



Experimental study of the effect of jump on the Downstream Scouring of type-C trapezoidal piano key weir

Kadhim Challob Mshali¹, Ali Khoshfetrat^{1*}, Amirhossein Fathi²

¹Department of Civil Engineering, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

²Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

ABSTRACT: Piano key weirs (PKWs) represent an evolved and novel type of labyrinth weirs, offering a higher discharge coefficient when compared to linear weirs. Recent attention has focused on investigating energy loss and downstream scouring associated with piano key weirs, given their high efficiency and potential for reducing financial and life risks. In this research, a type-C trapezoidal piano key weir with a height of 0.2 m was utilized, incorporating two jumps with radii of 0.15 and 0.21 m at the weir outlet keys. After setting the flow rate and the tailwater, scouring was started, and then after the equilibration time, the pump was turned off after complete drainage, and the bed profile was taken by a laser meter. The findings indicated that the presence of a jump contributes to an increase in maximum scour depth. Furthermore, the presence of a jump causes the maximum scouring depth to occur further away from the weir toe. Increasing the radius of the jumps also results in an augmented maximum scour depth. The length of the maximum scour depth, compared to the weir toe, is approximately 12% greater in weirs with a bigger jump radius than those with a smaller radius. On average, the maximum length of the scour depth about the weir toe is 29.4% and 19.5% longer in weirs with jump radii of 0.21 and 0.15 m, respectively, compared to weirs without jumps. Additionally, the presence of a jump diminishes scouring at the weir toe, with toe scour being approximately 42% less pronounced in weirs with a bigger jump height compared to weirs without jumps. The average scour index in weirs with jump radii of 0.21 and 0.15 m is approximately 2.77% and 0.52% lower, respectively, compared to weirs without jumps. Moreover, an increase in jump radius correlates with a decrease in the discharge coefficient.

Review History:

Received: Jul. 19, 2023

Revised: Feb. 07, 2024

Accepted: Sep. 16, 2024

Available Online: Oct. 03, 2024

Keywords:

Piano key Weir (PKW)

Local Scour

Jump Effect

Experimental Investigation

Discharge Coefficient

1- Introduction

Due to the light foundation and high discharge coefficient in piano key weirs, it is very important to investigate the local scour downstream of these hydraulic structures and find a solution to reduce it. Piano key weirs have triangular, rectangular, and trapezoidal shapes in plan and have four types A, B, C, and D. Type A has overhangs upstream and downstream of the weir, and types B and C have overhangs upstream and downstream of the weir, and type D has no overhangs. Many studies have been done on the influence of geometric and hydraulic parameters on the discharge coefficient of these weirs, but fewer study have investigated their scouring. In recent years, Fathi et al. (2024) reduced scour downstream of the weir by creating steps in the outlet keys of the A-type trapezoidal PKW [1]. Also, Abdi et al. (2024) reduced the scour downstream of the weir by creating a baffle in the weir outlet keys of the type A trapezoidal PKW [2]. Due to the high efficiency of piano key weirs compared to linear weirs, it is very important to study scouring in their case. Also, according to the above information and

the research conducted on the scouring of piano key weirs, no study has been done on the presence of a jump and its function in reducing or increasing scouring. Moving away the maximum scour depth from the weir toe and reducing scour in the weir toe are also of great importance; Because they reduce the risk of overturning the weir. In this study, it was tried a trapezoidal piano key weir with a height of 0.2 m and two jumps with heights and radii of 0.14, 0.075, 0.21, and 0.15 m to reduce the amount of scour in their toe and, the distance of the maximum scour depth to the lower toe should be specified. Also, three tailwater depths, three flow rate depths, and gravel materials were used in the downstream bed of the weir.

2- Dimensional analysis

By using Buckingham's theory and considering the three repeated variables of discharge per unit width (q), water density, and flow depth plus the equivalent height of kinetic energy upstream of the weir (H_u), the following dimensionless relations are obtained. In this relation, h is the height of the

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



jumps, R is the radius of the jumps, Fr_d is the landing number of particles, Z_s is the maximum scour depth (Z_s), its distance from the weir toe (X_s), and the scour of the weir toe (Z_t).

$$\frac{\phi}{H_u} = f(Fr_d, \frac{R}{h}) \quad (1)$$

3- Materials and methods

The experiments were carried out in a laboratory flume with a length of 10 m, a width of 0.6 m, and a height of 0.8 m. The flow enters the tank with flow stabilizers through two surface tanks and then enters the laboratory flume and reaches the weir after 5.5 m. The weir has a width of $W=0.6$ m, height of $P=0.2$ m, width of inlet keys $W_i=0.215$ m, width of outlet keys $W_o=0.075$ m, length of overhang downstream of weir $B_o=13$ m, The length of the side walls is $B=0.5$ m, the crest lengths is $L=6.2$ m, and the thickness of the crest is $Ts=0.01$ m. Three flow rates of 0.03, 0.035, and 0.04 m³/s were used. The flow rate was adjusted by a valve and a monitor (to show its value) with an error of $\pm 0.01\%$. Also, by the valve at the end of the laboratory channel, the three tailwater depths were set equal to 0.05, 0.1, and 0.15 m. Before turning on the pump, a galvanized sheet was used on the bed, and after adjusting the flow rate and tailwater depth, this metal bed was slowly removed from the bed to prevent initial scouring. The used gravel material has uniform granulation, the average diameter of particles is equal to 0.0075 m and the specific density is equal to 2650 kg/m³. The jumps used at the end of the outlet keys weir have a radius of 0.21, 0.15 m, and a height of 0.14 and 0.075 m, respectively. After 150 (minutes), the pump was turned off and after drainage, the bed was removed by a laser meter. The scouring changes in 150 (minutes) for gravel is less than 1 mm and this time was considered as the equilibrium time. Also, the depth upstream of the weir was measured by a point gauge with an error of ± 1 mm.

4- Results and discussion

The flow passing over the C-type trapezoidal piano key weir flows as an inclined jet from the outlet keys and as a free-falling jet from the input keys to the downstream. In the type C piano key weir, due to the absence of an overhang upstream of the weir, the slope of the outlet keys is higher and the length of the submerged area or the local protrusion of the current in the outlet keys is very small. The lack of overhangs upstream of the weir has caused the indentation of the flow at the entrance of the outlet keys. Also, due to the greater slope in the outlet keys, scouring has been created near the weir toe, and due to the overhang downstream of the weir, the flow falls into the bed in the form of a jet and causes flow disturbance in this place. This disturbance of the flow causes the material to return to the side of the weir and the slope of the scour downstream of the weir becomes more inclined and at the place of the flow falling from the overhang of the inlet key to the bed, the gravel materials are slightly raised. The existence of the jump and its height increases the depth of the flow in the outlet keys, water backs up to the upstream

side of the weir and finally reduces the discharge coefficient. However, the presence of the jump causes the flow to be thrown downstream. After the flow hits the materials, it causes local scour at a distance away from the weir toe. Also, a weak hydraulic jump was observed downstream of the weir without a jump. In weirs with jumps and especially in weirs with larger radii, the hydraulic jump becomes stronger and creates eddies downstream and at the place where it meets the depth of the abutment. The existence of these eddies causes the materials to be washed and their rotation. After rotating the materials and separating them from the surface of the bed, they are transported downstream along with the flow. This collision and disturbance of the flow causes the scour to rise more. Also, by increasing the radius of the jumps, hydraulic jumps are formed at a further distance from the weir toe. The impact of the current in the jumps becomes more inclined to the bed and acts like an inclined jet. After the flow hits the material, it creates a pit and returns the material to the weir toe. The flow rate and the tailwater depth have an effect on the amount of erosion. As the flow rate increases, the flow velocity increases, and the scour increases. Increasing the speed causes stronger eddies and more disturbance of the flow. Increasing the flow rate also increases the volume and length of the scour hole. As the tailwater depth decreases, the maximum scour depth also increases. The presence of a greater tailwater depth reduces the velocity of the flow downstream and prevents further scouring. As the flow rate increases, the flow depth upstream of the weir increases and the discharge coefficient decreases. Also, with the increase in flow rate in the jump weirs, the depth of flow upstream of the weir increases and the discharge coefficient of the weir decreases. On average, the value of the discharge coefficient in the weir without a jump, the weir with A smaller jump, and the weir has a bigger jump to 2.76, 2.65, and 2.46, respectively. Equations 2, 3, and 4 are provided to calculate the maximum scour depth, its distance from the weir toe, and the scour depth in the weir toe, respectively, and K coefficients 1 to 4 can be seen in Table 1.

$$\frac{Z_s}{H_u} = K_1 (Fr_d)^2 + K_2 Fr_d \quad (2)$$

$$\frac{X_s}{H_u} = 1.5719 \frac{Z_s}{H_u} \quad (3)$$

$$\frac{Z_t}{H_u} = K_3 \left(\frac{Z_s}{H_u}\right)^2 + K_4 \frac{Z_s}{H_u} \quad (4)$$

5- Conclusion

The presence of jumps in the weir outlet keys of the C-type trapezoidal piano key weirs has increased the maximum amount of scouring depth, but it causes the maximum scouring depth to move away from the weir toe and reduces

Table 1. Calculation of K values to calculate the maximum scour depth and scour depth in the weir toe

Row	R/h	K_1	K_2	K_3	K_4
1	0	-16.616	27.290	0.0964	0.1514
2	1.5	-52.473	38.565	0.1484	-0.396
3	2	-50.644	36.632	0.1594	-0.325

the scouring of the weir toe. In the jump weir with a larger jump radius, the distance of the maximum scour depth is far away from the weir toe and the amount of weir scour is less. The average value of the maximum scour depth in weirs with a jump radius of 0.21 and 0.15 m is 27 and 19% higher than the weir without a jump. Also, the average value of the maximum scour depth compared to the weir toe in weirs with

jumps with a jump radius of 0.21 and 0.15 m compared to the weir without a jump is 29.4 and 19.5% less, respectively, and the average amount of scour to the weir in them, respectively, it is about 42 and 25.6% less. Jump increases scouring index. Also, the presence of a jump with a higher edge height and radius reduces the discharge coefficient.

References

- [1] Fathi, A., Abdi Chooplou, Ch. and Ghodsian, M. 2024. Local scour downstream of type-A trapezoidal stepped PKW in sand and gravel sediments. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, pp. 1–13. DOI: 10.1080/09715010.2024.2353612
- [2] Abdi Chooplou, C., Kahrizi, E., Fathi, A., Ghodsian, M. and Latifi, M., 2024. Baffle-Enhanced Scour Mitigation in Rectangular and Trapezoidal Piano Key Weirs: An Experimental and Machine Learning Investigation. *Water*, 16(15), p.2133. DOI: 10.3390/w16152133



بررسی آزمایشگاهی تأثیر جامپ بر آبشستگی پایین دست سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع C

کاظم جلوب مشالی^۱، علی خوش فطرت^{۱*}، امیرحسین فتحی^۲

۱. گروه مهندسی عمران، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.
۲. گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۸
بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۱۸
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۶
ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۰۷/۱۲

کلمات کلیدی:

سرریز کلیدپیانویی
آبشستگی موضعی
تأثیر جامپ
بررسی آزمایشگاهی
ضریب آبگذری

خلاصه: سرریزهای کلیدپیانویی شکل جدید و تکامل یافته‌ی سرریزهای کنگره‌ای هستند. بررسی اتلاف انرژی و آبشستگی پایین دست سرریزهای کلیدپیانویی، به دلیل راندمان بالای این سازه‌ها و کاهش خطرات مالی و جانی، اهمیت بیشتری دارد. در این تحقیق از یک سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع C و با ارتفاع ۰/۲ متر استفاده شد. همچنین از دو جامپ با شعاع ۰/۱۵ و ۰/۲۱ متر در انتهای کلیدهای خروجی سرریز نیز استفاده شد. پس از تنظیم دبی جریان و عمق پایاب، آبشستگی آغاز می‌شد و سپس با گذشت زمان تعادل، پمپ خاموش شده و بعد از زهکشی کامل، پروفیل بستر توسط متر لیزری برداشت شد. نتایج چنین بود که وجود جامپ باعث افزایش بیشینه عمق آبشستگی می‌شود؛ همچنین وجود جامپ باعث دور شدن فاصله‌ی بیشینه عمق آبشستگی از پنجه سرریز می‌شود. با افزایش شعاع جامپ‌ها، بیشینه عمق آبشستگی نیز افزایش می‌یابد. طول بیشینه عمق آبشستگی نسبت به پنجه سرریز شعاع بیشتر حدود ۱۲ درصد بیشتر از طول بیشینه عمق آبشستگی نسبت به پنجه سرریز با شعاع کمتر است. میانگین طول بیشینه عمق آبشستگی نسبت به پنجه در سرریزهای با شعاع جامپ ۰/۲۱ متر و ۰/۱۵ متر نسبت به سرریز بدون جامپ، حدود ۲۹/۴ و ۱۹/۵ درصد بیشتر و از پنجه سرریز دورتر است. همچنین وجود جامپ باعث کاهش آبشستگی در پنجه سرریز شد. آبشستگی پنجه سرریز در سرریز با ارتفاع جامپ بزرگتر نسبت به سرریز بدون جامپ، حدود ۴۲ درصد کمتر است. میانگین شاخص آبشستگی در سرریزهای با شعاع جامپ ۰/۲۱ و ۰/۱۵ متر نسبت به سرریز بدون جامپ، حدود ۲/۷۷ و ۰/۵۲ درصد کمتر است. همچنین با افزایش شعاع جامپ، ضریب آبگذری کاهش می‌یابد.

۱- مقدمه

می‌گذارند. با افزایش دبی، کاهش قطر مصالح بستر، کاهش عمق پایاب و افزایش ارتفاع ریزش جریان، آبشستگی افزایش می‌یابد [۱]. گوهری و احمدی (۲۰۱۹)، با بررسی آزمایشگاهی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع A دریافتند که با افزایش تعداد کلیدهای سرریز، آبشستگی افزایش می‌یابد [۲]. غفوری و همکاران (۲۰۲۰)، با بررسی آزمایشگاهی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای شکل نوع A دریافتند که عمق پایاب و دبی جریان روی آبشستگی تأثیرگذارند [۳]. کومار و احمد (۲۰۲۰) با بررسی آزمایشگاهی روی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی کفبنددار نوع A دریافتند که وجود کفبند باعث کاهش آبشستگی می‌شود [۴]. یزدی و همکاران (۲۰۲۰)، با بررسی آزمایشگاهی روی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای و مستطیلی نوع A دریافتند که میزان آبشستگی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای کمتر از میزان آبشستگی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی است [۵]. قدسیان و همکاران (۲۰۲۱)، با بررسی آزمایشگاهی سرریزهای کلیدپیانویی دوزنقه‌ای و مثلی نوع A دریافتند که

به دلیل فونداسیون سبک و ضریب آبگذری بالا در سرریزهای کلیدپیانویی؛ لذا بررسی آبشستگی موضعی پایین دست این سازه‌های هیدرولیکی و راهکار برای کاهش آن، دارای اهمیت بالایی است. سرریزهای کلیدپیانویی دارای شکل‌های مثلی، مستطیلی و دوزنقه‌ای در پلان و دارای چهار تیپ A، B، C و D هستند. نوع A دارای لبه آویزان در بالادست و پایین دست سرریز، نوع B و C به ترتیب دارای لبه آویزان در بالادست و پایین دست سرریز و نوع D فاقد لبه آویزان است. مطالعات زیادی در مورد تأثیر پارامترهای هندسی و هیدرولیکی بر ضریب آبگذری این سرریزها انجام شده است؛ اما افراد کمتری به بررسی آبشستگی آن‌ها پرداخته‌اند. جاستریچ و همکاران (۲۰۱۶)، به بررسی آزمایشگاهی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع A پرداختند و دریافتند که عمق پایاب، دبی، قطر مصالح و ارتفاع ریزش جریان بر آبشستگی تأثیر

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: khoshfetrat@khuisf.ac.ir



در رابطه بالا Z_t آبشستگی پنجه سرریز، X_s فاصله بیشینه عمق آبشستگی از پنجه سرریز و Z_s ارتفاع بیشینه عمق آبشستگی هستند که در روابط آن‌ها بصورت ϕ نشان داده شده اند. همچنین q دبی در واحد عرض، H_u عمق جریان به علاوه ارتفاع معادل انرژی جنبشی در بالادست سرریز، H_d عمق جریان به علاوه ارتفاع معادل انرژی جنبشی در پایاب، g شتاب گرانش، μ لزجت دینامیکی، σ ضریب کشش سطحی، ρ_w چگالی آب، ρ_s چگالی مصالح بستر، d_{50} قطر متوسط ذرات، R شعاع جامپ و h ارتفاع جامپ هستند. با استفاده از تئوری پی باکینگهام و در نظر گرفتن سه متغیر تکراری دبی در واحد عرض، چگالی آب و عمق جریان به علاوه ارتفاع معادل انرژی جنبشی در بالادست سرریز، روابط بدون بعد زیر حاصل می‌شوند.

$$\frac{\phi}{H_u} = f\left(\frac{H_d}{H_u}, Fr = \frac{q}{H_u (gH_u)^{0.5}}, Re = \frac{q}{\nu}, We = \frac{\rho_w q^2}{H_u \sigma}, \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} = S - 1, \frac{d_{50}}{H_u}, \frac{R}{H_u}, \frac{h}{H_u}\right) \quad (2)$$

به دلیل آشفستگی زیاد جریان از عدد رینولدز صرف نظر می‌شود (سامر و فردوسو، ۱۹۹۱) و همچنین به دلیل عمق بیشتر از 0.3 متر روی تاج سرریز، از عدد وبر صرف نظر خواهد شد (نواک و همکاران، ۱۹۹۸) [12,13]. با ترکیب عدد فرود، پارامتر $\frac{d_{50}}{H_u}$ ، پارامتر $S-1$ و پارامتر $\frac{H_d}{H_u}$ عدد بدون بعد $Fr_d = \frac{q}{H_d \sqrt{gd_{50}(s-1)}}$ حاصل می‌شود. همچنین با ترکیب دو پارامتر $\frac{R}{H_u}$ و $\frac{h}{H_u}$ پارامتر $\frac{R}{h}$ حاصل می‌شود.

$$\frac{\phi}{H_u} = f\left(Fr_d, \frac{R}{h}\right) \quad (3)$$

۳- مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۱۰ متر، عرض 0.6 متر و ارتفاع 0.8 متر انجام شد. مطابق شکل ۱، جریان توسط دو مخزن سطحی وارد مخزن دارای آرام‌کننده‌های جریان شده و سپس وارد فلوم آزمایشگاهی

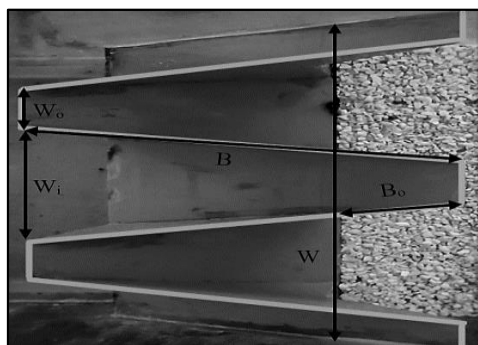
آبشستگی در سرریز دوزنقه‌ای به مراتب کمتر از سرریز مثلثی شکل است [۶]. جمال و همکاران (۲۰۲۱)، با بررسی آزمایشگاهی روی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع C دریافتند که با کاهش ارتفاع سرریز و کاهش نسبت عرض کلیدهای ورودی به عرض کلیدهای خروجی، میزان آبشستگی و بیشینه عمق آبشستگی کاهش می‌یابد [۷]. لنتز و همکاران (۲۰۲۱)، با ایجاد کفبند پایین دست سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع A دریافتند که با وجود کفبند، میزان آبشستگی کاهش می‌یابد. ایشان همچنین طول کفبند بهینه را $1/5$ برابر ارتفاع سرریز در نظر گرفتند [۸]. عبدی چوپلو و همکاران (۲۰۲۲)، با بررسی آزمایشگاهی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع A دریافتند که با افزایش عدد فرود ذرات، آبشستگی نیز افزایش می‌یابد [۹]. همچنین ایشان در تحقیقی جداگانه و با بررسی آزمایشگاهی روی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع A دریافتند که با افزایش عمق پایاب، حفره آبشستگی کاهش می‌یابد [۱۰]. بدای و همکاران (۲۰۲۲)، با بررسی آزمایشگاهی روی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع A دریافتند که آبشستگی در حالت جریان مستغرق به مراتب کمتر از آبشستگی در حالت جریان آزاد است [۱۱].

با توجه به راندمان بالای سرریزهای کلیدپیانویی نسبت به سرریزهای خطی؛ لذا مطالعه آبشستگی در مورد آنها دارای اهمیت بالایی است. همچنین با توجه به مطالب بالا و تحقیقات صورت گرفته روی آبشستگی سرریزهای کلیدپیانویی، در مورد وجود جامپ و عملکرد آن بر کاهش یا افزایش آبشستگی، مطالعه‌ای صورت نگرفته است. دورشدن بیشینه عمق آبشستگی از پنجه سرریز و کاهش آبشستگی در پنجه سرریز نیز دارای اهمیت بالایی هستند؛ زیرا باعث کاهش خطر واژگونی سرریز می‌شوند. در این مطالعه سعی شد از سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای با ارتفاع 0.2 متر و دو جامپ با ارتفاع و شعاع‌های 0.14 ، 0.075 ، 0.21 و 0.15 استفاده شود تا تأثیر آن بر کاهش مقدار آبشستگی در پنجه سرریز و فاصله بیشینه عمق آبشستگی نسبت به پنجه سرریز مشخص گردد. همچنین از سه عمق پایاب، سه دبی و مصالح شن در بستر پایین دست سرریز استفاده گردید.

۲- آنالیز ابعادی

رابطه (۱)، پارامترهای موثر بر آبشستگی پایین دست سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع C را همراه با جامپ نشان می‌دهد.

$$Z_t, X_s, Z_s = f(q, H_u, H_d, g, \mu, \sigma, \rho_w, \rho_s, d_{50}, R, h) \quad (1)$$



شکل ۲. سرریز کلیدپیانویی ذوزنقه‌ای نوع C

Fig. 2. C-type trapezoidal piano key weir



شکل ۱. مشخصات کانال آزمایشگاهی

Fig. 1. Laboratory channel specifications



شکل ۳. شیر و مانیتور تنظیم‌کننده دبی جریان

Fig. 3. Flow regulator valve and monitor



اولیه جلوگیری شود. مصالح شن مورد استفاده دارای دانه‌بندی یکنواخت، قطر متوسط ذرات برابر 0.075 متر و با چگالی ویژه برابر $2/65$ است. جامپ‌های مورد استفاده در انتهای کلیدهای خروجی سرریز دارای شعاع 0.21 ، 0.15 متر و به ترتیب دارای ارتفاع 0.14 و 0.075 متر هستند. پس از گذشت مدت زمان 150 دقیقه، پمپ را خاموش کرده و پس از زهکشی، بستر توسط متر لیزری برداشت شد. تغییرات آبستگي در زمان 150 دقیقه برای شن کمتر از یک میلی‌متر است و برابر با معیار چپو (۱۹۹۲)، این زمان به عنوان زمان تعادل در نظر گرفته شد [۱۴]. همچنین عمق بالادست سرریز توسط عمق‌سنج سوزنی با خطای ± 1 میلی‌متر اندازه‌گیری شد. جدول ۱ مشخصات داده‌های هیدرولیک جریان در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد که در آن Q دبی جریان، h_u عمق جریان در بالادست سرریز و h_d عمق جریان در

می‌شود و پس از طی $5/5$ متر به سرریز می‌رسد. مطابق شکل ۲، سرریز دارای عرض $W=0/6$ m، ارتفاع $P=0/2$ m، عرض کلید ورودی $W_i=0/215$ m، عرض کلید خروجی $W_o=0/075$ m، طول لبه آویزان در پایین دست سرریز $B_o=0/13$ m، طول دیواره‌های جانبی $B=0/5$ m، طول تاج $L=2/6$ m و ضخامت تاج $T_s=0/01$ m است. از سه دبی 0.03 ، 0.035 و 0.04 متر مکعب بر ثانیه استفاده شد. تنظیم دبی به وسیله‌ی یک شیر و یک مانیتور (برای نشان دادن مقدار آن) با خطای $\pm 0/01$ درصد صورت گرفت (شکل ۳). همچنین توسط دریچه در انتهای کانال آزمایشگاهی، سه عمق پایاب برابر با 0.05 ، 0.1 و 0.15 متر تنظیم شد. قبل از روشن کردن پمپ، از یک ورق گالوانیزه بر روی بستر استفاده شد و پس از تنظیم دبی و عمق پایاب، این بستر فلزی از روی بستر به آرامی برداشته شد تا از آبستگي

جدول ۱. مشخصات هیدرولیکی آزمایش‌ها

Table 1. Hydraulic characteristics of the tests

Row	Q (m ³ /s)	h_u (m)	h_d (m)	H_u (m)	H_d (m)	Fr_d	R/h
1	0.03	0.033	0.05	0.035	0.101	0.111	1.5
2	0.03	0.033	0.1	0.035	0.113	0.108	1.5
3	0.03	0.033	0.15	0.035	0.156	0.099	1.5
4	0.035	0.037	0.05	0.040	0.119	0.124	1.5
5	0.035	0.037	0.1	0.040	0.117	0.125	1.5
6	0.035	0.037	0.15	0.040	0.158	0.115	1.5
7	0.04	0.041	0.05	0.045	0.141	0.136	1.5
8	0.04	0.041	0.1	0.045	0.123	0.142	1.5
9	0.04	0.041	0.15	0.045	0.160	0.131	1.5
10	0.03	0.031	0.05	0.033	0.101	0.111	2
11	0.03	0.031	0.1	0.033	0.113	0.108	2
12	0.03	0.031	0.15	0.033	0.156	0.099	2
13	0.035	0.035	0.05	0.038	0.119	0.124	2
14	0.035	0.035	0.1	0.038	0.117	0.125	2
15	0.035	0.035	0.15	0.038	0.158	0.115	2
16	0.04	0.039	0.05	0.043	0.141	0.136	2
17	0.04	0.039	0.1	0.043	0.123	0.142	2
18	0.04	0.039	0.15	0.043	0.160	0.131	2
19	0.03	0.030	0.05	0.0334	0.101	0.111	0
20	0.03	0.030	0.1	0.0334	0.113	0.108	0
21	0.03	0.030	0.15	0.0334	0.156	0.099	0
22	0.035	0.034	0.05	0.0372	0.119	0.124	0
23	0.035	0.034	0.1	0.0372	0.117	0.125	0
24	0.035	0.034	0.15	0.0372	0.158	0.115	0
25	0.04	0.038	0.05	0.0419	0.141	0.136	0
26	0.04	0.038	0.1	0.0419	0.123	0.142	0
27	0.04	0.038	0.15	0.0419	0.160	0.131	0

نرمال‌سازی انحراف جذر میانگین مربعات (normalized root-)

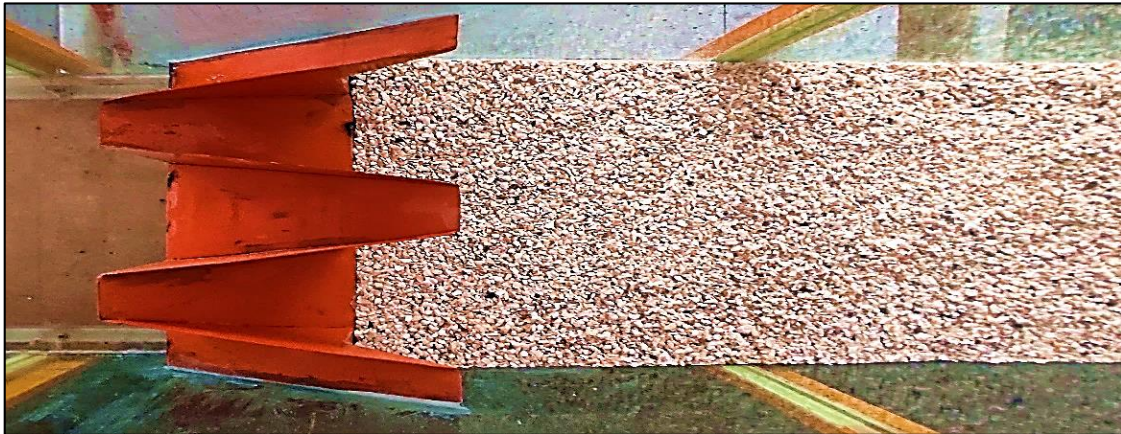
(mean-square deviation) یا خطای (NRMSE) توسط بازه مقادیر مشاهده شده به شرح زیر است که در آن X_{max} بزرگ‌ترین داده و X_{min} کوچک‌ترین داده آزمایشگاهی مشاهده شده است.

پایین‌دست سرریز است.

برای تعیین خطاهای مدل عددی از ریشه میانگین مربعات خطای (RMSE) و با توجه به رابطه زیر (۴) استفاده شد. در رابطه، P_i و O_i به ترتیب مقادیر مشاهده شده و محاسبه شده را نشان می‌دهند و n تعداد داده‌های مشاهده شده است.

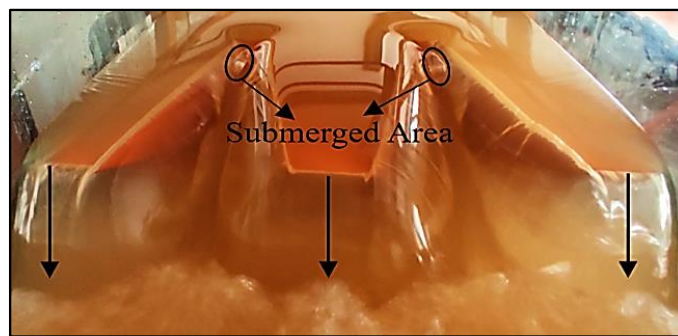
$$NRMSE = \frac{RMSE}{X_{max} - X_{min}} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i|^2} \quad (4)$$



شکل ۴. مصالح بستر در پایین دست سرریز کلیدپیانویی

Fig. 4. Bed materials downstream of the piano key weir



شکل ۵. جریان عبوری از روی سرریز کلیدپیانویی

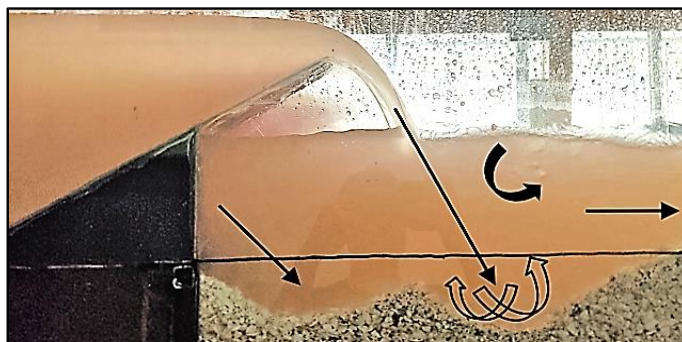
Fig. 5. Current passing through piano key weir

پایین دست می‌ریزد. در سرریز کلیدپیانویی نوع C به دلیل عدم وجود لبه آویزان در بالادست سرریز، شیب کلیدهای خروجی بیشتر بوده و طول ناحیه مستغرق و یا برآمدگی موضعی جریان در کلیدهای خروجی بسیار کوچک است. عدم وجود لبه آویزان در بالادست سرریز باعث به وجود آمدن تورفتگی جریان در ورودی کلیدهای خروجی شده است. همچنین با وجود شیب بیشتر در کلیدهای خروجی، آبستنگی در نزدیکی پنجه سرریز ایجاد شده و به دلیل لبه آویزان در پایین دست سرریز، جریان به صورت جت مایل به بستر ریخته و باعث ایجاد اغتشاش جریان در این محل می‌شود. این اغتشاش جریان باعث برگشت مصالح به طرف پنجه سرریز شده و شیب آبستنگی پایین دست سرریز، مایل تر می‌گردد و در محل ریزش جریان از لبه آویزان کلید ورودی

شکل ۴ نیز مصالح بستر را نشان می‌دهد. مقادیر d_{50}/P مورد استفاده در تحقیق Jüstrich et al. (2016) بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۴ است [۱]. در تحقیق حاضر نیز مقدار d_{50}/P برای مصالح شن برابر ۰/۰۳۷۵ است. همچنین عمق جریان در بالادست و پایین دست سرریز نیز در فاصله‌های 2P و 10P از مرکز سرریز و توسط عمق سنج سوزنی و با خطای ۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد [۱۷-۱۵].

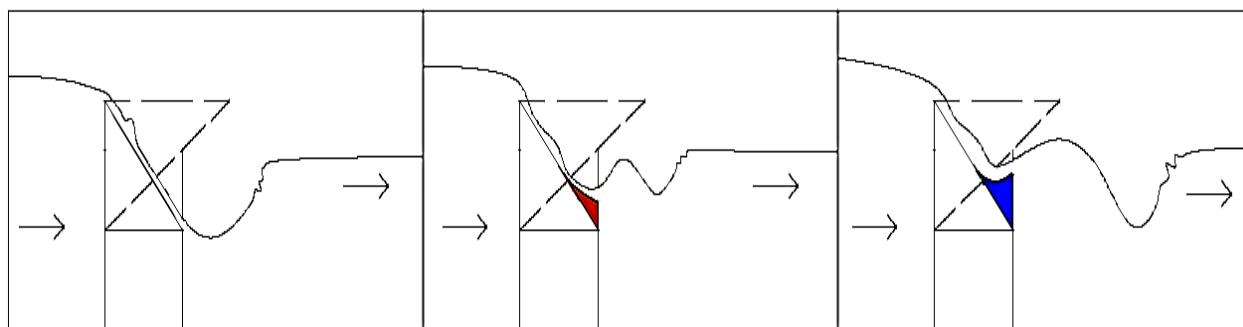
۴- نتایج و بحث

شکل ۵، جریان عبوری از روی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع C را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل پیدا است، جریان به صورت جت مایل از کلیدهای خروجی و به صورت جت ریزشی آزاد از کلیدهای ورودی به



شکل ۶. شیب آبشستگی مصالح در پایین دست سرریز

Fig. 6. The slope of material scouring downstream of the weir



شکل ۷. جریان عبوری در کلیدهای سرریز جامپ دار و سرریز بدون جامپ

Fig. 7. Flow current in the output key of weir with jump and weir without jump

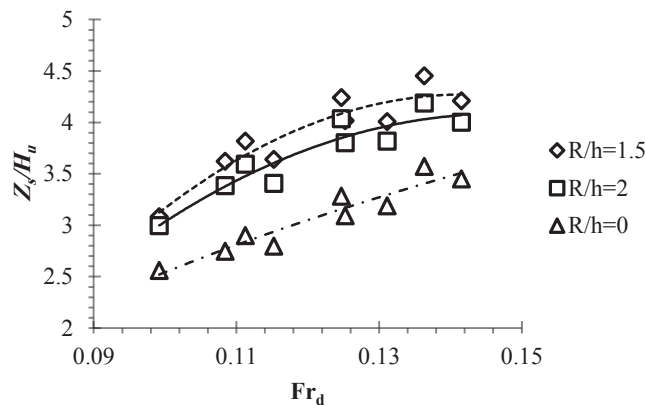
چرخش مصالح و جدا شدن آن‌ها از سطح بستر، همراه جریان به پایین دست منتقل می‌شوند. این برخورد و اغتشاش جریان باعث ارتفاع بیشتر آبشستگی می‌گردد. همچنین پرش هیدرولیکی با افزایش شعاع جامپ‌ها، در فاصله دورتری از پنجه سرریز شکل می‌گیرند. برخورد جریان در جامپ‌ها به بستر مایل تر شده و مانند جت‌های مایل عمل می‌کند. پس از برخورد جریان به مصالح، باعث ایجاد گودال و برگشت مصالح به سمت پنجه سرریز می‌شود. دبی جریان و عمق پایاب بر میزان آبشستگی تأثیرگذار هستند. با افزایش دبی جریان، سرعت جریان نیز افزایش یافته و آبشستگی بیشتر می‌شود. افزایش سرعت باعث قدرت بیشتر گردابه‌ها و اغتشاش بیشتر جریان می‌شود. افزایش دبی، حجم و طول حفره آبشستگی را نیز افزایش می‌دهد. با کاهش عمق پایاب، مقدار بیشینه عمق آبشستگی نیز افزایش می‌یابد. وجود عمق

به بستر، مصالح شن کمی برآمده‌تر می‌شوند (شکل ۶). وجود جامپ و ارتفاع آن باعث افزایش عمق جریان در کلیدهای خروجی، پس زدن آب به سمت بالادست سرریز و در نهایت باعث کاهش ضریب آبگذری می‌شود. شکل ۷، جریان عبوری در کلیدهای خروجی سرریز با و بدون جامپ را نشان می‌دهد. با این حال، وجود جامپ باعث پرتاب جریان به پایین دست می‌شود. پس از برخورد جریان به مصالح باعث آبشستگی موضعی در فاصله‌ای دورتر از پنجه سرریز می‌شود. همچنین پرش هیدرولیکی ضعیفی در پایین دست سرریز بدون جامپ مشاهده شد. در سرریزهای همراه با جامپ و به خصوص در سرریز همراه جامپ با شعاع بیشتر، پرش هیدرولیکی قوی تر شده و در پایین دست و در محل برخورد به عمق پایاب، باعث ایجاد گردابه‌هایی می‌شود. وجود این گردابه‌ها باعث شسته شدن مصالح و چرخش آن‌ها می‌شود. پس از

جدول ۲. محاسبه مقادیر K برای محاسبه بیشینه عمق آبستگي در سرریز و ضریب R^۲

Table 2. Calculation of K values to calculate the maximum scour depth in the weir and R² coefficient

Row	R/h	K ₁	K ₂	R ²
1	0	-16.616	27.290	0.91
2	1.5	-52.473	38.565	0.82
3	2	-50.644	36.632	0.84



شکل ۸. تأثیر عدد فرود ذرات و نسبت R/h بر بیشینه عمق آبستگي

Fig. 8. Effect of Fr_d and R/h ratio on maximum scour depth

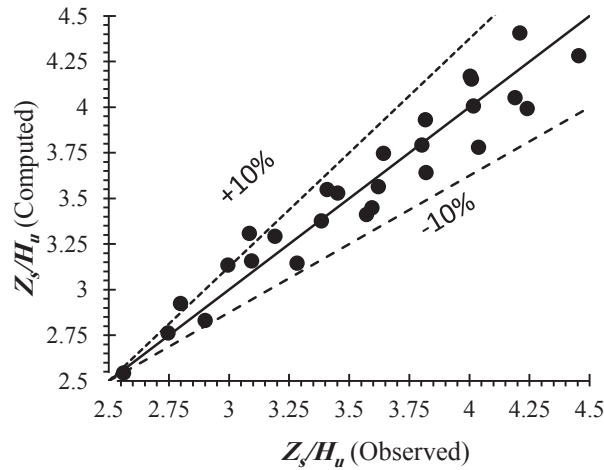
دبی در واحد عرض و یا کاهش عمق پایاب، مقدار عدد فرود ذرات بیشتر شده و بیشینه عمق آبستگي نیز افزایش می‌یابد. میانگین بیشینه عمق آبستگي در سرریز با شعاع جامپ بزرگتر و در سرریز با شعاع کوچکتر، نسبت به سرریز بدون جامپ به ترتیب ۲۷ و ۱۹ درصد بیشتر است. رابطه (۶)، برای محاسبه بیشینه عمق آبستگي ارائه شده است که ضرایب K₁ و K₂ به شعاع و ارتفاع لبه جامپ بستگی دارد که در جدول ۲ به آن‌ها پرداخته شده است.

$$\frac{Z_s}{H_u} = K_1 (Fr_d)^2 + K_2 Fr_d \quad (6)$$

شکل ۹، مقادیر مشاهده شده و محاسبه شده توسط رابطه (۶) را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل پیدا است، این مقادیر با خطای قابل قبولی (±10%) مورد پذیرش هستند. با ایجاد یک خط ۴۵ درجه بین داده‌های

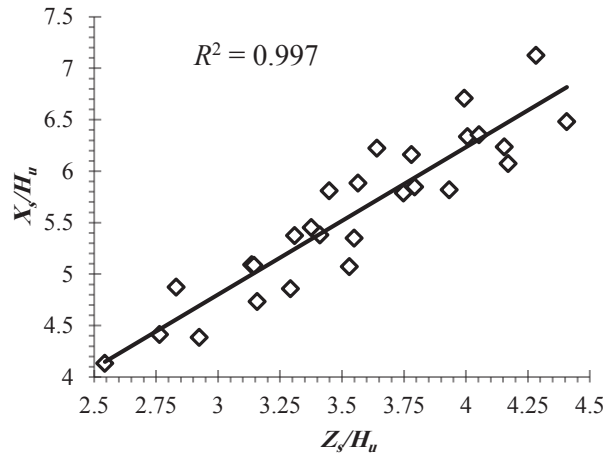
پایاب بیشتر باعث کاهش سرعت جریان در پایین دست شده و از بیشتر شدن آبستگي جلوگیری می‌کند. با افزایش دبی، عمق جریان در بالادست سرریز افزایش یافته و ضریب آبگذری کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش دبی در سرریزهای جامپ‌دار، عمق جریان در بالادست سرریز افزایش بیشتری یافته و ضریب آبگذری سرریز کاهش می‌یابد. میانگین کاهش ضریب آبگذری در سرریز با شعاع جامپ بزرگتر و در سرریز با شعاع جامپ کوچکتر، به ترتیب برابر ۱۰/۸۷ و ۳/۸۶ درصد نسبت به سرریز بدون جامپ است. به طور میانگین، مقدار ضریب آبگذری در سرریز بدون جامپ، سرریز دارای جامپ کوچکتر و سرریز دارای جامپ بزرگتر به ترتیب برابر ۲/۷۶، ۲/۶۵ و ۲/۴۶ است.

شکل ۸، تأثیر پارامتر P/h را بر حسب عدد فرود ذرات بر بیشینه عمق آبستگي نشان می‌دهد. همانطور که از شکل پیدا است، با افزایش عدد فرود ذرات، بیشینه عمق آبستگي نیز افزایش می‌یابد. همچنین با بیشتر شدن شعاع جامپ و ارتفاع آن، بیشینه عمق آبستگي افزایش یافته و با افزایش



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

Fig. 9. Computed and observed parameters of the maximum scour depth



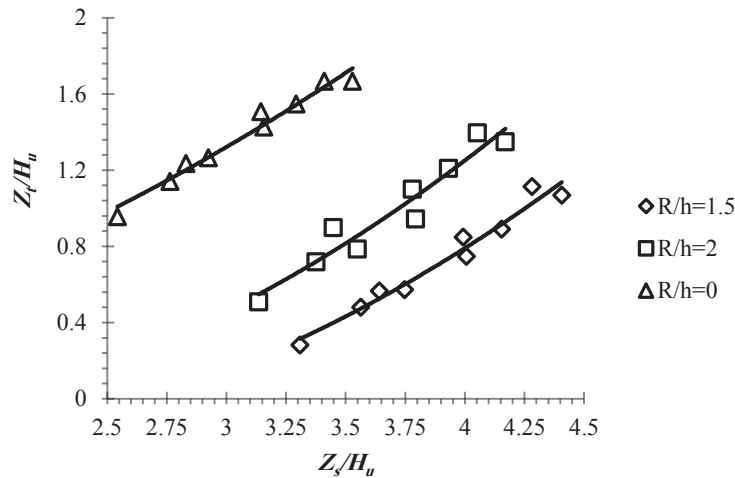
شکل ۱۰. محاسبه مقدار فاصله بیشینه عمق آبستگي نسبت به پنجه سرریز

Fig. 10. Calculation of the distance of the maximum scouring depth to the weir toe

متر، برابر ۰/۲۲۶، ۰/۲۷۳ و ۰/۳۲ متر است. همچنین به‌طور میانگین مقدار فاصله بیشینه عمق آبستگي از پنجه سرریز در شعاع جامپ ۰، ۰/۱۵ و ۰/۲۱ متری، برابر ۰/۱۷۸، ۰/۲۲۱ و ۰/۲۵۲ متر است و مقدار میانگین فاصله بیشینه عمق آبستگي از پنجه سرریز در شعاع جامپ ۰/۱۵ و ۰/۲۱ متر نسبت به سرریز بدون جامپ، حدود ۱۹/۵ و ۲۹/۴ درصد بیشتر است.

$$\frac{X_s}{H_u} = 1.5719 \frac{Z_s}{H_u} \quad (7)$$

مشاهده شده و محاسبه شده و با توجه به رابطه (۵) و با استفاده از رابطه (۴) و بزرگترین و کوچکترین داده می‌توان باند اطمینان را ترسیم کرد. پس از محاسبه‌ی بیشینه عمق آبستگي توسط رابطه‌ی (۶)، می‌توان رابطه‌ای برای پارامترهای دیگر آبستگي با نسبت متفاوت مقدار R/h به‌دست آورد. شکل ۱۰ و رابطه‌ی (۷)، فاصله‌ی بیشینه عمق آبستگي از پنجه‌ی سرریز را نسبت به بیشینه عمق آبستگي نشان می‌دهد. با افزایش شعاع جامپ، مقدار فاصله‌ی بیشینه عمق آبستگي از پنجه سرریز در فاصله‌ی دورتری شکل می‌گیرد. به‌طور مثال، در دبی ۰/۰۴ متر مکعب بر ثانیه و عمق پایاب ۰/۰۵ متر، مقدار فاصله‌ی بیشینه عمق آبستگي نسبت به پنجه سرریز در شعاع جامپ ۰، ۰/۱۵ و ۰/۲۱



شکل ۱۱. محاسبه آبستگي پنجه سرریز نسبت به بیشینه عمق آبستگي

Fig. 11. Calculation of scouring of the weir toe in relation to the maximum scouring depth

جدول ۳. محاسبه مقادير K برای محاسبه عمق آبستگي در پنجه سرریز و ضريب R^۲

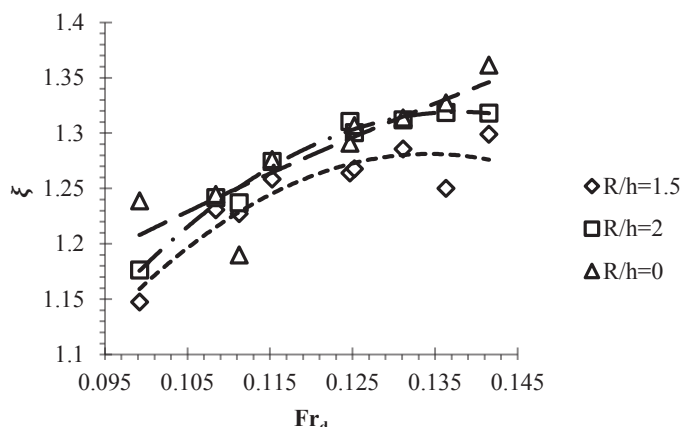
Table 3. Calculation of K values to calculate the scour depth in the weir toe and R² coefficient

Row	R/h	K ₃	K ₄	R ²
1	0	0.0964	0.1514	0.968
2	1.5	0.1484	-0.396	0.963
3	2	0.1594	-0.325	0.927

$$\frac{Z_t}{H_u} = K_3 \left(\frac{Z_s}{H_u} \right)^2 + K_4 \frac{Z_s}{H_u} \quad (۸)$$

شکل ۱۲، مقدار شاخص آبستگي (ξ) را نسبت به عدد فرود ذرات نشان می‌دهد. با افزایش مقدار عدد فرود ذرات، مقدار شاخص آبستگي نیز افزایش می‌یابد. شاخص آبستگي برابر است با دو برابر بیشینه عمق آبستگي به فاصله بیشینه عمق آبستگي نسبت به پنجه سرریز که میانگین آن در سرریز با جامپ بزرگتر برابر ۱/۲۵، در سرریز با جامپ کوچکتر

شکل ۱۱ و رابطه‌ی (۸)، مقدار آبستگي پنجه را نسبت به بیشینه عمق آبستگي را با ریشه میانگین مربعات خطاهای برابر ۹۱/۷ درصد، نشان می‌دهند. وجود جامپ باعث کاهش مقدار آبستگي پنجه می‌شود. همانطور که بیان شد، شعاع و ارتفاع جامپ بیشتر، باعث کاهش آبستگي در پنجه سرریز می‌گردد. کاهش آبستگي پنجه باعث بیشتر شدن پایداری سرریز می‌شود و خطر واژگونی آن را کاهش می‌دهد. همچنین مقادير ضريب همبستگي و ضرایب K₃ و K₄ که مرتبط با مقادير شعاع و ارتفاع لبه جامپ برای آبستگي پنجه سرریز هستند؛ در جدول ۳ به آن پرداخته شده است.



شکل ۱۲. مقدار شاخص آبهستگی نسبت به عدد فرود ذرات

Fig. 12. Scour index value in relation to Frd

۵- نتیجه گیری

وجود جامپ در کلیدهای خروجی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع C، مقدار بیشینه عمق آبهستگی را افزایش داده؛ اما باعث دور شدن مقدار بیشینه عمق آبهستگی از پنجه سرریز و باعث کاهش آبهستگی پنجه سرریز می‌شود. در سرریز جامپ‌دار با شعاع جامپ بزرگتر، به مراتب فاصله بیشینه عمق آبهستگی از پنجه سرریز دورتر و مقدار آبهستگی پنجه سرریز کمتر است. مقدار میانگین بیشینه عمق آبهستگی در سرریزهای با شعاع جامپ ۰/۲۱ و ۰/۱۵ متر نسبت به سرریز بدون جامپ، برابر ۲۷ و ۱۹ درصد بیشتر است. همچنین مقدار میانگین فاصله بیشینه عمق آبهستگی نسبت به پنجه سرریز در سرریزهای دارای جامپ با شعاع جامپ ۰/۲۱ و ۰/۱۵ متر نسبت به سرریز بدون جامپ، به ترتیب برابر ۲۹/۴ و ۱۹/۵ درصد کمتر است و میانگین مقدار آبهستگی پنجه سرریز در آنها، به ترتیب ذکر شده، حدود ۴۲ و ۲۵/۶ درصد کمتر است. جامپ باعث افزایش شاخص آبهستگی می‌شود. همچنین وجود جامپ با ارتفاع لبه و شعاع بیشتر، باعث کاهش ضریب آبگذری می‌گردد.

برابر ۱/۲۷ و در سرریز بدون جامپ برابر ۱/۲۸ است. همانطور که پیدا است، مقدار شاخص آبهستگی در سرریز با شعاع جامپ بیشتر و در سرریز با شعاع جامپ کمتر، حدود ۲/۷۷ و ۰/۵۳ درصد از سرریز بدون جامپ کمتر است. هرچه شاخص آبهستگی کمتر باشد، خطر واژگونی سرریز نیز کمتر است. همانطور که بیان شد، دور شدن فاصله بیشینه عمق آبهستگی و کم بودن مقدار آبهستگی پنجه سرریز بسیار حائز اهمیت است. با وجود جامپ، فاصله بیشینه عمق آبهستگی افزایش یافته و مقدار آبهستگی پنجه سرریز کاهش می‌یابد و به همین دلیل سرریزهای جامپ‌دار توصیه می‌گردند. مقدار شاخص آبهستگی در تحقیق قدسیان و همکاران (۲۰۲۱)، تقریباً برابر ۲ است. ایشان آزمایش‌های خود را روی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع A و مواد بستر ماسه مورد بررسی قرار دادند. در تحقیق حاضر و در سرریز بدون جامپ مقدار شاخص آبهستگی حدود ۳۶ درصد کمتر از تحقیق قدسیان و همکاران (۲۰۲۱) است که دلیل آن می‌تواند افزایش قطر مصالح بستر و دورتر شدن مقدار بیشینه عمق آبهستگی نسبت به پنجه سرریز باشد [۶]. همچنین مقدار شاخص آبهستگی در تحقیق یزدی و همکاران (۲۰۲۰) برابر ۱/۶۵ است. ایشان نیز آزمایش‌های خود را روی سرریز کلیدپیانویی انجام دادند؛ با این حال مقدار شاخص آبهستگی در تحقیق حاضر حدود ۲۲/۴ درصد کمتر از تحقیق ایشان است [۵].

۶- فهرست علائم

علائم یونانی		علائم انگلیسی
Kg/ (m.s)	لزجت دینامیکی μ	
Kg/m ³	چگالی رسوب ρ_s	B طول دیواره‌ی جانبی سرریز
Kg/m ³	چگالی آب ρ_w	B_o طول لبه آویزان خروجی
Kg/s ²	ضریب کشش سطحی σ	d_{50} قطر متوسط ذرات بستر
		Fr_d عدد فرود ذرات
		g نیروی گرانشی
		h ارتفاع لبه جامپ
		h_u عمق جریان در بالادست سرریز
		h_d عمق پایاب
		H_u عمق جریان به علاوه ارتفاع نظیر انرژی جنبشی در بالادست سرریز
		H_d عمق جریان به علاوه ارتفاع نظیر انرژی جنبشی در پایین دست سرریز
		K مقادیر ثابت محاسبه شده در رابطه‌ها
		L طول سرریز
		P ارتفاع سرریز
		q دبی در واحد عرض
		Q دبی جریان
		R شعاع جامپ
		T_s ضخامت سرریز
		W عرض سرریز
		W_i عرض کلید ورودی
		W_o عرض کلید خروجی
		X_s فاصله بیشینه عمق آبشستگی نسبت به پنجه سرریز
		Z_s ارتفاع بیشینه عمق آبشستگی
		Z_t آبشستگی پنجه سرریز

منابع

- [1] Jüstrich, S., Pfister, M. & Schleiss, A.J., 2016. Mobile riverbed scouring downstream of a piano key weir. Journal of Hydraulic Engineering, 142(11), p.04016043. <https://doi.org/10.1061/ASCE HY.1943-7900.0001189>.
- [2]. Gohari, S. & Ahmadi, F., 2019. Experimental study of downstream scour of piano keys weirs. Journal of Water and Soil Conservation, 26(1), pp.91-109. <https://doi.org/10.22069/JWSC.2019.14680.2961>.
- [3]. Ghafouri, A., Ghodsian, M. & Abdi, Ch., 2020. Experimental study on the effect of discharge and tailwater depth on bed topography downstream of a piano key weir. Journal of Hydraulics, 15(3), pp.107-122. <https://doi.org/10.30482/JHYD.2020.236770.1465>.
- [4]. Kumar, B. & Ahmad, Z., 2022. Scour downstream of a piano key weir with and without a solid apron. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 148(1), p.04021066. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001647](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001647).
- [5]. Mosalman Yazdi, A., Hosseini, S.A., Nazari, S. & Amanian, N., 2020. Comparison of downstream scour of the rectangular and trapezoidal piano key weirs. Journal of Hydraulics, 15(2), pp.95-112. <https://doi.org/10.30482/JHYD.2020.227522.1453>.
- [6]. Ghodsian, M., Abdi, Ch. & Ghafouri, A., 2021. Scouring of triangular and trapezoidal pianos key weir. Journal of Hydraulics, 16(2), pp.43-58. <https://doi.org/10.30482/JHYD.2021.261439.1497>.
- [7]. Jamal, A.A.R., Tahaa, K.Y. & Hayawi, G.A.A.M., 2022. Experimental Study of Scour Downstream

- <https://doi.org/10.1115/OMAE2010-20719>.
- [13]. Novák, P. & Čabelka, J., 1981. Models in hydraulic engineering: Physical principles and design applications. Monographs & surveys in water resources engineering.
- [14]. Chiew, Y.M., 1992. Scour protection at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(9), pp.1260-1269. <https://doi.org/10.1061/ASCE0733-94291992118:91260>.
- [15]. Rdhaiwi, A.Q., Khoshfetrat, A. and Fathi, A., 2023. Experimental Investigation of Scour Downstream of A C-Type Trapezoidal Piano Key Weir with Stilling Basin. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 27(6), pp.688-697. <https://doi.org/10.31272/jeasd.27.6.2>.
- [16]. Rdhaiwi, A.Q., Khoshfetrat, A. and Fathi, A., 2024. Experimental comparison of flow energy loss in type-B and-C trapezoidal piano key weirs. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 28(1), pp.55-64. <https://doi.org/10.31272/jeasd.28.1.4>
- [17]. Fathi, A., Abdi Chooplou, C. and Ghodsian, M.G., 2023. An Experimental Study of Flow Energy Loss in Trapezoidal Stepped Piano Key Weirs (PKWs). *Modares Civil Engineering journal*, 23(4), pp.163-174. <https://doi.org/10.22034/23.4.163>.
- Piano Key Weir Type C with Changing Height of Weir Width of Keys and Apron. <https://doi.org/10.33899/rengj.2021.130402.1101>.
- [8]. Lantz, W., Crookston, B.M. & Palermo, M., 2021. Apron and cutoff wall scour protection for piano key weirs. *Water*, 13(17), p.2332. <https://doi.org/10.3390/w13172332>.
- [9]. Abdi Chooplou, C., Bodaghi, E. Ghodsian, M., & Vaghefi, M. 2022. Temporal evolution of scouring downstream of a trapezoidal PKW. *International Journal of River Basin Management*, 1-14. <https://doi.org/10.1080/15715124.2022.2143513>.
- [10]. Abdi Chooplou, C., Kazerooni, S., Ghodsian, M., & Vaghefi, M. 2022. Experimental study of scouring downstream of type-A piano key weirs. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(23), 1702. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-11001-9>.
- [11]. Bodaghi, E., Ghodsian, M. and Abdi, C., 2023. The experimental study of downstream scouring of trapezoidal Piano key weir type A under free and submerged flow. *Journal of Hydraulics*, 18(1), pp.18-1. <https://doi.org/10.30482/JHYD.2022.330389.1590>.
- [12]. Sumer, B.M. & Fredsoe, J., 1991, August. Onset of scour below a pipeline exposed to waves. In *The First International Offshore and Polar Engineering Conference*.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

K. Challoob Mshali, A. Khoshfetrat, A. H. Fathi, *Experimental study of the effect of jump on the Downstream Scouring of type-C trapezoidal piano key weir*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 56(11) (2025) 1353-1368.

DOI: [10.22060/ceej.2024.22565.7996](https://doi.org/10.22060/ceej.2024.22565.7996)



