‌ای با ایجاد تغییرات در دبی عبوری از سرریز و عمق پایاب افزایش یا کاهش پیدا می‌کند به این صورت که در عمق پایاب ثابت با افزایش دبی عبوری از سرریز طول حفره آبستگي افزایش می‌یابد در حالی که در دبی ثابت با افزایش عمق پایاب طول حفره آبستگي کمتر خواهد بود. طول حفره آبستگي برای دبی‌های ثابت ۲۵، ۳۵ و ۴۵ لیتر بر ثانیه با افزایش ۱/۵ برابری عمق پایاب ۵٪، ۵٪ و ۱۵٪ کمتر می‌شود، در حالی که با افزایش ۲ برابری عمق پایاب افزایش محسوسی در تغییرات طول حفره آبستگي ایجاد نمی‌شود و کاهش طول حفره آبستگي ۵٪، ۵٪ و ۱۵٪ است. به همین صورت با افزایش دبی در عمق‌های پایاب ثابت، به ترتیب در عمق‌های پایاب ۰/۰۵، ۰/۰۷۵ و ۰/۱ با افزایش ۴۰٪ در دبی عبوری از سرریز طول حفره آبستگي در هر سه عمق پایاب ۵٪ افزایش می‌یابد و با افزایش ۸۰٪ در دبی عبوری از سرریز کلید پيانویی دوزنقه‌ای ۱۵٪، ۵٪ و ۵٪ افزایش داشته است. با توجه به نتایج حاصل شده افزایش عمق پایاب در دبی‌های بالاتر و افزایش دبی در عمق‌های پایاب کمتر تاثیر بیشتری بر تغییر طول حفره آبستگي پایین‌دست سرریز کلید پيانویی دوزنقه‌ای داشته است.

یکی از پارامترهای مهم برای تحلیل آبستگي در پژوهش حاضر عمق آبستگي در محل لبه پایه سرریز می‌باشد. تغییرات این پارامتر در پایین‌دست سرریز کلید پيانویی دوزنقه‌ای در عمق‌های پایاب ۰/۰۵، ۰/۰۷۵ و ۰/۱ متر با افزایش ۴۰ درصدی دبی به ترتیب ۱۵٪، ۷٪ و ۴۲٪ افزایش داشته،



شکل ۱۴. پروفیل طولی آبشستگی پایین دست سرریز کلید پیانویی مثلثی در ازای تغییرات دبی و عمق پایاب.

Fig. 14. Longitudinal profile of the scour downstream of the triangular piano key weir in exchange for the changes in flow rate and depth.



شکل ۱۵. نمودار تغییرات آبشستگی در لبه پایه سرریز کلید پیانویی مثلثی در ازای تغییرات دبی و عمق پایاب.

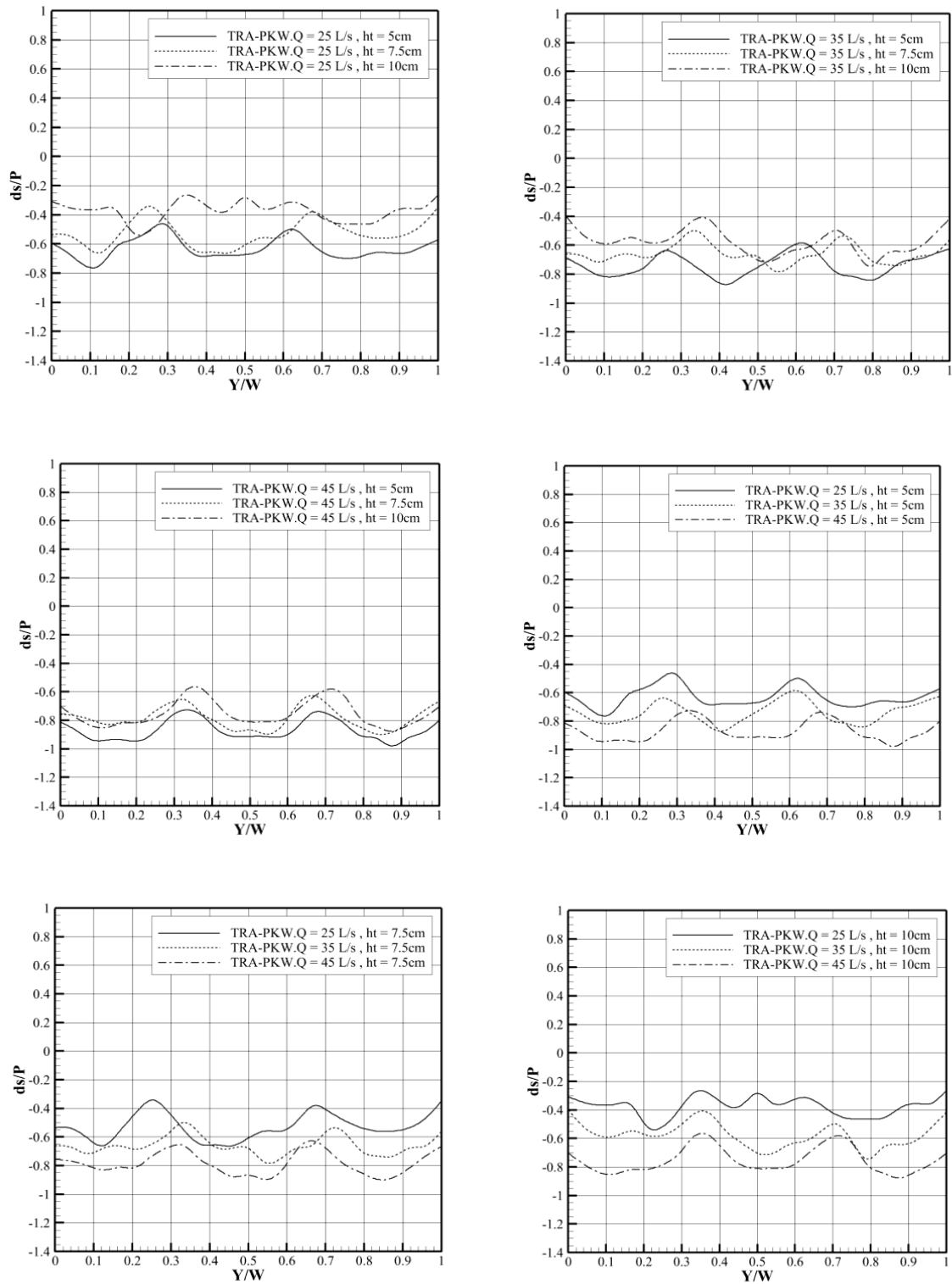
Fig. 15. The diagram of scouring changes at the base edge of the triangular piano key weir in exchange for the changes in flow rate and depth of abutment.

۰/۰۵ متر به ۰/۱ متر، این میزان کاهش طول در حفره نسبت به حالت عمق پایاب ۰/۰۷۵ متر تغییری ندارد و نتیجه برابر با ۰/۵٪ کاهش طول حفره، در رسوبات شسته شده بستر پایین دست سرریز می باشد.

میزان آبشستگی در پای سرریز کلید پیانویی مثلثی با افزایش عمق پایاب برای دبی های ۲۵، ۳۵ و ۴۵ لیتر بر ثانیه کاهش پیدا می کند، با تغییر عمق پایاب از ۰/۰۵ به ۰/۰۷۵ متر به ترتیب ۱۶/۵٪، ۲۳/۳٪ و ۱۷/۵٪ سپس با افزایش ۲ برابری عمق پایاب یعنی افزایش عمق پایاب از ۰/۰۵ به ۰/۱ متر موجب کاهش ۲۲/۷٪، ۲۵٪ و ۱۸/۵٪ در عمق آبشستگی لبه سرریز کلید پیانویی مثلثی می شود. در عمق های پایاب ثابت ۰/۰۵، ۰/۰۷۵ و ۰/۱ متر با افزایش ۴۰ درصدی دبی عبوری به ترتیب ۲۶٪، ۱۶٪ و ۲۲/۵٪ و با افزایش ۸۰ درصدی دبی ۳۳٪، ۳۱/۵٪ و ۴۰٪ افزایش عمق آبشستگی در لبه سرریز اتفاق افتاده است. برای نمایش و درک بهتر تغییرات آبشستگی لبه پایه سرریز کلید پیانویی مثلثی به صورت نمودار در شکل (۱۵) نمایش داده شده است. محور افقی تغییرات دبی و عمق پایاب و محور عمودی میزان آبشستگی بستر در لبه پایه سرریز را نشان می دهد.

در مقایسه صورت گرفته، با افزایش دبی به ترتیب در عمق های پایاب ثابت ۰/۰۵، ۰/۰۷۵ و ۰/۱ متر با افزایش ۴۰٪ دبی عبوری تغییرات فاصله بیشینه عمق حفره آبشستگی تا پایه سرریز در هر سه عمق پایاب ۰/۵ است و با افزایش ۸۰٪ دبی عبوری از سرریز به ترتیب ۰/۵٪، ۱۰٪ می باشد. بنابراین دو پارامتر دبی و عمق پایاب با فاصله بیشینه عمق حفره آبشستگی از پایه سرریز رابطه مستقیم دارند.

روند تغییرات طول حفره آبشستگی پایین دست سرریز کلید پیانویی مثلثی به گونه ای است که در صورت افزایش ۴۰٪ در دبی عبوری از سرریز برای هر سه عمق های پایاب ۰/۰۵، ۰/۰۷۵ و ۰/۱ متر، افزایش طول حفره آبشستگی به میزان ۱۰٪ بوده و با افزایش ۱۰٪ در دبی عبوری از سرریز نیز میزان افزایش طول حفره آبشستگی ۱۰٪ خواهد بود به طوری که تاثیر افزایش دبی از ۲۵ لیتر بر ثانیه به ۴۵ لیتر بر ثانیه نسبت به افزایش دبی از ۲۵ لیتر بر ثانیه به ۳۵ لیتر بر ثانیه روی افزایش طول حفره رسوبات تفاوتی ندارد و طول حفره تغییری نمی کند. از سوی دیگر برای هر سه دبی ثابت ۲۵، ۳۵ و ۴۵ لیتر بر ثانیه با افزایش ۱/۵ برابری عمق پایاب طول حفره آبشستگی ۵٪ کاهش می یابد و با افزایش ۲ برابری عمق پایاب افزایش عمق پایاب از



شکل ۱۶. پروفیل عرضی آبشستگی پایین دست سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای.

Fig. 16. Transverse profile of the scour downstream of the trapezoidal piano key weir.



## ۷- پروفیل عرضی

متر (دیواره راست کانال) برابر با  $43/5\%$  و  $44\%$  و در نقطه  $Y=0/6$  متر (دیواره چپ کانال)  $40\%$  و  $45/5\%$  از ارتفاع کل بستر رسوبی است.

## ۸- ویژگی‌های هندسی حفره آبستتگی

در ادامه پارامترهایی از جمله فاصله محل بیشینه عمق حفره آبستتگی تا پای سرریز ( $L_s$ )، طول حفره آبستتگی ( $L_0$ ) و عمق آبستتگی در پای سرریزهای کلید پیاپویی دوزنقه‌ای و مثلثی ( $Z_p$ ) به صورت خلاصه در جدول (۷) ارائه شده است.

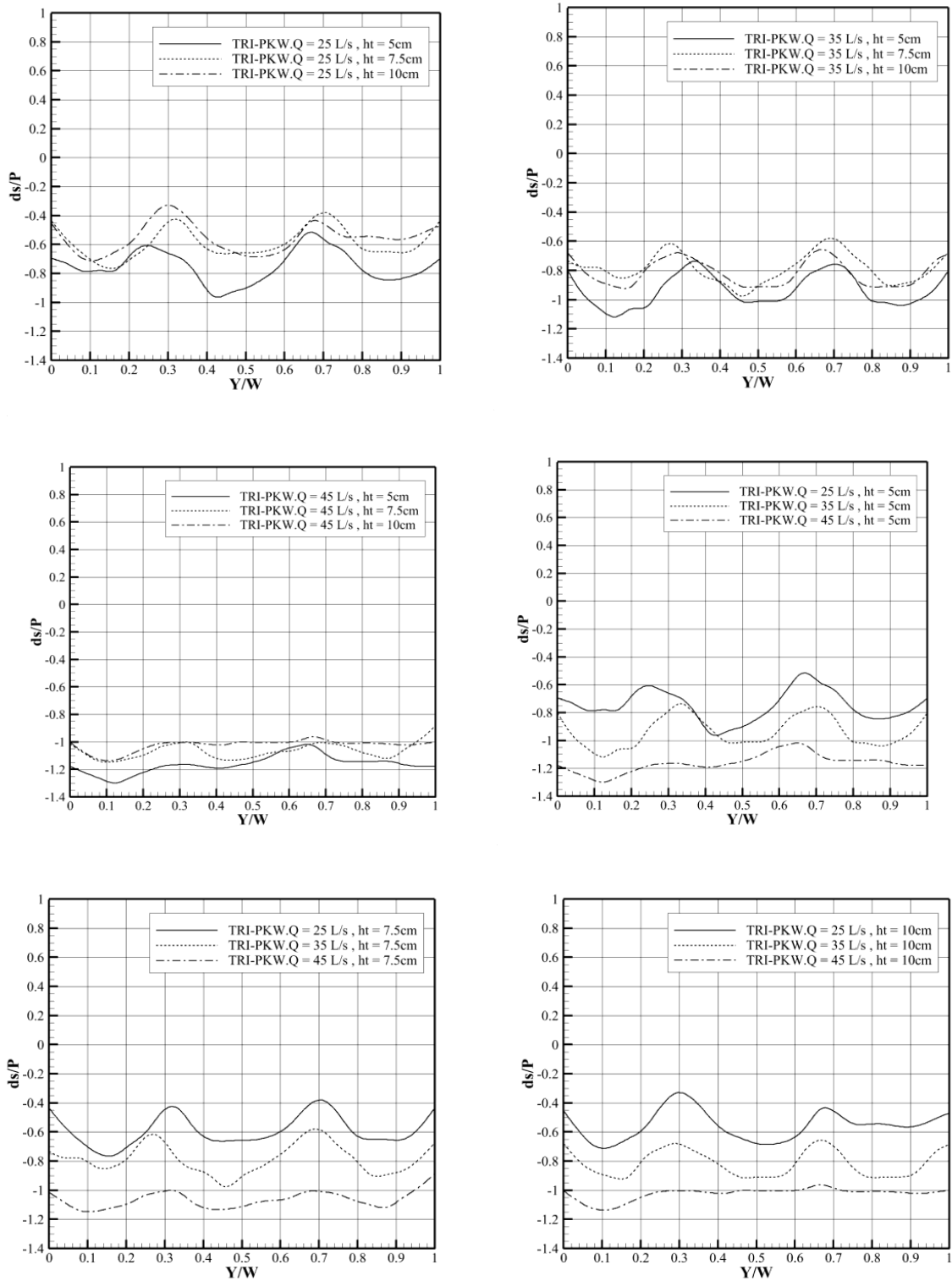
شکل (۱۸) خطوط جریان را برای جریان عبوری از سرریز کلید پیاپویی دوزنقه‌ای و مثلثی و کلیدهای ورودی و خروجی در دبی ۴۵ لیتر بر ثانیه و عمق پایاب  $0/1$  متر، همراه با کانتورهای اندازه سرعت نشان می‌دهد. جریان عبوری از هر دو نوع سرریز کلید پیاپویی دوزنقه‌ای و مثلثی یکسان است. جریان به دو صورت از سرریز می‌گذرد، در کلید ورودی با عبور جریان از روی تاج ورودی به صورت ریزشی و در کلید خروجی جریان عبوری از تاج خروجی به صورت یک جت به سمت پایین دست بخش شیب‌دار تخلیه می‌شود. جریان خروجی از کلید ورودی به سطح بستر برخورد نموده و باعث ایجاد یک ناحیه چرخشی در زیر کلید ورودی می‌شود، همچنین الگوی دوم جریان بر روی کلید خروجی شکل می‌گیرد. جریان ورودی به کلید خروجی با جریان‌های ریزشی از تاج‌های کناری تلاقی پیدا می‌کند و هنگامی که جریان از کلید خروجی وارد ناحیه پایین دست می‌شود، آشفتگی شدیدی در پایین دست کلید خروجی شکل می‌گیرد که علت آبستتگی بیشتر در جلوی کلید خروجی است. همان طور که در شکل سه بعدی خطوط جریان مشخص است جریان بعد از برخورد با بستر و ایجاد آشفتگی بالا می‌آید و این امر موجب تعلیق رسوبات و در نتیجه تشدید آبستتگی می‌باشد.

جهت درک بهتر از محل و چگونگی تأثیرات جریان بر آبستتگی بستر رسوبی مقادیر انرژی آشفتگی به صورت کانتور رنگی دو بعدی در نرم‌افزار Tecplot ترسیم و به صورت شکل (۱۹) برای هر دو نوع سرریز کلید پیاپویی دوزنقه‌ای و مثلثی ارائه شده است. لازم به ذکر است که انرژی آشفتگی در نرم‌افزار Tecplot با نماد TKE شناخته می‌شود. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود حداکثر مقدار انرژی آشفتگی در پایین دست سرریز کلید پیاپویی مثلثی بیشتر از سرریز کلید پیاپویی دوزنقه‌ای است که تا حدودی با مقدار آبستتگی در پایین دست این دو نوع سرریز هم‌خوانی دارد.

پروفیل عرضی آبستتگی در کانال به طور کامل متقارن نیست. متقارن نبودن پروفیل عرضی آبستتگی پایین دست سرریزهای کلید پیاپویی در تحقیقات آزمایشگاهی پیشین از جمله احمدی دهرشید و گوهری نیز گزارش شده است [۳]، آن‌ها دلیل غیریکنواختی پروفیل آبستتگی در عرض کانال را به آشفته بودن جریان در پایاب و تصادفی بودن بردارهای سرعت در این ناحیه نسبت دادند. شکل‌های (۱۶ و ۱۷) پروفیل عرضی آبستتگی پایین دست سرریز کلید پیاپویی دوزنقه‌ای و مثلثی را برای تغییرات دبی و عمق پایاب نمایش می‌دهند.

همان طور که در شکل (۱۶) دیده می‌شود میزان آبستتگی در محل پایین دست کلیدهای خروجی سرریز بیشتر از کلیدهای ورودی است. اختلاف بین کمترین میزان آبستتگی و بیشینه عمق آبستتگی در رخ نماهای عرضی آبستتگی بستر رسوبی در پایین دست سرریز کلید پیاپویی دوزنقه‌ای برای دبی و عمق‌های پایاب مختلف بین  $0/45$  و  $0/062$  متر است و به ترتیب برای دبی‌های ثابت ۲۵، ۳۵ و ۴۵ لیتر بر ثانیه در عمق‌های پایاب متفاوت بین  $18\%-23\%$ ،  $20\%-25\%$  و  $18\%-21\%$  ارتفاع بستر رسوبی را تشکیل می‌دهد. پروفیل عرضی آبستتگی پایین دست سرریز کلید پیاپویی مثلثی در شکل (۱۷) به نمایش گذاشته شده است.

طبق اطلاعات شکل (۱۷) اختلاف بین کمترین میزان آبستتگی و بیشینه عمق آبستتگی در رخ نماهای عرضی آبستتگی بستر رسوبی در پایین دست سرریز کلید پیاپویی مثلثی برای دبی و عمق‌های پایاب مختلف تقریباً بین  $0/23$  تا  $0/08$  متر است و به ترتیب برای دبی‌های ثابت ۲۵، ۳۵ و ۴۵ لیتر بر ثانیه در عمق‌های پایاب متفاوت بین  $26/5\%$ ،  $32\%$ ،  $18\%$ ،  $27/7\%$  و  $9\%$  -  $19/5\%$  کل میزان ارتفاع رسوبات آبستتگی را تشکیل می‌دهد. اختلاف ارتفاع بین بیشینه و کمینه عمق آبستتگی در سرریز کلید پیاپویی مثلثی با افزایش دبی و عمق پایاب کاهش پیدا کرده ولی در سرریز کلید پیاپویی دوزنقه‌ای با افزایش دبی و عمق پایاب این اختلاف عمق در حفره آبستتگی افزایش می‌یابد، اما میزان تغییرات بیشینه و کمینه پروفیل عرضی آبستتگی در حالت‌های مختلف هیدرولیکی برای سرریز دوزنقه‌ای  $6/8\%$  و در سرریز مثلثی حدود  $23\%$  از کل ارتفاع بستر رسوبی می‌باشد. همچنین با توجه به پروفیل عرضی آبستتگی پایین دست سرریزهای کلید پیاپویی به صورت میانگین میزان عمق آبستتگی در کناره‌ی کانال به ترتیب برای سرریز کلید پیاپویی دوزنقه‌ای و مثلثی در راستای X و نقطه  $Y=0/0$



شکل ۱۷. پروفیل عرضی آبخستگی پایین دست سرریز کلید بیانونبی مثلثی.

Fig. 17. Transverse profile of the scour downstream of the triangular piano key weir.

جدول ۷. ویژگی‌های هندسی حفره آبستگي در پایین دست سرریزهای کلید پيانویی ذوزنقه‌ای و مثلثی

Table 7. Geometrical characteristics of scour hole downstream of trapezoidal and triangular piano key weir.

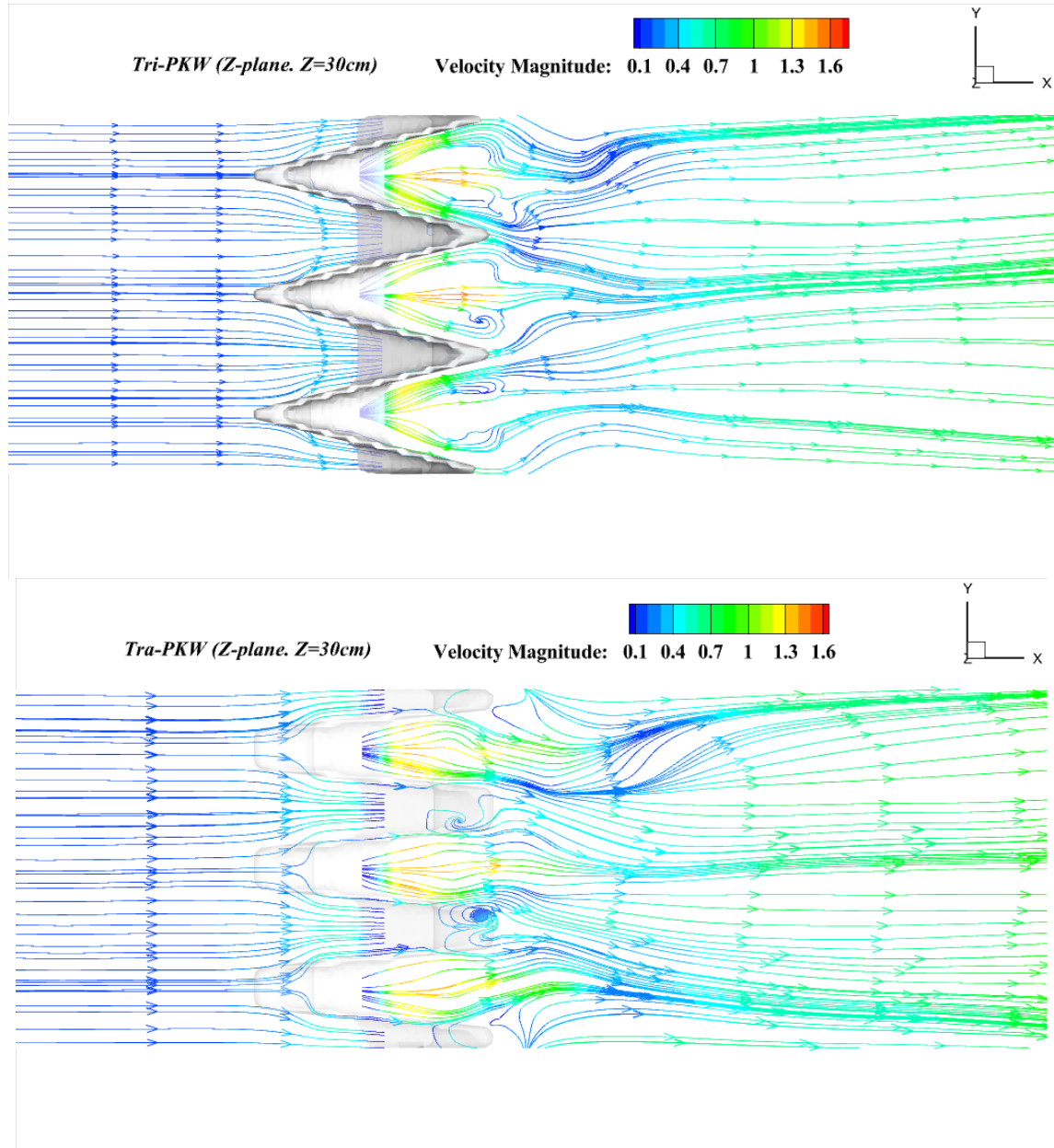
Test No	$L_s$ (cm)	$L_o$ (cm)	$Z_f$ (cm)
TRA-1	صفر	۴۵	-۱۳/۵
TRA-2	۱۵	۴۰	-۱۰/۷۵
TRA-3	۱۵	۴۰	-۱/۱
TRA-4	۵	۵۰	-۱۴/۲۵
TRA-5	۵	۴۵	-۱۱/۵
TRA-6	۱۰	۴۵	-۱۰/۱
TRA-7	۱۵	۶۰	-۱۴/۲۵
TRA-8	۱۵	۴۵	-۱۲
TRA-9	۱۵	۴۵	-۱۲
TRI-10	۵	۴۰	-۱۴/۴
TRI-11	۵	۳۵	-۱۲
TRI-12	۵	۳۵	-۱۱/۲
TRI-13	۱۰	۵۰	-۱۸/۲
TRI-14	۱۰	۴۵	-۱۳/۹
TRI-15	۱۰	۴۵	-۱۳/۷
TRI-16	۱۰	۵۰	-۱۹/۲
TRI-17	۱۰	۴۵	-۱۵/۹
TRI-18	۱۵	۴۵	-۱۵/۷

### ۹- نتیجه‌گیری

عمق پایاب به صورت تصاعد عددی مشخصات حفره آبستگي با روندی ثابت تغییر می‌کند. همچنین تغییرات دبی، ابعاد هندسی حفره آبستگي را دچار دگرگونی می‌کند؛ اما برخلاف عمق پایاب، افزایش دبی عبوری از سرریز در هر دو سرریز کلید پيانویی ذوزنقه‌ای و مثلثی مورد مطالعه موجب افزایش عمق حفره آبستگي و افزایش در طول حفره آبستگي، افزایش بیشینه عمق حفره آبستگي، افزایش میزان عمق آبستگي در پای سرریز و افزایش فاصله بیشینه عمق حفره آبستگي از پایه سرریزهای مورد نظر می‌شود.

در تمام مدل‌سازی‌های صورت گرفته کاهش سطح بستر رسوبی در پایین دست سرریزهای کلید پيانویی ذوزنقه‌ای بین ۱۲٪ تا ۲۵٪ کمتر از سرریز کلید پيانویی مثلثی است، به طور کلی همه‌ی ابعاد حفره آبستگي در مشخصات مشابه جریان عبوری از سرریز و عمق پایاب برای سرریز کلید پيانویی مثلثی به غیر از طول حفره آبستگي و فاصله بیشینه عمق حفره آبستگي از پایه سرریز از سرریز کلید پيانویی ذوزنقه‌ای بیش تر است.

به طور کلی می‌توان گفت در صورت ثابت بودن مشخصات رسوب مانند قطر میانگین ذرات رسوب، انحراف معیار هندسی ذرات و چگالی رسوبات، از عوامل تأثیرگذار بر انتقال رسوبات پایین دست سرریزهای کلید پيانویی ذوزنقه‌ای و مثلثی طبق نتایج حاصل شده از شبیه‌سازی عددی، میزان عمق پایاب و دبی عبوری از سرریز است. به این صورت که افزایش عمق پایاب در شرایط دبی عبوری ثابت سبب اتلاف بیشتر انرژی جت‌های ریزشی از کلیدهای سرریز کلید پيانویی شده و با کاهش نیروی برخورد کننده به بستر رسوبی ابعاد آبستگي کاهش پیدا می‌کند. این کاهش در ابعاد حفره آبستگي با افزایش عمق پایاب شامل کاهش در طول حفره آبستگي، کاهش بیشینه عمق حفره آبستگي، کاهش میزان عمق آبستگي در پای سرریز و کاهش فاصله بیشینه عمق حفره آبستگي از پایه سرریز می‌باشد. با توجه به نمودارهای تغییرپذیری مشخصات حفره آبستگي در ازای تغییرات عمق پایاب ذکر شده می‌توان نتیجه گرفت که به صورت تقریبی با افزایش



شکل ۱۸. خطوط جریان برای جریان عبوری از سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای و مثلثی.

Fig. 18. Flow lines for the flow through trapezoidal and triangular piano key weir.

## منابع

- [1] M. Shirian, Numerical Modeling of the Piano Key Weir and Study on geometrical Parameters Function, 2015, (In Persian).
- [2] A. Afshar, G. Nik Sefat, Designing hydraulic structures of small dams, University of Science and Iranian industry, (1367) 320, (In Persian).
- [3] A. Ahmadi Dehrashid, S. Gohari, Experimental Study of Downstream Scour of Piano Key Weirs, J. Water and Soil Conservation, 26(1) (2019) 91-109, (In Persian).
- [4] A. Mehboudi, J. Attari, S.A. Seyed Abbas Hosseini, M.R. Jalili Ghazizadeh, Experimental study comparing Piano Key weir with artillery and linear Weirs, , in: 13th Iranian Hydraulic Conference, University of Tabriz, Iran, 2014, (In Persian).
- [5] O. Machiels, Experimental study of the hydraulic behavior of Piano Key Weirs, University of Liège, 2012.
- [6] A. Ghafouri, M. Ghodsian, C. Abdi Chooplou, Experimental Study on the Effects of Discharge and Tailwater Depth on Bed Topography Downstream of a Trapezoidal Piano Key Weir, Journal of Hydraulics, 15(3) (2020) 107-122, (In Persian).
- [7] A. Bey, M. Faruque, R. Balachandar, Two-dimensional scour hole problem: Role of fluid structures, Journal of Hydraulic Engineering, 133(4) (2007) 414-430.
- [8] O. Machiels, S. Erpicum, P. Archambeau, B. Dewals, M. Pirotton, Parapet wall effect on piano key weir efficiency, Journal of irrigation and drainage engineering, 139(6) (2013) 506-511.
- [9] S. Abbasi, M. Eskandari, Hydraulic behavior of piano key Weir, in: 13th Iranian Hydraulic Conference, Department of Water Engineering, University of Tabriz, 2014, (In Persian).
- [10] S. Moradi, H. Shahsavari, A. Arfa, K. Esmaili, Hydraulic Type-A Piano Key weirs Zigzag Lateral Crest, Journal of Ferdowsi Civil Engineering, 33(1) (2020) 1-16, (In Persian).
- [11] F. Ahmadi Dehrashid, S. Gohari, Investigating the effect of discharge and tailwater depth on the dimensions

## ۰۱- فهرست علائم

محل قرارگیری این بخش قبل از مراجع است و باید در ابتدا علائم انگلیسی و سپس علائم یونانی به ترتیب حروف الفبا و مشابه با آنچه که در ادامه خواهد آمد، بیان شوند:

### علائم انگلیسی

<i>A</i>	مدل سرریز دارای پیشانی
<i>B</i>	طول جانبی سرریز (m)
<i>Bi</i>	طول بیرون زدگی بالادست سرریز (m)
<i>Bo</i>	طول بیرون زدگی پایین دست سرریز (m)
<i>Cd</i>	ضریب آبگذری (-)
<i>D</i>	مدل سرریز بدون پیشانی
<i>ds,m</i>	بیشینه عمق حفره آبشستگی (m)
<i>d50</i>	قطر میانگین مصالح بستر (m)
<i>g</i>	شتاب ثقل ( $ms^{-2}$ )
<i>H</i>	ارتفاع آب بر روی تاج سرریز (m)
<i>Ht</i>	عمق پایاب (m)
<i>Le</i>	طول مؤثر سرریز (m)
<i>Lo</i>	طول حفره آبشستگی (m)
<i>Ls</i>	فاصله بیشینه عمق آبشستگی تا سرریز (m)
<i>N</i>	تعداد کلیدهای سرریز (m)
<i>P</i>	ارتفاع تاج سرریز (m)
<i>Q</i>	دبی ( $m^3/s$ )
<i>Si</i>	شیب کف کلید ورودی (deg)
<i>So</i>	شیب کف کلید خروجی (deg)
<i>Ts</i>	ضخامت جدار سرریز (m)
<i>Tra</i>	مدل سرریز دوزنقه‌ای
<i>Tri</i>	مدل سرریز مثلثی
<i>W</i>	عرض سرریز (m)
<i>Wi</i>	عرض کلید ورودی (m)
<i>Wo</i>	عرض کلید خروجی (m)
<i>X</i>	فاصله طولی از دیوار پایین دست سرریز (m)
<i>Y</i>	فاصله عرضی از دیوار سمت راست کانال (m)
<i>Zf</i>	عمق آبشستگی در جلوی پایه سرریز (m)

### علائم یونانی

$\sigma_g$	انحراف معیار هندسی ذرات (-)
$\rho_s$	جرم مخصوص ذرات ( $Kg/m^3$ )
$\rho_w$	جرم مخصوص آب ( $Kg/m^3$ )
$\theta$	زاویه اصطکاک داخلی رسوب (deg)

- [15] F. Ahmadi Dehrashid, S. Gohari, Numerical simulation of local scour downstream of Piano Key Weir, Journal of water and soil protection research, 26(1) (2019) 91-109, (In Persian).
- [16] C.A. Chooplou, M. Ghodsian, D. Abediakbar, A. Ghafouri, Experimental and Numerical Studies of the Influence of Zigzag Crests with Various Geometries on the Flow Field and Scour Downstream of Rectangular Piano Key Weirs, (2022).
- [17] A.M. Yazdi, S. Hoseini, S. Nazari, M. Fazeli, Numerical and experimental analysis of scour downstream of piano key weirs, Sādhanā, 47(4) (2022) 189.
- of score hole downstream of a Piano Key Weir, in: International Conference on Civil Engineering, Tehran, 2016, (In Persian).
- [12] S. Jüstrich, M. Pfister, A.J. Schleiss, Mobile riverbed scour downstream of a piano key weir, Journal of Hydraulic Engineering, 142(11) (2016) 04016043.
- [13] M. Ghodsian, C. Abdi Choploo, A. Ghafouri, Scouring Downstream of Triangular and Trapezoidal Pianos Key Weirs. Journal of Hydraulics, Civil Engineering Journal, 16(2) (2021) 43-58, (In Persian).
- [14] K. Morovati, A. Eghbalzadeh, S. Soori, Numerical Study of Energy Dissipation of Pooled Stepped Spillways, Civil Engineering Journal, 2(5) (2016) 208-220.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Dehghan, H. Karami, Numerical investigation of scour downstream of piano key Weirs using Flow-3D software, Amirkabir J. Civil Eng., 56(2) (2024) 203-228.

DOI: [10.22060/ceej.2024.22659.8019](https://doi.org/10.22060/ceej.2024.22659.8019)

