



Effect of Blocks on Tunnel Structures on Local Scour Downstream of Piano Key Weirs

Wadi Mohammed Wadi¹, Ali Khoshfetrat^{1*}, Musa Habib Jasim², Niloofar Salemi¹

¹ Department of Civil Engineering, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

² Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Karbala, Karbala, Iraq.

Review History:

Received: Jul. 21, 2025

Revised: Sep. 29, 2025

Accepted: Feb. 01, 2026

Available Online: Mar. 02, 2026

Keywords:

Output Keys

Scour Index

Rectangular

Type B

Different Block Geometry

ABSTRACT: The piano key weirs are a novel type of non-linear, labyrinth weir. The high discharge efficiency of these structures, however, necessitates an investigation of the resulting local scour and the development of effective countermeasures. In the present study, blocks with different geometries were installed in the tunneled outlet keys of a type B rectangular piano key weir. The weir model was 0.20 m high and consisted of three cycles (three outlet keys, two inlet keys, and two inlet half-keys). Blocks with rectangular, trapezoidal, and cylindrical cross-sections were placed in each outlet key of the weir, specifically on the tunnel structure. This tunnel structure prevented the mixing of flows exiting the inlet and outlet keys. The blocks redirected the flow and shifted the location of maximum scour depth further from the weir toe; they also acted as a barrier, reducing the velocity of the outflow from the keys. Positioning the maximum scour depth farther from the weir toe reduces the risk of weir overturning. Among the configurations tested, the rectangular blocks resulted in the greatest reduction in maximum scour depth and placed the scour hole farthest from the weir toe. Additionally, the maximum scour depth was found to increase with higher particle Froude numbers, higher flow rates, and lower downstream depths. In the present study, the densimetric Froude number ranged from 0.43 to 0.55. Finally, dimensional analysis was employed to develop an empirical relationship for predicting the maximum scour depth.

1- Introduction

Piano key weirs (PKWs) are a novel type of non-linear weir that offers a higher flow capacity than conventional weir designs. Consequently, numerous studies have investigated the factors influencing local scour downstream of these structures. Research has primarily focused on three areas: the effects of hydraulic parameters (such as flow rate), the characteristics of the bed material (specifically particle diameter), and the geometric configuration of the weir itself. More recently, investigations have explored the use of additional structural elements to mitigate scour. For instance, Rdhaiwi et al. (2023), Fathi et al. (2024), Abdi-Chooplou et al. (2024), Mshali et al. (2024), and Fathi et al. (2025) examined the effectiveness of aprons, steps, baffles, flow splitters, and hydraulic jumps in type A and C piano key weirs [1-5]. Their findings indicate that aprons effectively reduce the maximum scour depth by dissipating the energy of the jets issuing from the weir's inlet and outlet keys. Similarly, incorporating steps or fixed-geometry baffles within the outlet keys was found to decrease flow velocity and weaken vortex formation, thereby reducing scour. The inclusion of a hydraulic jump in the outlet keys serves a different purpose: it

projects the falling jet further downstream, shifting the point of maximum scour away from the weir toe and reducing the risk of structural undermining. Finally, the use of flow splitters, while reducing the effective crest length, also directs the flow further downstream, resulting in a shallower scour hole located at a safer distance from the weir. The present study introduces, for the first time, the use of various block geometries—specifically rectangular, trapezoidal, and cylindrical cubes—installed on the tunnel structure within the outlet keys of a type B rectangular piano key weir. The experimental investigation was conducted under varying hydraulic conditions, including three flow rates and three tailwater depths, using a gravel bed. The tunnel structure geometry remained constant throughout the experiments to isolate the effect of the block shapes on scour dynamics.

2- Dimensional Analysis

Equation (1) presents the parameters influencing local scour downstream of a type B rectangular piano key weir equipped with various block geometries on the tunnel structure within its outlet keys. In Eq. (1), Z_s represents the maximum scour depth, X_s denotes the distance of the

*Corresponding author's email: ali.khoshfetrat@iau.ac.ir



maximum scour depth from the weir toe, E_1 is the specific energy of the upstream flow, Er is the relative energy, Fr_d is the densimetric Froude number, and “Type” refers to the configuration of the weir: simple weir, tunnel weir, or weirs with blocks on the tunnel structure.

$$\left(\frac{Z_s}{E_1}, \frac{X_s}{E_1}\right) = f(Er, Fr_d, Type) \quad (1)$$

3- Materials and methods

The experiments were conducted in a rectangular flume measuring 10 m long, 0.8 m wide, and 1.0 m high, with a zero slope. Three flow rates were tested: 0.030, 0.035, and 0.040 m³/s. Three ultrasonic sensors, connected to the PLC, measured the water depths: the first sensor was located upstream at a distance of $4P$ from the weir centerline, the second sensor was downstream at a distance of $10P$ from the weir centerline, and the third sensor measured the flow depth directly on the weir crest. Three tailwater depths of 0.05, 0.10, and 0.15 m were established using an adjustable end valve. Additionally, the combination of maximum discharge and minimum tailwater depth was chosen to prevent scour from reaching the flume bottom. A natural gravel bed material was used for all experiments. The material had a mean particle diameter (d_{50}) of 0.0075 m and a uniformity coefficient of 1.19. To determine the time required to reach equilibrium scour conditions, a preliminary 16-hour test was conducted under the most erosive conditions (maximum discharge, minimum tailwater depth, and without any blocks or tunnel structures). It was observed that changes in the scour hole after 9000 seconds (2.5 hours) were less than 0.001 m; therefore, this duration was considered sufficient for reaching equilibrium in subsequent tests. A type B rectangular piano key weir with a height (P) of 0.20 m was used in this study. The weir had a thickness of 0.01 m. The key dimensions were as follows: inlet and outlet key widths (W_i and W_o) of 0.145 m, wall length (B^*) of 0.40 m, and upstream overhang length (B_i) of 0.13 m. The total crest length (L) was 27.3 m. A tunnel structure was installed within the outlet keys. This consisted of a rectangular sheet, 0.30 m long and 0.145 m wide, placed parallel to the weir floor at a distance of 0.04 m from the bottom of the outlet keys. The distance from the beginning of the outlet keys to the leading edge of the tunnel structure (a) was 0.15 m. The position of the tunnel was optimized through trial and error to prevent flow reversal toward the upstream side. Blocks (baffles) of various geometries were installed on the tunnel structure within the outlet keys. Three block shapes were tested: rectangular, trapezoidal, and cylindrical. After each test, once equilibrium was reached, the pump was turned off and the flume was drained. The resulting scour hole topography was then measured using a laser meter on a 0.03 m \times 0.03 m grid. These measurements were used to determine the maximum scour depth (Z_s) and its corresponding distance from the weir toe (X_s). A total of 45 experiments were conducted. This included 18 tests for control configurations (simple weirs and weirs with the tunnel structure but no

blocks) and 27 tests for weirs with blocks installed on the tunnel structure.

4- Results and discussion

Flow from the weir inlet keys is transferred downstream as a free jet, while flow exiting the outlet keys descends as an inclined jet. These flows converge at the entrance to the outlet keys, where a local submerged zone with a higher flow depth is created. This zone generates a powerful vortex that propagates downstream and impinges on the bed. Due to its high velocity, this vortex readily entrains and transports bed material. To mitigate this, a tunnel structure was installed within the outlet keys. Its primary purpose was to prevent the mixing of the outflow from the outlet keys with the flow entering from the inlet keys. By preventing this mixing, lateral surface vortices are eliminated, resulting in reduced sediment transport downstream. Consequently, the outflow from the outlet keys and the flow exiting the tunnel structure are conveyed downstream separately. Importantly, the outflow from the tunnel structure discharges further from the weir toe, thereby reducing the risk of weir overturning. The results indicate that both the maximum scour depth and its distance from the weir toe increase with an increasing densimetric Froude number. As the unit discharge increases, the velocity of the falling and inclined jets downstream of the weir also increases, intensifying flow turbulence. Conversely, increasing the tailwater depth reduces scour. As downstream depth increases, the flow downstream of the weir mixes with the outflow, reducing its velocity. This decrease in flow velocity lowers the shear stress on the bed, and scour development continues only until a critical equilibrium is reached. Furthermore, with greater tailwater depth, the propagation length of the jets impinging on the bed increases. As this propagation length increases and the eddies and jets become shallower, the maximum scour depth decreases, the scour hole becomes more elongated, and the hydraulic jump weakens, eventually becoming submerged. Consequently, the volume of the scour hole decreases, and its location shifts further from the weir toe. The inclusion of the tunnel structure and blocks within the outlet keys consistently reduced the maximum scour depth and resulted in a shallower longitudinal bed profile. This occurs because these features reduce the outflow velocity over the tunnel structure, thereby diminishing the strength of turbulence and eddies downstream of the weir. Additionally, by preventing flow mixing, the downstream jets become shallower, increasing their propagation length and producing a longer, shallower scour hole. The blocks themselves also generate a hydraulic jump on the tunnel structure, which projects the falling jets further downstream while reducing their erosive power. Compared to a simple weir (N), the average reduction in maximum scour depth was 10% for the tunnel weir (NT), 14.8% for the weir with rectangular blocks (R), 13.2% for the weir with trapezoidal blocks (T), and 11.8% for the weir with cylindrical blocks (C). The superior performance of the rectangular blocks is attributed to the formation of additional vortices and hydraulic jumps immediately behind

these blocks, which further dissipate flow energy. Eq. (2) is proposed for estimating the maximum scour depth. The equation yields a correlation coefficient of 98.8% and was developed using 75% of the experimental data, with the remaining 25% reserved for calibration. In this equation, the coefficients K_1 , K_2 , and K_3 are dimensionless parameters that depend on the weir type; their values are presented in Table 1.

$$\frac{Z_s}{E_1} = K_1 (Fr_d^{K_2} Er^{(K_3 Fr_d)}) \tag{2}$$

5- Conclusion

The tunnel structure alone reduced the maximum scour depth by approximately 10% compared to a simple weir. However, due to the absence of a downstream overhang in the Type B weir, the outflow from the inlet keys remained close to the weir toe, exacerbating scour in this region. The inclusion of blocks on the tunnel structure elongated the scour hole and shifted the location of maximum scour depth further downstream, thereby reducing the risk of structural undermining. Among the geometries tested, rectangular blocks were the most effective, producing the greatest reduction in scour depth and the greatest shift in its location. Overall, the combination of the tunnel structure and rectangular blocks yielded the lowest scour depths, indicating superior hydraulic performance in mitigating local scour downstream of the weir.

References

[1] Rdhaiwi, A.Q., Khoshfetrat, A. and Fathi, A. Experimental investigation of scour downstream of a C-Type trapezoidal piano key weir with stilling basin. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 27(6) (2023) 688-697. <https://doi.org/10.31272/jeasd.27.6.2>.

Table 1. The K coefficient values for calculating maximum scour depth.

Row	Type	K_1	K_2	K_3
1	N	1.18	1.07	0.01
2	NT	1.74	1.78	0.01
3	R	1.57	1.65	0.02
4	C	1.62	1.69	0.02
5	T	1.61	1.77	0.02

[2] Fathi, A., Abdi Chooplou, C. and Ghodsian, M. Local scour downstream of type-A trapezoidal stepped piano key weir in sand and gravel sediments. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, (2024) 1–13. <https://doi.org/10.1080/09715010.2024.2353612>.

[3] Abdi Chooplou, C., Kahrizi, E., Fathi, A., Ghodsian, M. and Latifi, M. Baffle-Enhanced Scour Mitigation in Rectangular and Trapezoidal Piano Key Weirs: An Experimental and Machine Learning Investigation. *Water*, 16(15) (2024) 2133. <https://doi.org/10.3390/w16152133>.

[4] Mshali, K.C., Khoshfetrat, A. and Fathi, A. Experimental study of the effect of jump on the Downstream Scouring of type-C trapezoidal piano key weir. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 56(11) (2024) 1353-1368. <https://doi.org/10.22060/ceej.2024.22565.7996>.

[5] Fathi, A., Khoshfetrat, A. and Alavi, S.H. Downstream Local Scour of PKW with Different Shapes and Numbers of Flow Splitters. *Journal of Hydraulic Engineering*, 151(4) (2025) 04025015. <https://doi.org/10.1061/JHEND8.HYENG-14143>.



تأثیر بلوک روی سازه‌ی تونلی موجود در سرریز کلیدپیانویی بر آبشستگی موضعی پایین دست آن

وادی محمودادی^۱، علی خوش فطرت^{۱*}، موسی حبیب‌جاسم^۲، نیلوفر سالمی^۱

۱. گروه مهندسی عمران، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

۲. گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کربلا، کربلا، عراق.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۳۰

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۰۷

پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۲

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۱۲/۱۱

کلمات کلیدی:

کلیدهای خروجی

شاخص آبشستگی

مستطیلی

نوع B

هندسه متفاوت بلوک

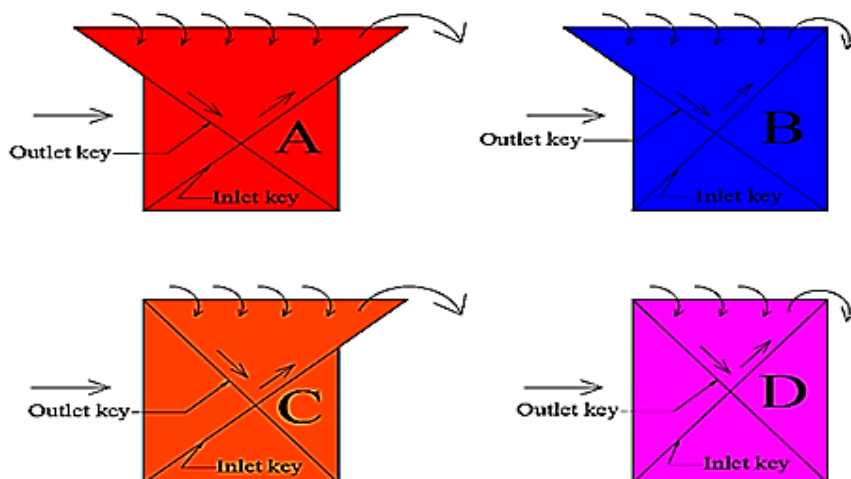
خلاصه: سرریزهای کلیدپیانویی، شکل جدیدی از سرریزهای کنگره‌ای و به‌صورت غیر خطی هستند. به‌دلیل راندمان بالای این سرریزها در عبور جریان؛ بررسی آبشستگی موضعی و راهکار برای کاهش آن دارای اهمیت فراوانی است. در تحقیق حاضر از بلوک با هندسه متفاوت در کلیدهای خروجی تونل‌دار سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B استفاده شد. سرریز کلیدپیانویی مورد استفاده با ارتفاع ۰/۲۰ متر و دارای سه سیکل (سه کلید خروجی، دو کلید ورودی و دو نیم‌کلید ورودی) است. بلوک‌ها با هندسه‌های مکعب مستطیلی، دوزنقه‌ای و استوانه‌ای در هر کلید خروجی سرریز و روی سازه‌ی تونلی نصب شدند. سازه‌ی تونلی، باعث عدم اختلاط جریان خروجی از کلیدهای ورودی و خروجی می‌شد. بلوک‌ها، جریان و بیشینه عمق آبشستگی را به فاصله‌ی دورتری از پنجه سرریز هدایت می‌کنند و مانند مانعی در برابر جریان عمل کرده و سرعت جریان خروجی از کلیدها را کاهش می‌دهند. فاصله دورتر بیشینه عمق آبشستگی از پنجه سرریز، می‌تواند باعث کاهش خطر واژگونی سرریز شود. در بلوک‌های مستطیلی، بیشینه عمق آبشستگی کاهش بیشتری یافته و محل آن از پنجه سرریز دورتر می‌گردد. همچنین با افزایش عدد فرود ذرات، با افزایش دبی جریان و کاهش عمق پایاب، بیشینه عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. محدوده عدد فرود ذرات در تحقیق حاضر بین ۰/۴۳ تا ۰/۵۵ متغیر است. در نهایت از آنالیز ابعادی برای محاسبه بیشینه عمق آبشستگی استفاده شد.

۱- مقدمه

آبشستگی موضعی در پایین دست سرریزهای کلیدپیانویی پرداخته می‌شود. بسیاری از محققان، تأثیر جریان و قطر مصالح بستر را بر آبشستگی موضعی در پایین دست سرریزهای کلیدپیانویی مورد بررسی قرار دادند. جاستریچ و همکاران (۲۰۱۶)، غفوری و همکاران (۲۰۲۰)، دهرشید و همکاران (۲۰۲۲)، عبدی چوپلو و همکاران (۲۰۲۳ و ۲۰۲۴ الف)، بداعی و همکاران (۲۰۲۳ و ۲۰۲۴) و دهقان و کریمی (۲۰۲۴) روی آبشستگی موضعی پایین دست سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی و دوزنقه‌ای نوع A و D تأثیر دبی جریان، عمق پایاب، فاصله ریزش جریان، دانه‌بندی مصالح بستر را در حالت جریان آزاد و مستغرق به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار دادند [۲-۹]. ایشان دریافتند که با افزایش دبی جریان، سرعت جریان افزایش یافته و باعث افزایش تنش برشی روی بستر پایین دست سرریز می‌شود و در نهایت افزایش بیشینه عمق آبشستگی را به همراه دارد. با افزایش عمق پایاب طول انتشار جریان در پایین دست سرریز افزایش یافته

سرریزهای کلیدپیانویی (PKWs) شکل جدیدی از سرریزهای غیر خطی هستند که ظرفیت عبور جریان بیشتری نسبت به دیگر سرریزهای مشابه دارند. این سرریزها دارای شکل‌های مستطیلی، مثلثی و دوزنقه‌ای در پلان و درای چهار مدل A، B، C و D هستند. نوع A دارای لبه‌های آویزان در بالادست و پایین دست سرریز، نوع B دارای لبه‌های آویزان در بالادست، نوع C دارای لبه‌های آویزان در پایین دست و نوع D فاقد لبه‌های آویزان است. شکل (۱) انواع مدل‌های سرریز کلیدپیانویی را نشان می‌دهد. سرریزهای کلیدپیانویی دارای فونداسیون و پی سبکی هستند و علاوه بر سدها، در کانال‌های زهکشی، کانال‌های کشاورزی و رودخانه‌ها نیز جای می‌گیرند [۱]. به‌دلیل راندمان بالای این سرریزها، بررسی آبشستگی موضعی و راهکار برای کاهش آن و همچنین افزایش اتلاف انرژی دارای اهمیت فراوانی است. در ادامه و به‌صورت مختصر به تعدادی از مطالعات موجود برای

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ali.khoshfetrat@iau.ir



شکل ۱. انواع مدل‌های سرریز کلیدپیانویی از نمای جانبی.

Fig. 1. All types of PKWs from the side view.

بیشتر است و خطر واژگونی سرریز را می‌تواند کاهش دهد. ایشان تعداد سیکل‌های سرریز، ارتفاع سرریز و نسبت عرض کلیدهای ورودی به خروجی را مورد بررسی قرار دادند و دریافته‌اند که با افزایش تعداد سیکل‌های سرریز، ارتفاع آن و افزایش نسبت عرض کلیدهای ورودی به خروجی، بیشینه عمق آبستگي افزایش می‌یابد. دلیل آن افزایش سرعت جریان و افزایش فاصله ریزش جریان است که قبلاً به این موارد اشاره شد. در تحقیق حاضر نیز از سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B و با ارتفاع ۰/۲۰ متر و با نسبت عرض کلیدهای ورودی به خروجی ۱ استفاده شد.

بسیاری دیگر از محققان نیز تأثیر سازه‌های مازاد روی تاج، کلیدهای خروجی و پایین‌دست سرریزهای کلیدپیانویی را بر بیشینه عمق آبستگي مورد بررسی قرار دادند. لنتز و همکاران (۲۰۲۱)، کومار و احمد (۲۰۲۲)، رضیوی و همکاران (۲۰۲۳)، فتحی و همکاران (۲۰۲۴)، عبدی چوپلو و همکاران (۲۰۲۴)، کازرونی و همکاران (۲۰۲۴)، فتحی و همکاران (۲۰۲۵) و مشالی و همکاران (۲۰۲۵) از کف‌بند، پله، بافل با هندسه ثابت، تیغه‌های جداکننده جریان و چامپ در سرریزهای کلیدپیانویی نوع A و C استفاده کردند [۱۵-۲۲]. ایشان دریافته‌اند که کف‌بند باعث کاهش بیشینه عمق آبستگي می‌شود و دلیل آن کاهش قدرت جت‌های خروجی از کلیدهای ورودی و خروجی سرریز روی کف‌بند است. تعداد پله‌های متفاوت و بافل با هندسه ثابت در کلیدهای خروجی سرریز نیز باعث کاهش سرعت جریان داخل کلیدهای خروجی می‌شوند و بیشینه عمق آبستگي را کاهش

و باعث کاهش سرعت جریان شده و در نهایت بیشینه عمق آبستگي کاهش می‌یابد. با افزایش فاصله ریزش، جریان با قدرت بیشتری تحت ثقل به بستر پایین‌دست ریخته و قدرت گردابه‌های پایین‌دست سرریز را افزایش می‌دهد. با افزایش قدرت گردابه‌ها، اغتشاش جریان افزایش یافته و مصالح بستر به راحتی به پایین‌دست منتقل شده و در نهایت باعث افزایش بیشینه عمق آبستگي می‌شود. با افزایش قطر متوسط مصالح بستر، سرعت جریان و تنش برشی موجود در روی بستر به راحتی نمی‌تواند مصالح را جابه‌جا کند و همین امر باعث کاهش بیشینه عمق آبستگي می‌شود. در حالت جریان مستغرق نیز اغتشاش جریان و قدرت گردابه‌ها به مراتب کاهش می‌یابند و همین امر باعث کاهش بیشینه عمق آبستگي می‌شود. در تحقیق حاضر و با توجه به مطالعات بالا، از دبی جریان متفاوت، عمق پایاب متفاوت و مصالح بستر شنی در حالت جریان آزاد استفاده شد.

بسیاری دیگر از محققان نیز تأثیر هندسه سرریزهای کلیدپیانویی را بر بیشینه عمق آبستگي مورد بررسی قرار دادند. گوهری و احمدی (۲۰۱۹)، یزدی و همکاران (۲۰۲۰ و ۲۰۲۲)، قدسیان و همکاران (۲۰۲۱) و جمال و همکاران (۲۰۲۲) آبستگي موضعی پایین‌دست سرریزهای مستطیلی، دوزنقه‌ای و مثلثی نوع A را مورد مطالعه قرار دادند [۱۰-۱۴]. ایشان دریافته‌اند که بیشینه عمق آبستگي در سرریزهای کلیدپیانویی دوزنقه‌ای کمتر از سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی و مثلثی است. ایشان همچنین دریافته‌اند که فاصله بیشینه عمق آبستگي در سرریزهای کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نیز

به صورت بدون بعد محاسبه نمود.

۲- آنالیز ابعادی

رابطه (۱)، پارامترهای موثر بر آبستگي موضعی پایین دست سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B را همراه با هندسه متفاوت بلوک روی سازه‌ی تونلی موجود در کلیدهای خروجی آن نشان می‌دهد. در رابطه (۱)، Z_s بیشینه عمق آبستگي، X_s فاصله بیشینه عمق آبستگي نسبت به پنجه سرریز، q دبی در واحد عرض جریان در بالادست سرریز، E_1 انرژی مخصوص جریان در بالادست سرریز، E_2 انرژی مخصوص جریان در پایین دست سرریز، g نیروی گرانش، σ ضریب کشش سطحی، μ لزجت دینامیکی، ρ چگالی جریان، $\Delta\rho$ اختلاف چگالی مصالح بستر (ρ_s) با چگالی جریان، d_{50} قطر متوسط مصالح بستر و Type نمایشگر سرریز ساده، سرریز تونلی و سرریزهای دارای بلوک در روی تونل هستند.

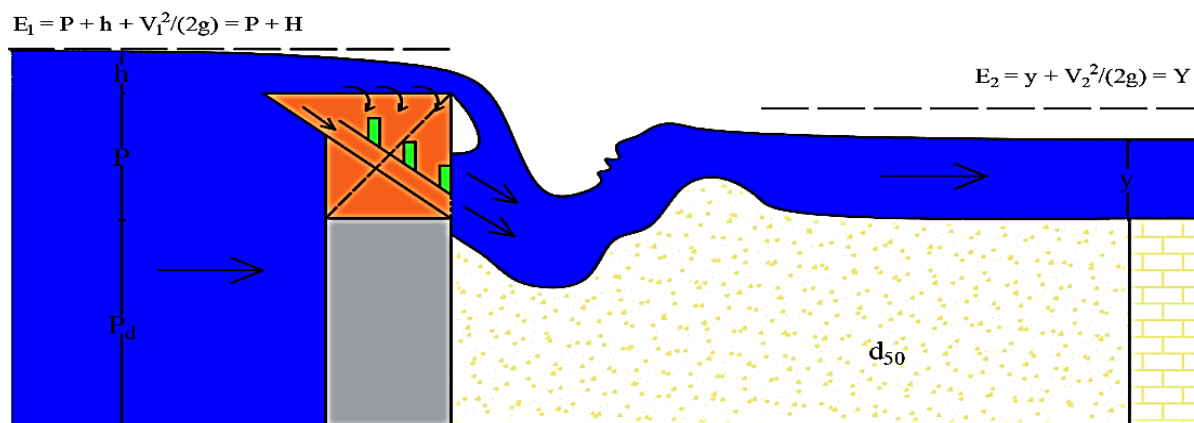
انرژی مخصوص جریان در بالادست سرریز از رابطه $E_1 = P + h +$ و انرژی مخصوص در پایین دست سرریز از رابطه $(V_1^2/2g) = P + H$ قابل محاسبه است [۲۵]. همانطور که گفته شد، ضریب اصلاح سرعت (α) در مطالعه حاضر، واحد در نظر گرفته شده است [۲۶]. شکل (۲) نیز آبستگي موضعی پایین دست سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B را همراه با سازه تونلی و بلوک نشان می‌دهد. در این شکل، V_1 سرعت جریان در بالادست سرریز، V_2 سرعت جریان در پایین دست سرریز، h عمق جریان در بالادست نسبت به تاج سرریز، y عمق پایین دست سرریز (عمق پایاب)، P ارتفاع سرریز، P_4 ارتفاع مصالح بستر نسبت به کف کانال، H نظیر هد کل جریان در بالادست سرریز و Y نظیر هد کل جریان در پایین دست سرریز هستند. همچنین معرفی پارامترهای موثر بر آبستگي موضعی پایین دست سرریز کلیدپیانویی مستطیلی مطابق آنالیز ابعادی تحقیق باباخواه و خوش فطرت در نظر گرفته شده است [۲۳].

$$(Z_s, X_s) = f(q, E_1, E_2, g, \sigma, \mu, \rho, \Delta\rho, d_{50}, Type) \quad (1)$$

با در نظر گرفتن سه پارامتر تکراری q ، E_1 و ρ و با استفاده از تئوری π باکینگهام، پارامترهای موثر بر آبستگي موضعی پایین دست سرریز کلیدپیانویی مستطیلی با بلوک موجود روی سازه‌ی تونلی در کلیدهای خروجی، مطابق رابطه (۲) خواهد شد.

می‌دهند. وجود پله‌ها و بافل مانند مانع و زبری در کلیدهای خروجی عمل کرده و باعث کاهش قدرت گردابه‌های موجود در کلیدهای خروجی می‌شوند. وجود جامپ در کلیدهای خروجی سرریز باعث افزایش فاصله ریزش جریان موجود در کلیدهای خروجی سرریز به فاصله‌ای دورتر از پنجه سرریز می‌شود و بیشینه عمق آبستگي را از پنجه سرریز دور می‌کند. همین امر می‌تواند باعث کاهش خطر احتمالی واژگونی سرریز شود. وجود تیغه‌های جداکننده جریان باعث کاهش طول موثر تاج سرریز و افزایش ریزش جریان به فاصله دورتری از پنجه سرریز شده و بیشینه عمق آبستگي را کاهش و از پنجه سرریز دورتر می‌کند. باباخواه و خوش فطرت (۲۰۲۴)، آبستگي موضعی پایین دست سرریزهای کلیدپیانویی ذوزنقه‌ای نوع B را همراه با مصالح طبیعی ریپرپ مورد بررسی قرار دادند [۲۳]. ایشان دریافتند که با افزایش طول ریپرپ، بیشینه عمق آبستگي کاهش می‌یابد و فاصله آن نسبت به پنجه سرریز دورتر می‌شود. همچنین ایشان بیان کردند که ریپرپ به دلیل طبیعی بودن، خطر زیست محیطی را نسبت به کف بند کاهش می‌دهد و قیمت آن ارزان تر است. پانتی (۲۰۲۵) نیز در ادامه کار باباخواه و خوش فطرت (۲۰۲۴) از ریپرپ استفاده کرده و اثر چوب‌های عبوری در جریان را بر آبستگي موضعی در پایین دست سرریز کلیدپیانویی مورد بررسی قرار دادند [۲۳-۲۴]. در تحقیق حاضر نیز از بلوک با هندسه‌های متفاوت روی سازه‌ی تونلی در کلیدهای خروجی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی استفاده شد تا مانند مانع عمل کرده و بیشینه عمق آبستگي را کاهش دهند.

با توجه به مطالعات موجود روی آبستگي موضعی پایین دست سرریزهای کلیدپیانویی همچنان به راهکارهایی ارزان تر و بهینه تر برای کاهش آبستگي در این سرریزها و به ویژه سرریزهای کلیدپیانویی نوع B نیاز است. در مطالعه حاضر و برای اولین بار، در صورت بهترین دانش ما، از سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B همراه با هندسه متفاوت بلوک روی سازه‌ی تونلی در کلیدهای خروجی آن استفاده شد. همچنین از سه دبی مختلف جریان، سه عمق پایاب مختلف، مصالح بستر شن، سازه‌ی تونلی با هندسه ثابت و بلوک‌های مکعب مستطیلی و ذوزنقه‌ای و استوانه‌ای در هر کلید خروجی سرریز استفاده شد. در تحقیق حاضر محدودیت‌هایی مانند دائمی بودن جریان و واحد بودن ضریب اصلاح سرعت در نظر گرفته شده است. همچنین در نظر نگرفتن تاثیر گل و لای و آشغال‌های موجود در جریان در مواقع سیلابی نیز یکی دیگر از محدودیت‌های مطالعه حاضر است. در ادامه از آنالیز ابعادی جهت بسط نتایج تحقیق حاضر به طبیعت نیز استفاده شد. با کمک گرفتن از آنالیز ابعادی نیز می‌توان بیشینه عمق آبستگي را



شکل ۲. پارامترهای موثر بر آبشستگی موضعی در پایین دست سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B همراه با سازه تونلی و بلوک.

Fig. 2. Parameters affecting local scour downstream of a rectangular piano key weir type B with tunnel and block structure.

۳- مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در یک فلوم به طول ۱۰ متر، عرض ۰/۸ متر و ارتفاع ۱ متر انجام شدند. شیب کانال صفر بود. جریان توسط دستگاه Programmable Logic Controller (PLC)، پمپ و لوله‌ای به قطر ۸ اینچ، از مخزن زیرزمینی وارد کانال می‌شد. مخزن زیرزمینی دارای حجم ۱۰ متر مکعب و از جنس پی‌وی‌سی بود. یک فلومتر به PLC متصل است که توسط نمایشگر موجود روی دستگاه PLC می‌توان دبی را تنظیم کرد. خطای پمپ ۰/۱ درصد بود. سرریز در فاصله‌ی ۵/۵ متری از ابتدای کانال نصب شد. دلیل انتخاب فاصله‌ی ۵/۵ متری، توسعه‌یافتگی جریان و بر هم منطبق بودن پروفیل‌های سرعت مطابق تحقیق فتحی و همکاران (۲۰۲۵) است [۲۱]. پروفیل‌های سرعت در فاصله‌های ۳/۵، ۴/۰ و ۴/۵ متری از ابتدای کانال بر هم منطبق بودند. سرریز با چسب ضدآب شد و روی یک پایه فلزی به ارتفاع ۰/۳ متر نصب گردید. از سه دبی ۰/۰۳۰، ۰/۰۳۵ و ۰/۰۴۰ متر مکعب بر ثانیه استفاده شد. دمای جریان بین ۸ تا ۱۳ درجه سانتی‌گراد متغیر بود. سه سنسور آلتراسونیک، عمق جریان در بالادست، پایاب و روی تاج سرریز را برداشت کرده و روی PLC نمایش می‌دادند. سنسورها با کف کانال کالیبره و صفر می‌شدند و با موجی که به سطح جریان می‌فرستادند، عمق جریان را برداشت می‌کردند. مدل سنسورها URF بود. سنسور اول در فاصله 4P نسبت به مرکز سرریز و در بالادست، سنسور دوم در فاصله 10P نسبت به

$$\left(\frac{Z_s}{E_1}, \frac{X_s}{E_1}\right) = f\left(\frac{E_2}{E_1}, Fr, Re, We, \frac{\Delta\rho}{\rho}, \frac{d_{50}}{E_1}, Type\right) \quad (2)$$

در رابطه (۲)، Fr از رابطه $(q / (gE_1^3))^{0.5}$ به دست می‌آید. با توجه به عدد رینولدز $(Re = q\rho / \mu)$ بزرگتر از ۴۰۰۰ و وجود جریان کاملاً آشفته و همچنین به دلیل عمق کافی جریان در روی تاج سرریز (بیشتر از ۰/۳ متر)، از عدد وبر $(We = q^2\rho / E_1\sigma)$ ، عدد رینولدز و ضریب کشش سطحی صرف نظر شد [۲۸ و ۲۷]. با ترکیب Fr ، d_{50}/E_1 و $\Delta\rho/\rho$

پارامتر $Fr_d = q / (E_1(g(\Delta\rho/\rho)d_{50}))^{0.5}$ به دست می‌آید.

همچنین نسبت E_2/E_1 را به صورت Er نمایش داده و به آن انرژی نسبی می‌گویند. با این حال، پارامترهای موثر بر آبشستگی موضعی پایین دست سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B همراه با بلوک و سازه تونلی مطابق رابطه (۳) خواهد شد. همچنین با توجه به ثابت بودن پارامتر $\Delta\rho/\rho$ به دلیل طبیعی بودن مصالح شن و حضور آن در پارامتر Fr_d از حضور مستقیم آن صرف نظر شد [۲۱].

$$\left(\frac{Z_s}{E_1}, \frac{X_s}{E_1}\right) = f(Er, Fr_d, Type) \quad (3)$$



شکل ۳. سرریز کلیدپیانویی مستطیلی استفاده شده در تحقیق حاضر.

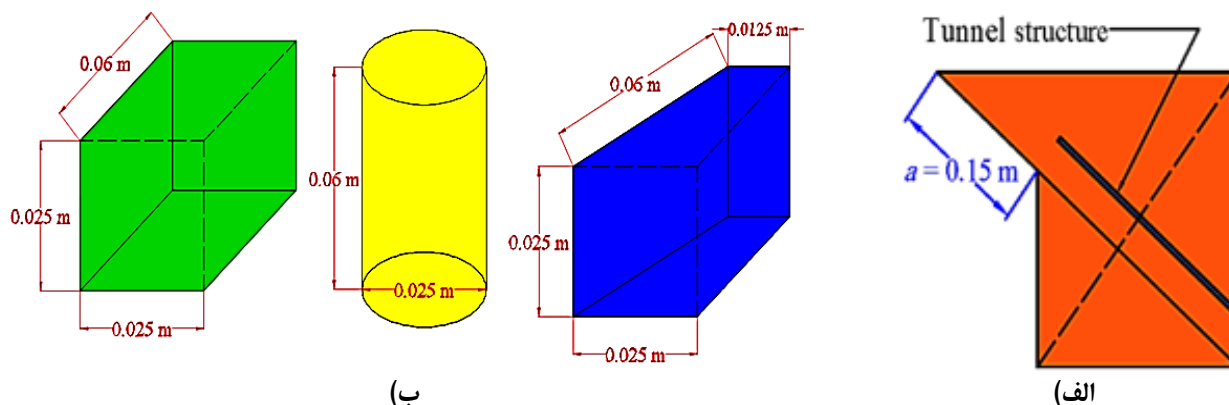
Fig. 3. Rectangular type B PKW used in the present study.

(۲۰۲۴) و چپو، (۱۹۹۲) این زمان به‌عنوان زمان تعادل در نظر گرفته شد [۳۰ و ۱۸]. مصالح بستر غیرچسبیده بودند. دانه‌بندی مصالح بستر به‌صورت یکنواخت است و ضریب یکنواختی مصالح $(\sigma_g = (d_{84} / d_{16})^{0.5})$ که در آن d_{84} و d_{16} قطری هستند که به‌ترتیب ۸۴ و ۱۶ درصد مصالح از آن‌ها ریزترند، برای مصالح شن کمتر از ۱/۶ بودند [۲۱]. ضریب یکنواختی مصالح شن در مطالعه حاضر، ۱/۱۹ است.

مطابق شکل (۳) از یک سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B و با ارتفاع ۰/۲۰ متر استفاده شد. ضخامت سرریز ۰/۰۱ متر، عرض کلیدهای ورودی و خروجی آن $(W_o$ و W_i) برابر ۰/۱۴۵ متر، طول دیواره‌ی آن (B^*) برابر ۰/۴۰ متر، طول لبه‌ی آوریزان در بالادست آن (B_i) برابر ۰/۱۳ متر و طول تاج (L) برابر ۳/۲۷ متر است. سرریز مورد بررسی دارای سه کلید خروجی، دو کلید ورودی و دو نیم‌کلید ورودی است.

از یک ورق مستطیلی به طول ۰/۳۰ متر و عرض ۰/۱۴۵ متر و با همان شیب کلیدهای خروجی و با فاصله ۰/۰۴ متر از کف کلیدهای خروجی در دیواره‌های آن نصب گردید. فاصله‌ی لبه‌ی سازه‌ی تونلی از ابتدای کلیدهای خروجی (a)، ۰/۱۵ متر است. سازه‌ی تونلی به‌صورت آزمون و خطا و به نحوه‌ای در کلیدهای خروجی قرار گرفت که باعث برگشت جریان به بالادست نشود. شکل (۴-الف) به‌صورت شماتیک سازه‌ی تونلی نصب شده در کلیدهای خروجی سرریز را نشان می‌دهد. بر روی سازه‌ی تونلی نصب شده در کلیدهای خروجی و به‌صورت مجزا از بلوک (بافل) با هندسه‌های متفاوت استفاده شد. بلوک‌ها به‌صورت مکعب مستطیلی، دوزنقه‌ای و استوانه‌ای هستند. مشخصات هندسی بلوک‌ها در شکل (۴-ب) ارائه شده

مرکز سرریز عمق جریان در پایین‌دست را برداشت می‌کردند [۲۹]. سنسور سوم نیز عمق جریان روی تاج سرریز را نشان می‌داد. همانطور که در بخش آنالیز ابعادی اشاره شد، عمق جریان روی تاج سرریز همواره بیشتر از ۰/۰۳ متر بود. عمق جریان در بالادست، پایاب و روی تاج سرریز توسط عمق‌سنج نقطه‌ای نیز برداشت شد. عمق‌سنج نقطه‌ای دارای خطای ۰/۰۰۱ متر بود. نتایج نشان داد که عمق‌های برداشت شده توسط سنسورهای آلتراسونیک و عمق‌سنج نقطه‌ای با خطای بسیار ناچیزی مطابقت دارند. از سه عمق پایاب ۰/۰۵، ۰/۱۰ و ۰/۱۵ متر استفاده شد. عمق‌های پایاب توسط دریچه انتهایی موجود در فلوم، قابل تنظیم بودند. عمق‌های پایاب به نحوی انتخاب شدند که جریان روی سرریز به‌صورت آزاد باشد و هرگز مستغرق نشود [۲۱]. بیشترین دبی و کمترین عمق پایاب به نحوی انتخاب شدند تا آبستگي به کف نرسد. از مصالح بستر شن استفاده شد. مصالح به طول ۲ متر، ارتفاع ۰/۳ متر و عرض ۰/۸ متر در بستر پایین‌دست سرریز ریخته شدند. مطابق شکل (۲)، در انتهای مصالح از دیواری صلب استفاده شد تا مصالح ریزش نکنند. دیوار تاثیری بر عمق پایاب نداشت و ارتفاع آن ۰/۳ متر بود. قطر متوسط مصالح شن ۰/۰۰۷۵ متر بود. جاستریج و همکاران (۲۰۱۶) مقدار d_{50}/P را بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۴ نظر گرفتند [۲]. در مطالعه حاضر نیز مقدار d_{50}/P در مصالح شن ۰/۰۳۷۵ است. شن استفاده شده به‌صورت طبیعی بوده و دارای چگالی (ρ_s) برابر ۲۶۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب است. یک آزمایش ۱۶ ساعته برای مصالح شن و در بدترین حالت (بیشترین دبی، کمترین عمق پایاب و در نبود بلوک و سازه‌ی تونلی) انجام شد. تغییرات حفره آبستگي در مصالح شن و در زمان ۹۰۰۰ ثانیه کمتر از ۰/۰۰۱ متر بود. طبق تحقیق فتحی و همکاران،



شکل ۴. الف) سازه‌ی تونلی نصب شده د کلید خروجی سرریز به صورت شماتیک و ب) هندسه متفاوت بلوک‌ها (با فل‌ها).

Fig. 4. a) Schematic of the installed tunnel structure in the weir outlet key, and b) different geometries of the blocks baffles).

بلوک را نشان می‌دهد. از ۲۷ تست برای سرریزهای با بلوک نصب شده در روی سازه‌ی تونلی استفاده شد. در مجموع از ۴۵ تست برای آبستگي با و بدون بلوک و سازه‌ی تونلی استفاده شد.

۴- نتایج و بحث

جریان از روی کلیدهای ورودی سرریز به صورت جت آزاد به پایین دست و داخل کلیدهای خروجی و به صورت جت مایل از کلیدهای خروجی به پایین دست منتقل می‌شود. جریان در ابتدای کلیدهای خروجی همگرا شده و وارد آن می‌شود. در ابتدای کلیدهای خروجی ناحیه استغراق موضعی ایجاد می‌شود که دارای ارتفاع جریان بیشتری است. این ناحیه در ادامه مسیر باعث ایجاد یک گردابه‌ی پر قدرت شده و وارد بستر پایین دست می‌شود. این گردابه سرعت زیادی دارد و مصالح بستر را با خود به راحتی حمل می‌کند.

دو گردابه‌ی سطحی در کنار دیواره‌های کلیدهای خروجی به صورت ساعتگرد و پادساعتگرد نیز تشکیل می‌شود. این گردابه‌ها با مختلط شدن جریان موجود در کلیدهای خروجی و جریان ریخته شده از کلیدهای ورودی به کلیدهای خروجی ایجاد می‌شوند. همانطور که گفته شده این گردابه‌ها به صورت سطحی و با قدرت کمتری وارد بستر می‌شوند. مصالح جابه‌جا شده توسط ناحیه اغتشاش ایجاد شده در پایین دست سرریز که توسط جت وسطی به وجود آمده است، با جت ایجاد شده‌ی سطحی توسط گردابه‌های کناری به پایین دست انتقال می‌یابند. بر خلاف سرریزهای کلیدپایوبی نوع A و C در نوع B لبه‌های آویزان تنها در بالادست سرریز وجود دارند و به دلیل عدم

است. بلوک‌ها مطابق شکل (۲) نیز به نحوه‌ای بر روی سازه‌های تونلی نصب شدند که تأثیری بر عمق جریان در بالادست سرریز نداشته باشند.

با داشتن دبی و عمق جریان در بالادست سرریز توسط سنسور اول و با استفاده از رابطه $(Q = V_1WH)$ ، سرعت جریان در بالادست سرریز محاسبه شد. در این رابطه W عرض کانال و یا عرض سرریز و Q دبی جریان است. با استفاده از رابطه پیوستگی و داشتن عمق جریان در پایین دست سرریز توسط سنسور دوم، سرعت جریان در پایین دست سرریز محاسبه می‌شود. پس از تنظیم دبی و عمق پایاب تست‌ها شروع می‌شدند. بعد از گذشت زمان و به تعادل رسیدن مصالح بستر، پمپ خاموش می‌شد. پس از زهکشی جریان موجود در حفره آبستگي، توسط یک متر لیزری و در ابعاد $0/03$ در $0/03$ متری، تغییرات بستر شسته شده برداشت و ثبت می‌شد و سپس محل بیشینه عمق آبستگي و فاصله‌ی آن نسبت به پنجه سرریز مشخص می‌شد. مدل متر لیزی GLM 80 Laser Measure Archive بود. فتحی و همکاران (۲۰۲۵) نیز بستر آبستگي را به ابعاد $0/03$ در $0/03$ متر زون‌بندی کردند [۲۱]. بعد از پایان هر آزمایش، مصالح بستر مسطح شده و آزمایش بعدی تکرار می‌شد. جدول (۱) پارامترهای هیدرولیکی و رسوبی تاثیرگذار بر آبستگي پایین دست سرریز کلیدپایوبی مستطیلی نوع B در حالت ساده و حالت تونلی و بدون بلوک و در مصالح شن را نشان می‌دهد. از ۱۸ تست برای سرریزهای بدون بلوک و در در صورت سرریز ساده و سرریز تونل‌دار استفاده شد. جدول (۲) رنج تغییرات پارامترهای هیدرولیکی و رسوبی تاثیرگذار بر آبستگي پایین دست سرریز کلیدپایوبی مستطیلی نوع B با هندسه متفاوت

جدول ۱. پارامترهای هیدرولیکی و رسوبی در سرریزهای کلیدپیانویی در حالت سرریز ساده و با سازه تونلی.

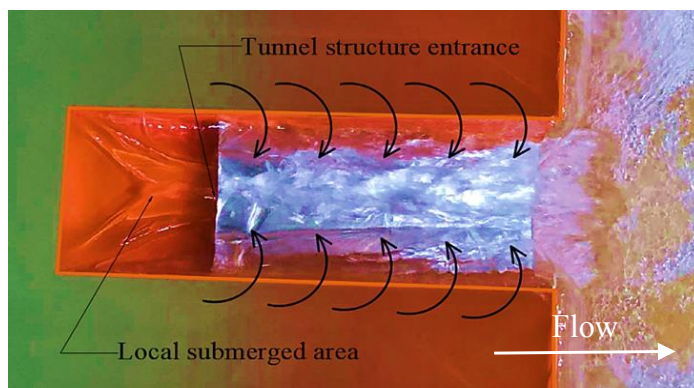
Table 1. Hydraulic and sedimentary parameters in simple and tunnel PKWs.

Q (m ³ /s)	E_1 (m)	E_2 (m)	مدل سرریز	E_2/E_1 (-)	d_{50}/E_2 (-)	Fr_d (-)	Z_s/E_1 (-)	X_s/E_1 (-)
۰/۰۳۰	۰/۲۴۸	۰/۰۷۹	سرریز ساده	۰/۳۱۷	۰/۰۹۵	۰/۴۳۴	۰/۴۸۴	۰/۵۲۸
۰/۰۳۵	۰/۲۵۶	۰/۰۸۹	سرریز ساده	۰/۳۴۸	۰/۰۸۴	۰/۴۹۱	۰/۵۹۵	۰/۵۳۶
۰/۰۴۰	۰/۲۶۳	۰/۱۰۱	سرریز ساده	۰/۳۸۴	۰/۰۷۴	۰/۵۴۶	۰/۷۳۴	۰/۵۴۰
۰/۰۳۰	۰/۲۴۸	۰/۱۰۷	سرریز ساده	۰/۴۳۲	۰/۰۷۰	۰/۴۳۴	۰/۴۳۵	۰/۵۴۸
۰/۰۳۵	۰/۲۵۶	۰/۱۱۰	سرریز ساده	۰/۴۳۰	۰/۰۶۸	۰/۴۹۱	۰/۵۳۶	۰/۵۶۰
۰/۰۴۰	۰/۲۶۳	۰/۱۱۳	سرریز ساده	۰/۴۲۹	۰/۰۶۷	۰/۵۴۶	۰/۶۷۷	۰/۵۶۷
۰/۰۳۰	۰/۲۴۸	۰/۱۵۳	سرریز ساده	۰/۶۱۷	۰/۰۴۹	۰/۴۳۴	۰/۳۸۳	۰/۵۶۸
۰/۰۳۵	۰/۲۵۶	۰/۱۵۴	سرریز ساده	۰/۶۰۴	۰/۰۴۹	۰/۴۹۱	۰/۴۷۷	۰/۵۸۷
۰/۰۴۰	۰/۲۶۳	۰/۱۵۶	سرریز ساده	۰/۵۹۲	۰/۰۴۸	۰/۵۴۶	۰/۶۲۴	۰/۶۰۱
۰/۰۳۰	۰/۲۴۸	۰/۰۷۹	سرریز تونلی	۰/۳۱۷	۰/۰۹۵	۰/۴۳۴	۰/۴۳۵	۰/۵۴۸
۰/۰۳۵	۰/۲۵۶	۰/۰۸۹	سرریز تونلی	۰/۳۴۸	۰/۰۸۴	۰/۴۹۱	۰/۵۴۸	۰/۵۶۰
۰/۰۴۰	۰/۲۶۳	۰/۱۰۱	سرریز تونلی	۰/۳۸۴	۰/۰۷۴	۰/۵۴۶	۰/۶۸۱	۰/۵۵۵
۰/۰۳۰	۰/۲۴۸	۰/۱۰۷	سرریز تونلی	۰/۴۳۲	۰/۰۷۰	۰/۴۳۴	۰/۳۷۹	۰/۵۷۶
۰/۰۳۵	۰/۲۵۶	۰/۱۱۰	سرریز تونلی	۰/۴۳۰	۰/۰۶۸	۰/۴۹۱	۰/۴۸۵	۰/۵۹۹
۰/۰۴۰	۰/۲۶۳	۰/۱۱۳	سرریز تونلی	۰/۴۲۹	۰/۰۶۷	۰/۵۴۶	۰/۶۰۵	۰/۶۰۹
۰/۰۳۰	۰/۲۴۸	۰/۱۵۳	سرریز تونلی	۰/۶۱۷	۰/۰۴۹	۰/۴۳۴	۰/۳۳۰	۰/۶۰۸
۰/۰۳۵	۰/۲۵۶	۰/۱۵۴	سرریز تونلی	۰/۶۰۴	۰/۰۴۹	۰/۴۹۱	۰/۴۱۹	۰/۶۳۴
۰/۰۴۰	۰/۲۶۳	۰/۱۵۶	سرریز تونلی	۰/۵۹۲	۰/۰۴۸	۰/۵۴۶	۰/۵۶۷	۰/۶۳۹

جدول ۲. رنج تغییرات پارامترهای هیدرولیکی و رسوبی در سرریزهای کلیدپیانویی با بافل (بلوک).

Table 2. Range of variation of hydraulic and sedimentary parameters in PKWs with blocks.

Parameter	Minimum	Average	Maximum	Number of tests
Q (m ³ /s)	۰/۰۳۰	۰/۰۳۵	۰/۰۴۰	۳
E_1 (m)	۰/۲۴۸	۰/۲۵۶	۰/۲۶۳	۳
E_2 (m)	۰/۰۷۹	۰/۱۱۸	۰/۱۵۶	۹
d_{50}/E_2 (-)	۰/۰۴۸	۰/۰۷۲	۰/۰۹۵	۹
E_2/E_1 (-)	۰/۳۱۷	۰/۴۶۷	۰/۶۱۷	۹
Fr_d (-)	۰/۴۳۴	۰/۴۹۰	۰/۵۴۶	۳
Z_s/E_1 (-)	۰/۳۰۲	۰/۴۸۴	۰/۶۶۶	۲۷
X_s/E_1 (-)	۰/۵۵۶	۰/۶۱۱	۰/۶۶۶	۲۷



شکل ۵. جدایش جریان موجود روی کلیدهای خروجی با ایجاد سازه‌ی تونلی.

Fig. 5. Separation of the current on the output keys by creating a tunnel structure.



شکل ۶. خروج جریان از کلیدهای خروجی، سازه‌ی تونلی و کلیدهای ورودی به بستر پایین‌دست.

Fig. 6. Flow exiting the outlet keys, tunnel structure, and inlet keys to the downstream bed.

خروجی از کلیدهای خروجی و جریان خروجی از روی سازه‌ی تونلی به صورت جداگانه به پایین‌دست منتقل می‌شوند. جریان خروجی از روی سازه‌ی تونلی در فاصله‌ی بیشتری از پنجه سرریز می‌ریزد که همین امر می‌تواند خطر واژگونی سرریز را کاهش دهد. جریان خروجی از کلیدهای خروجی، سازه‌ی تونلی و کلیدهای ورودی در فاصله‌ای دورتر از پنجه سرریز با هم مخلوط شده و همین امر باعث ایجاد گردابه در جریان می‌شود. وجود گردابه‌ها و چرخش جریان به صورت سطحی بوده و آبستگي کمتری رخ می‌دهد (شکل ۶). در شکل (۶)، پیکان نارنجی، مشکی و سبز به ترتیب نشانگر جریان خروجی از کلیدهای ورودی، کلیدهای خروجی و سازه‌ی تونلی هستند. باین حال، برای کاهش سرعت بیشتر جریان ریزشی از کلیدهای ورودی روی سازه‌ی تونلی،

وجود لبه آویزان در پایین‌دست سرریز، جت آزاد ریزشی از کلیدهای ورودی در نزدیکی پنجه سرریز می‌ریزد. همچنین به دلیل عدم وجود لبه آویزان در پایین‌دست سرریز مورد مطالعه، جریان‌های خروجی از کلیدهای ورودی به نزدیکی پنجه سرریز می‌ریزند که همین امر باعث افزایش آبستگي در کنار پنجه سرریز می‌شود. همانطور که گفته شد، از سازه‌ی تونلی در کلیدهای خروجی سرریز استفاده شد. دلیل استفاده از سازه‌های تونلی جلوگیری از اختلاط جریان خروجی از کلیدهای خروجی و جریان ریزشی از کلیدهای ورودی داخل کلیدهای خروجی است (شکل ۵).

با جلوگیری از اختلاط جریان، گردابه‌های سطحی کناری حذف شده و باعث این می‌شوند تا مصالح کمتری به پایین‌دست انتقال یابد. جریان



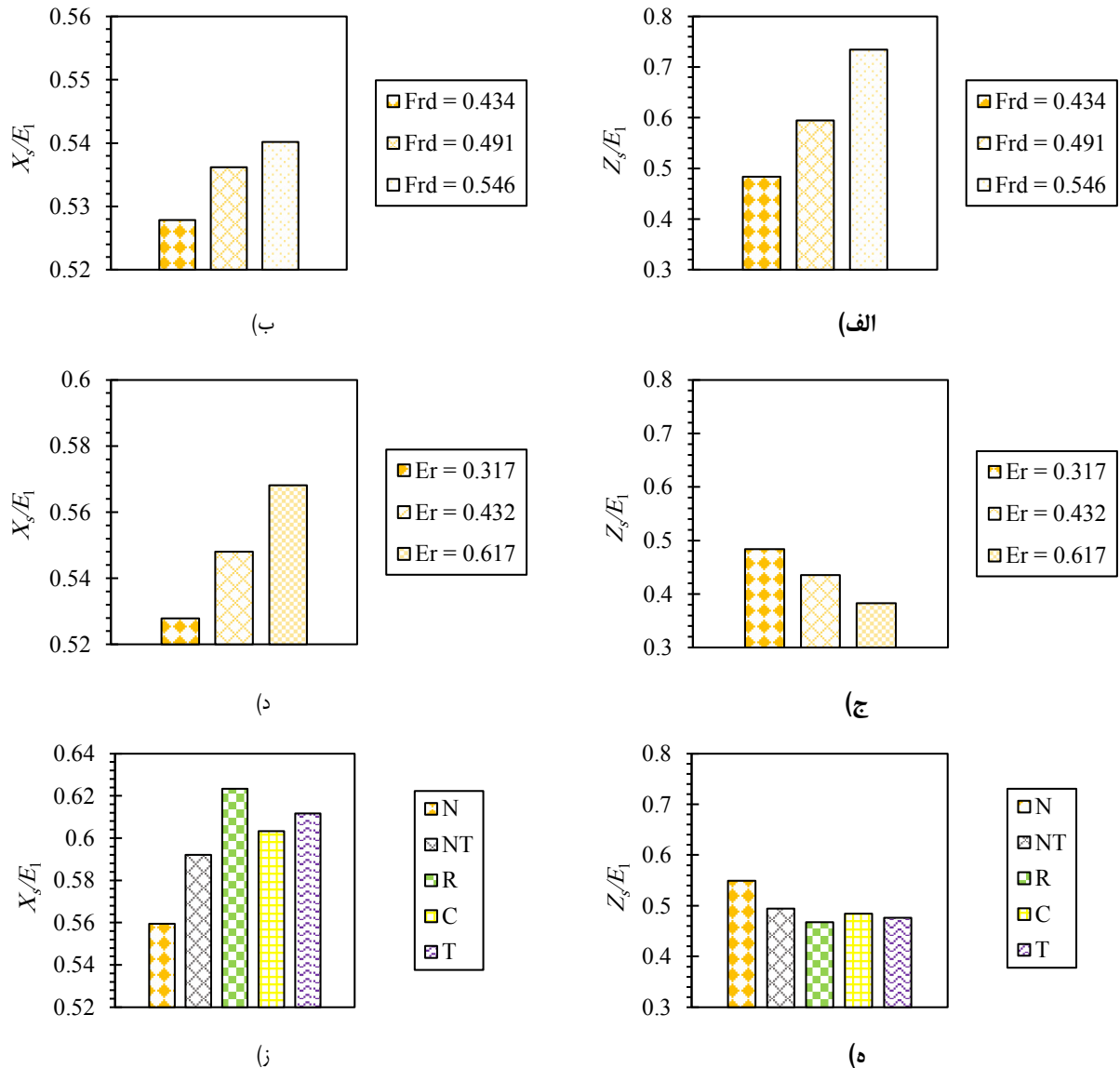
شکل ۷. جریان ایجاد شده روی بلوک‌ها با هندسه‌ی متفاوت.

Fig. 7. Flow created on blocks with different geometry.

در واحد عرض جریان 0.0375 متر مکعب بر ثانیه بر متر، میانگین بیشینه عمق آبستگي در سرریز ذکر شده به ترتیب $21/4$ و $39/6$ درصد و میانگین فاصله‌ی آن نسبت به پنجه سرریز $5/1$ و $9/1$ درصد افزایش می‌یابند. شکل (۸-ج) و (۸-د) به ترتیب تأثیر نسبت هد کل عمق پایاب (E_2) به هد کل عمق جریان در بالادست سرریز (E_1) را بر بیشینه عمق آبستگي و فاصله‌ی آن نسبت به پنجه سرریز نشان می‌دهد. این شکل‌ها در حالت دبی ثابت 0.03 متر مکعب بر ثانیه و در صورت عدم وجود سازه‌ی تونلی و بلوک ارائه شده‌اند. با توجه به ثابت بودن دبی و عمق جریان در بالادست سرریز؛ پس این شکل‌ها تأثیر هد کل عمق پایاب را نشان می‌دهند. با افزایش عمق پایاب، بیشینه عمق آبستگي و ارتفاع حفره آبستگي کاهش می‌یابند. با افزایش عمق پایاب، جریان پایین دست سرریز با جریان خروجی از سرریز مخلوط شده و سرعت آن کاهش می‌یابد. با کاهش سرعت جریان، تنش برشی روی مصالح بستر کاهش می‌یابد و آبستگي (و تکامل آن) تا زمانی که به مقدار بحرانی برابر برسد، ایجاد می‌شود. با افزایش عمق پایاب، طول انتشار جت‌هایی که به مصالح بستر برخورد می‌کنند نیز افزایش می‌یابد [۲۱]. همانطور که گفته شد، با افزایش طول انتشار و کم عمق تر شدن گردابه‌ها و جت‌های موجود، بیشینه عمق آبستگي کاهش می‌یابد و حفره آبستگي کم عمق تر و کشیده تر می‌شود و قدرت پرش هیدرولیکی نیز کاهش می‌یابد، به طوری که پرش هیدرولیکی کم عمق تر شده و می‌توان آن را مستغرق در نظر گرفت [۲۱]. همچنین با افزایش عمق پایاب، حجم گودال آبستگي کاهش می‌یابد و حداکثر عمق آبستگي از پنجه سرریز دورتر می‌شود.

از بلوک استفاده شد. بلوک‌ها مانند مانع عمل کرده و سرعت جریان پس از برخورد با آن‌ها کمتر می‌شود. در پشت بلوک‌ها، جریان دارای چرخش می‌شود و با افزایش دبی، جریان از روی بلوک‌ها به پایین دست پرش می‌کند. به دلیل اینکه جریان از کلیدهای ورودی به کناره‌های سازه‌ی تونلی می‌ریزد؛ در کناره‌های سازه‌ی تونلی از چهار بلوک و در وسط (به صورت زیگزاکی) از یک بلوک استفاده شد. برای درک بهتر چیدمان بلوک‌ها و جریان روی آن‌ها، می‌توانید به شکل (۷) مراجعه کنید.

شکل (۸-الف) و شکل (۸-ب) به ترتیب تأثیر Fr_h را بر بیشینه عمق آبستگي و فاصله‌ی آن نسبت به پنجه سرریز نشان می‌دهند. این شکل‌ها در حالت عمق پایاب ثابت 0.05 متر، و در صورت عدم وجود سازه‌ی تونلی و بلوک ارائه شده‌اند. همانطور که پیداست با افزایش Fr_h بیشینه عمق آبستگي و فاصله‌ی آن از پنجه سرریز افزایش می‌یابند. دلیل آن، افزایش دبی در واحد عرض جریان در بالادست سرریز است. با افزایش دبی در واحد عرض جریان، سرعت جت‌های ریزشی و مایل به پایین دست سرریز، افزایش یافته و بر قدرت اغتشاش جریان می‌افزایند. اغتشاش زیاد جریان نیز تأثیر زیادی بر افزایش تنش برشی دارد. تنش برشی وارد بر مصالح بستر با افزایش Fr_h افزایش می‌یابد و آبستگي تا زمانی که به مقدار بحرانی برسد، توسعه می‌یابد. گودال آبستگي (و تکامل آن) نیز به عمق پایاب بستگی دارد. با افزایش Fr_h مصالح بیشتری شسته شده و به پایین دست منتقل می‌شوند. برای مثال، در سرریز بدون سازه تونلی و بلوک، به طور متوسط، با افزایش $14/3$ و 25 درصدی دبی در واحد عرض جریان نسبت به دبی

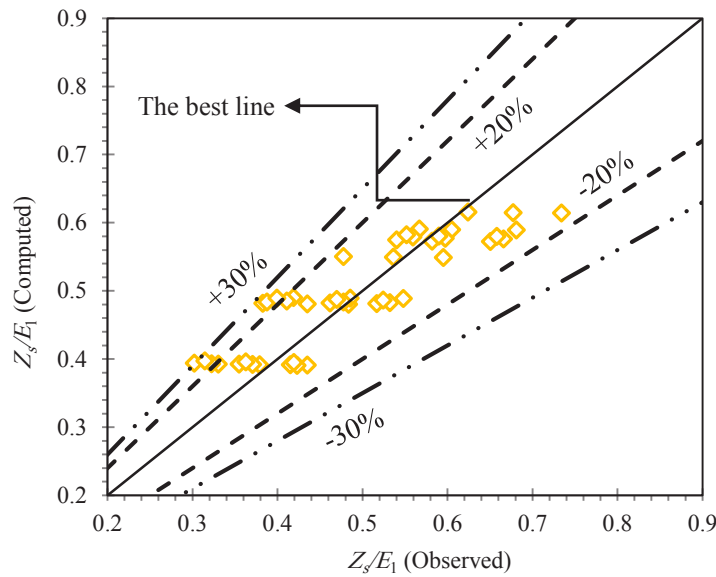


شکل ۸. تأثیر پارامترهای بدون بعد بر بیشینه عمق آبستگي و فاصله آن نسبت به پنجه سرریز.

Fig. 8. The effect of dimensionless parameters on the maximum scour depth and its distance from the weir toe.

سرریز، بیشینه عمق آبستگي کاهش می‌یابد و پروفیل طولی بستر سطحی‌تر می‌شود. همانطور که در بخش مشاهدات آزمایشگاهی به آن اشاره شد، با وجود سازه‌ی تونلی و بلوک‌ها، سرعت جریان خروجی از روی سازه‌ی تونلی کاهش یافته و در نهایت باعث کاهش قدرت اغتشاش جریان و گردابه‌ها در پایین دست سرریز می‌شوند. همچنین یکی دیگر از دلایل آن سطحی‌تر شدن جت‌های خروجی به پایین دست سرریز در صورت عدم اختلاط جت‌ها هستند که همین امر باعث افزایش طول انتشار جریان به پایین دست شده و در نهایت باعث کشیده‌تر و سطحی‌تر شدن حفره آبستگي می‌شود. همچنین

برای مثال، در سرریز بدون سازه تونلی و بلوک، به‌طور متوسط، با افزایش ۵۰ و ۶۶/۷ درصدی عمق پایاب نسبت به عمق پایاب ۰/۰۵ متر، میانگین بیشینه عمق آبستگي در سرریز ذکر شده به ترتیب ۹ و ۱۸/۱ درصد کاهش و میانگین فاصله‌ی آن نسبت به پنجه سرریز ۴/۲ و ۸/۷ درصد افزایش می‌یابند. شکل (۵-۸) و (۸-ز) به ترتیب تأثیر پارامتر Type را بر بیشینه عمق آبستگي و فاصله‌ی آن نسبت به پنجه سرریز نشان می‌دهند. این شکل‌ها در حالت دبی ثابت ۰/۰۳ متر مکعب بر ثانیه، عمق پایاب ۰/۰۴ متر ارائه شده‌اند. همانطور که پیدا است، با سازه‌ی تونلی و بلوک در کلیدهای خروجی



شکل ۹. بیشینه عمق آبستگي مشاهده شده و محاسبه شده.

Fig. 9. Observed and calculated maximum scour depth.

مرتبط به نوع سرریز است که از جدول (۳) قابل ارائه هستند.

$$\frac{Z_s}{E_1} = K_1 (Fr_d^{K_2} Er^{(K_3 Fr_d)}) \quad (4)$$

شاخص‌های آبستگي از پارامترهای مهم در مطالعات آبستگي هستند. یکی از روابط پیشنهادی برای شاخص آبستگي، نسبت دو برابر حداکثر عمق آبستگي به حداکثر فاصله عمق آبستگي نسبت به پنجه سرریز است که در رابطه (۵) به آن اشاره شده است. مقدار کمتر شاخص آبستگي به معنای خطر کمتر واژگونی سرریز است. داشتن بیشینه عمق آبستگي کمتر و فاصله بیشتر نسبت به پنجه سرریز، احتمال شکست و واژگونی سازه‌های هیدرولیکی را کاهش می‌دهد [۲۱].

شکل (۱۰) میانگین شاخص آبستگي را در سرریزهای دارای و ساده، با سازه‌ی تونلی و با بلوک نشان می‌دهد. طبق شکل (۱۰)، میانگین شاخص آبستگي در سرریز دارای سازه تونلی، بلوک مستطیلی، بلوک استوانه‌ای و بلوک دوزنقه‌ای به ترتیب ۱۴/۷، ۲۳/۳، ۱۷/۹ و ۲۰/۴ درصد کمتر از سرریز ساده است. با این حال، شرایط پهنه برای میانگین شاخص آبستگي در سرریز با بسازه‌ی تونلی دارای بلوک مستطیلی مشاهده می‌شود.

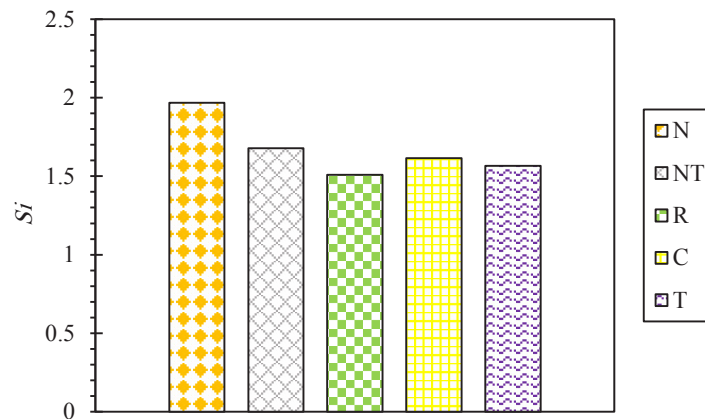
با وجود بلوک‌ها، پرش ایجاد شده در روی سازه تونلی باعث ریزش جت‌ها به فاصله‌ای دورتر از پنجه سرریز و کاهش قدرت آن‌ها می‌شود. میانگین بیشینه عمق آبستگي در سرریز تونلی، سرریز دارای بلوک‌های مستطیلی، دوزنقه‌ای و استوانه‌ای نسبت به سرریز ساده، به ترتیب ۱۰، ۱۴/۸، ۱۳/۲ و ۱۱/۸ درصد کمتر می‌یابد. دلیل کمتر بودن مقدار آبستگي در سرریز دارای بلوک مستطیلی، ایجاد گردابه‌ها و پرش هیدرولیکی در پشت این بلوک‌ها است. در بلوک‌های دوزنقه‌ای به دلیل شیب‌دار بودن، جریان به راحتی از روی آن عبور می‌کند و پرش هیدرولیکی زیادی به چشم نمی‌خورد. در بلوک‌های استوانه‌ای نیز به دلیل دایره‌ای بودن، گردابه‌ای پشت آن تشکیل نمی‌شود و با افزایش دبی نیز این گردابه‌ها قدرت زیادی نسبت به سرریزهای مستطیلی ندارند. جریان در کنار دیواره‌ها نیز پس از برخورد به بلوک‌های کناری به سمت بلوک وسط متمایل شده و از قدرت آن کاسته می‌شود.

رابطه (۴) برای محاسبه بیشینه عمق آبستگي ارائه شده است. این رابطه با ضریب همبستگی ۹۸/۸ درصد است. شکل (۹) نیز بیشینه عمق آبستگي بدون بعد مشاهده شده و محاسبه شده را نشان می‌دهد که با خطای $\pm 20\%$ درصد برای ۸۷ درصد داده‌ها و با خطای $\pm 30\%$ درصد برای ۹۸ درصد داده‌ها مناسب است. این رابطه برای ۷۵ درصد داده‌ها ارائه و با ۲۵ درصد داده‌ها کالیبره شده است. در این رابطه مقدار K_1 ، K_2 و K_3

جدول ۳. مقادیر ضرایب K جهت محاسبه بیشینه عمق آبستنگی.

Table 3. The K coefficient values for calculating maximum scour depth.

Row	Type	K ₁	K ₂	K ₃
۱	N	۱/۱۸	۱/۰۷	۰/۰۱
۲	NT	۱/۷۴	۱/۷۸	۰/۰۱
۳	R	۱/۵۷	۱/۶۵	۰/۰۲
۴	C	۱/۶۲	۱/۶۹	۰/۰۲
۵	T	۱/۶۱	۱/۷۷	۰/۰۲



شکل ۱۰. میانگین شاخص آبستنگی

Fig. 10. The average scour index

مصالح بستر شنی با سرریز دارای حوضچه آرامش USBR نوع I، ۱/۷۸ و بدون آن ۰/۷۸۴ است [۱۷]. شاخص آبستنگی در سرریز ساده مطالعه حاضر با تحقیق ایشان به ترتیب ۹/۶ و ۶۰/۲ درصد بیشتر است. دلیل آن کاهش آبستنگی در سرریز دارای حوضچه آرامش و کاهش قدرت گردابه‌ها در آن است.

میانگین شاخص آبستنگی در بهترین حالت مطالعه فتحی و همکاران (۲۰۲۵)، سرریزهای با تیغه‌های جداکننده جریان شش‌تایی مستطیلی، برابر ۰/۴۵ است [۲۱]. شاخص آبستنگی در مطالعه ایشان حدود ۷۰/۲ درصد کمتر از شاخص آبستنگی در سرریزهای دارای بلوک مستطیلی در تحقیق حاضر است. دلیل آن وجود تیغه‌های جداکننده جریان و ریزش جریان به

$$S_i = \frac{2Z_s}{X_s} \quad (5)$$

ارتفاع سرریز در مطالعه‌ای که توسط جاستریچ و همکاران (۲۰۱۶) انجام شد، ۰/۱۵ متر بود [۲]. ایشان شش آزمایش روی مصالح شنی انجام دادند. میانگین شاخص آبستنگی در مطالعه ایشان ۱/۴۹ بود. در مطالعه حاضر، میانگین شاخص آبستنگی در سرریز ساده ۱/۹۷ است که ۲۴/۴ درصد با میانگین شاخص آبستنگی در مطالعه جاستریچ و همکاران (۲۰۱۶) متفاوت است [۲].

میانگین شاخص آبستنگی در مطالعه رضیوی و همکاران (۲۰۲۳)، در

m	B_i	طول لبه آویزان ورودی	فاصله‌ای دورتر از پنجه سرریز و شرایط هیدرولیکی و مرزی متفاوت در مطالعه ایشان است.
m	d_{50}	قطر متوسط ذرات بستر	
m	d_{16}	قطری که ۱۶ درصد ذرات از آن ریزترند.	۵- نتیجه‌گیری
m	d_{84}	قطری که ۸۴ درصد ذرات از آن ریزترند.	این مطالعه به بررسی کاهش آبستنگی موضعی در پایین‌دست سرریز
m	E_1	انرژی جریان در بالادست سرریز	کلیدپیانویی مستطیلی نوع B با استفاده از سازه‌ی تونلی و بلوک با هندسه
m	E_2	انرژی جریان در پایین‌دست سرریز	متفاوت در کلیدهای خروجی پرداخت. وجود بلوک‌ها به‌طور قابل توجهی
-	Er	انرژی نسبی	بیشینه عمق آبستنگی را کاهش داد، به‌طوری که بلوک‌های مکعب
-	Fr_d	معادل عدد فرود ذرات	مستطیلی مؤثرتر از دیگر از بلوک‌ها بودند. وجود سازه‌ی تونلی نیز تأثیر
m/s ²	g	نیروی گرانشی	به‌سزایی بر کاهش بیشینه عمق آبستنگی گذاشت. این مطالعه رابطه‌ای
m	h	عمق جریان در بالادست سرریز	را برای محاسبه بیشینه عمق آبستنگی با ضریب همبستگی بالا ارائه داد.
m	H	هد کل جریان در بالادست سرریز	محدوده پارامترهای بدون بعد مورد استفاده در این تحقیق (مانند Fr_d ،
-	K	مقادیر ثابت محاسبه شده در رابطه‌ها	Type و E_2/E_1) را می‌توان در جداول (۱ و ۲) مشاهده کرد. همانطور
m	L	طول سرریز	که بحث شد، سازه‌ی تونلی و بلوک‌ها، جریان را به فاصله بیشتری از پنجه
m	P	ارتفاع سرریز	سرریز می‌فرستند که می‌تواند آبستنگی موضعی را کاهش داده و آن را از
m ² /s	q	دبی در واحد عرض	پنجه سرریز دورتر کند. همچنین، این امر به طراحی کارآمدتر و اقتصادی‌تر
m ³ /s	Q	دبی جریان	فونداسیون سرریز کمک می‌کند. یافته‌های کلیدی:
-	Re	عدد رینولدز	• سازه‌ی تونلی به‌طور قابل توجهی عمق آبستنگی را کاهش می‌دهد
m	Ts	ضخامت سرریز	(حدود ۱۰ درصد نسبت به سرریز ساده).
m/s	V_1	سرعت جریان در بالادست سرریز	• به‌دلیل عدم وجود لبه آویزان در پایین‌دست سرریز نوع B، جریان خروجی
m/s	V_2	سرعت جریان در پایین‌دست سرریز	از کلیدهای ورودی به نزدیکی پنجه سرریز می‌ریزند که همین امر باعث
m	W	عرض سرریز	افزایش آبستنگی در کنار پنجه سرریز می‌شود.
m	W_i	عرض کلید ورودی	• بلوک‌ها، حفره آبستنگی را کشیده‌تر و بیشینه عمق آبستنگی را از پنجه
m	W_o	عرض کلید خروجی	سرریز دور کردند و بلوک‌های مستطیلی تغییر بیشتری را نشان دادند.
-	We	عدد وبر	• بلوک‌های مستطیلی نصب شده روی سازه‌ی تونلی کمترین عمق
m	X_s	فاصله بیشینه عمق آبستنگی نسبت به پنجه سرریز	آبستنگی را نشان می‌دهد..
m	y	عمق پایاب	• شاخص آبستنگی در سرریز دارای تونلی و بلوک مستطیلی، عملکرد
m	Y	هد کل جریان در پایین‌دست سرریز	بهبود یافته‌ای را نشان می‌دهد.
m	Z_s	ارتفاع بیشینه عمق آبستنگی	

۶- فهرست علائم

علائم انگلیسی

a	بازشدگی دهانه‌ی سازه‌ی تونلی	m
B^*	طول دیواره‌ی جانبی سرریز	m

Local scour downstream of various shapes of piano key weirs. *Innovative Infrastructure Solutions*, 9(4) (2024) 117. <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01411-x>.

علائم یونانی

Kg/ (m.s)	لزجت دینامیکی	μ
Kg/m ³	چگالی رسوب	ρ_s
-	ضریب اصلاح سرعت	α
Kg/m ³	چگالی آب	ρ_w
Kg/s ²	ضریب کشش سطحی	σ

[7]. Bodaghi, E., Ghodsian, M. and Abdi Chooplou, Ch. The experimental study of downstream scouring of trapezoidal Piano key weir type A under free and submerged flow. *Journal of Hydraulics*, Vol. 18, Issue 1 (2023). <https://doi.org/10.30482/JHYD.2022.330389.1590>.

[8]. Bodaghi E, Abdi Chooplou Ch, Ghodsian M. Experimental investigation of scour downstream of a type A trapezoidal piano key weir under free and submerged flow conditions. *Journal of Hydrology and Hydromechanics.*, 71 (2024). <https://doi.org/10.2478/johh-2023-0041>.

[9]. Dehghan, M. and Karami, H. Numerical investigation of scour downstream of piano key Weirs using Flow-3D software. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 56(2) (2024) 203-228. <https://doi.org/10.22060/CEEJ.2024.22659.8019>.

[10]. Gohari, S. & Ahmadi, F. Experimental study of downstream scour of piano keys weirs. *Journal of Water and Soil Conservation*, 26(1) (2019) 91-109. <https://doi.org/10.22069/JWSC.2019.14680.2961>.

[11]. Yazdi, A., Hosseini, S.A., Nazari, S. & Amanian, N. Comparison of downstream scour of the rectangular and trapezoidal piano key weirs. *Journal of Hydraulics*, 15(2) (2020) 95-112. <https://doi.org/10.30482/JHYD.2020.227522.1453>.

[12]. Yazdi, A.M., Hoseini, S., Nazari, S. and Fazeli, M. Numerical and experimental analysis of scour downstream of piano key weirs. *Sādhanā*, 47(4) (2022) 189. <https://doi.org/10.1007/s12046-022-01960-w>.

[13]. Ghodsian, M., Abdi Chooplou, Ch. & Ghafouri, A. Scouring of triangular and trapezoidal pianos key weir. *Journal of Hydraulics*, 16(2) (2021) 43-58. <https://doi.org/10.30482/JHYD.2021.261439.1497>.

[14]. Jamal, A.A.R., Tahaa, K.Y. and Hayawi, G.A.A.M. Experimental Study of Scour Downstream Piano Key

منابع

- [1] Fathi, A., Khoshfetrat, A., Talebipour, F. and Saadat, M. Influence of rigid vegetation on flow energy dissipation downstream of type B trapezoidal piano key weirs. *Innovative Infrastructure Solutions*, 10(8) (2025) 1-15. <https://doi.org/10.1007/s41062-025-02172-x>.
- [2]. Jüstrich, S., Pfister, M. & Schleiss, A.J. Mobile riverbed scouring downstream of a piano key weir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(11) (2016) 04016043. https://doi.org/10.1061/ASCE_HY.1943-7900.0001189.
- [3]. Ghafouri, A., Ghodsian., M. & Abdi Chooplou, Ch. Experimental study on the effect of discharge and tailwater depth on bed topography downstream of a piano key weir. *Journal of Hydraulics*, 15(3) (2020) 107-122. <https://doi.org/10.30482/JHYD.2020.236770.1465>.
- [4]. Dehrashid, F.A., Gohari., S., Asim., T., Mishra., R., Khoshkonesh., A., Bahamanpouri., F. & Nsom, B. Experimental and numerical study of local scouring downstream of D-type piano key weir. *International Journal of COMADEM*, 25(1) (2022) 51-62.
- [5]. Abdi Chooplou, Ch., Ghodsian, M., Abediakbar, D., & Ghafouri, A. An experimental and numerical study on the flow field and scour downstream of rectangular piano key weirs with crest indentations. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(5) (2023) 140. <https://doi.org/10.1007/s41062-023-01108-7>.
- [6]. Abdi Chooplou, C., Ghodsian, M. and Ghafouri, A.

- [22]. Mshali, K.C., Khoshfetrat, A. and Fathi, A. Experimental study of the effect of jump on the Downstream Scouring of type-C trapezoidal piano key weir. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 56(11) (2024) 1353-1368. <https://doi.org/10.22060/CEEJ.2024.22565.7996>.
- [23]. Babakhah, L. and Khoshfetrat, A. Investigating local scour downstream of Piano key weir with Riprap. *Innovative Infrastructure Solutions*, 9(11) (2024) 1-15. <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01759-0>.
- [24]. Panthi, M. A Laboratory Study of Local Scour and Driftwood Effects at a Type a Piano Key Weir. (2025). <https://doi.org/10.26076/e209-99f7>.
- [25]. Rdhaiwi, A.Q., Khoshfetrat, A. and Fathi, A. Experimental comparison of flow energy loss in type-B and-C trapezoidal piano key weirs. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 28(1) (2024) 55-64. <https://doi.org/10.31272/jeasd.28.1.4>.
- [26]. Fathi, A., Abdi Chooplou, Ch. and Ghodsian, M. An Experimental Study of Flow Energy Loss in Trapezoidal Stepped Piano Key Weirs (PKWs). *Modares Civil Engineering journal*, 23(4) (2023) 163-174. <https://doi.org/10.22034/23.4.163>.
- [27]. Sumer, B.M. & Fredsoe, J. August. Onset of scour below a pipeline exposed to waves. In *The First International Offshore and Polar Engineering Conference*. OnePetro. (1991). <https://doi.org/10.1115/OMAE2010-20719>.
- [28]. Novák, P. & Čabelka, J. *Models in hydraulic engineering: Physical principles and design applications*. Monographs & surveys in water resources engineering. (1981).
- [29]. Singh, D. and Kumar, M. Gene expression programming for computing energy dissipation over type-B Piano Key Weir. *Renewable Energy Focus*, 41 (2022) 230-235. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2022.03.005>.
- [30]. Chiew, Y.M. Scour protection at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(9) (1992) 1260-1269. <https://doi.org/10.1061/ASCE0733-94291992118:91260>.
- Weir Type C with Changing Height of Weir Width of Keys and Apron Solid. *Al-Rafidain Engineering Journal (AREJ)*, 27(1) (2022) 193-204. <https://doi.org/10.33899/rengj.2021.130402.1101>.
- [15]. Lantz, W., Crookston, B.M. & Palermo, M. Apron and cutoff wall scour protection for piano key weirs. *Water*, 13(17) (2021) 2332. <https://doi.org/10.3390/w13172332>.
- [16]. Kumar, B. & Ahmad, Z. Scour downstream of a piano key weir with and without a solid apron. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 148(1) (2022) 04021066. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001647](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001647).
- [17]. Rdhaiwi, A.Q., Khoshfetrat, A. and Fathi, A. Experimental investigation of scour downstream of a C-Type trapezoidal piano key weir with stilling basin. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 27(6) (2023) 688-697. <https://doi.org/10.31272/jeasd.27.6.2>.
- [18]. Fathi, A., Abdi Chooplou, C. and Ghodsian, M. Local scour downstream of type-A trapezoidal stepped piano key weir in sand and gravel sediments. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, (2024) 1–13. <https://doi.org/10.1080/09715010.2024.2353612>.
- [19]. Abdi Chooplou, C., Kahrizi, E., Fathi, A., Ghodsian, M. and Latifi, M. Baffle-Enhanced Scour Mitigation in Rectangular and Trapezoidal Piano Key Weirs: An Experimental and Machine Learning Investigation. *Water*, 16(15), (2024) 2133. <https://doi.org/10.3390/w16152133>.
- [20]. Kazerooni, S., Abdi Chooplou, C. and Ghodsian, M. Effects of flow splitters on local scour downstream of type-A trapezoidal piano key weir. *Applied Water Science*, 14(12) (2024) 247. <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02309-w>.
- [21]. Fathi, A., Khoshfetrat, A. and Alavi, S.H. Downstream Local Scour of PKW with Different Shapes and Numbers of Flow Splitters. *Journal of Hydraulic Engineering*, 151(4) (2025) 04025015. <https://doi.org/10.1061/JHEND8.HYENG-14143>.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

W. Mohammed Wadi, A. Khoshfetrat, M. Habib Jasim, N. Salemi¹, Effect of Blocks on Tunnel Structures on Local Scour Downstream of Piano Key Weirs, Amirkabir J. Civil Eng., 57(12) (2026) 2013-2032.

DOI: [10.22060/ceej.2026.24423.8305](https://doi.org/10.22060/ceej.2026.24423.8305)



