

Research Paper

The Effect of Side Wall Angle on Downstream Scour of Trapezoidal Key Piano Weir

Alireza Mosalman Yazdi¹, Seyed Abbas Hoseini^{2*}, Sohrab Nazari³, Nosratollah Amanian⁴

Department of Civil Engineering, Mehriz Branch, Islamic Azad University, Yazd, Iran.

Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
(Corresponding author), email: abbas_hoseyni@srbiau.ac.ir.

Department of Civil Engineering, Eghlid Branch, Islamic Azad University, Eghlid, Iran.

Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, Yazd University, Yazd, Iran.

Received: 2020/11/08

Revised: 2020/12/09

Accepted: 2021/12/14

Use your device to scan and read the article online



DOI:

10.30495/wej.2021.26505.2277

Keywords:

scouring, trapezoidal model, discharge, piano key weir, tail water depth

Abstract

Introduction: The main problem downstream of hydraulic structures, such as weirs, is scouring and movement of bed materials. The piano key weirs (PKW) is one the types of weirs. Due to the fact that the geometric shape of the weir affects the condition of the downstream scour, therefore in this study, the downstream scouring of the piano key weirs with a trapezoidal geometric shape is studied. In this paper, the scour profile and the rate of change were compared with the change in the lateral wall angle of the weir.

Methods: For this purpose, four experimental models of this type of weirs were made and these models were tested in a laboratory flume at different flow rates. Also, to investigate the effect of tail water depth on scour profiles, one of the models was investigated at three different tail water depths.

Finding: The results of scouring characteristics showed that in trapezoidal piano key weirs, the maximum depth of the hole is created under the output key and by increasing the discharge and decreasing the tail water depth, the geometric dimensions of the scour hole increase in trapezoidal models. Also, in trapezoidal piano key weirs, by increasing the side wall angle of the weir, the geometric dimensions of the scour hole are reduced. In all flows, by increasing every 3 degrees of the side wall angle of the piano key weir, maximum scour hole depth on average, 5%, Spatial position distance, maximum scour hole depth and scour hole span length, respectively, and it decreases by 8% and 3% on average. Also, when $Fr_d > 65\%$ is, this difference becomes insignificant and there is not a significant difference in the shape of the scour hole for PKW models.

Citation: Mosalman Yazdi, A, Hosseini, SA, Nazari, S, Amanian, N. The effect of side wall angle on downstream scour of trapezoidal key piano weir. Water Resources Engineering Journal. 2022; 15(53): 97-114.

*Corresponding author: Seyed Abbas Hosseini

Address: Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

Tell: +989122805467

Email: abbas_hoseyni@srbiau.ac.ir

Extended Abstract

Introduction

Weirs are hydraulic structure commonly used for controlling flow characteristics and water level [1]. Also, in dams, weirs are responsible for the controlled release of flood flows from the dam reservoir to the downstream channels. One of the types of weir is piano key weir (PKW). Piano key weirs are also very cost-effective and cheap to maintain, increase reservoir storage capacity, and offer better flood control [2]. The main problem at the downstream of hydraulic structures, such as weir, is the scour and movement of bed materials. Scouring in the downstream of weirs is an important issue for weir stability and has been extensively researched. In this study, the geometry of scour holes in the downstream of piano key weirs was investigated by the use of experimental models. According to previous researches, trapezoidal piano key weirs (TPKW) are more efficient than rectangular piano key weir (RPKW) [23]. While there are limited studies on scour downstream of RPKWs, the scouring downstream of the trapezoidal piano key have not yet been researched according to the authors' knowledge [18]. So, it is important to study their scour, and it is necessary to compare the performance of these types of PKWs in terms of scouring issues. Due to the fact that the geometric shape of the weir affects the downstream scour condition, in this study the downstream scour of the trapezoidal piano key weir with a change in the angles of the side wall of the weir is of interest, the characteristics of scouring and its rate of change with the change of the angle of the side wall of the weir was compared. Also, the effect of tail water depth on scour profile was investigated in different depths. Measurements were made to predict the scour specifications of the rectangular and trapezoidal piano key weirs, including the maximum depth of the scour hole, the distance between maximum scour depth and weir foundation, and the length of the scour hole (Figure 2).

Materials and Methods

In this study, four experimental models of PKWs with trapezoidal geometry of 0, 3, 6, and 9 degree the angles of the side wall were built and tested in a flume with a length of 6.0 m, a width of 1.0 m and a height of 0.6 m. 2.0 m length with an average thickness of 25 cm was formed from sandy material with median grain size $d_{50}=7.8$ m. Three hydraulic conditions in upstream for all models and three different tail water depth for the considered M_1 model in the downstream and totally 17 experimental runs were conducted. A summary of the initial conditions, numbers, and codes of the experiments is given in Table 2. The range of changes in discharge in this research is between 6 to 22 liters per second. The reason for choosing this range for discharge is to examine the conditions of the scour profile in a wide range of flow rate changes.

Findings

As shown in Figures 5 and 6, observations showed that in trapezoidal piano key weirs, the maximum depth of the hole is created under the output key and by increasing the discharge and decreasing the tail water depth, the geometric dimensions of the scour hole increase in trapezoidal models. Also, in trapezoidal piano key weirs, by increasing the side wall angle of the weir, the geometric dimensions of the scour hole are reduced. In all flows, by increasing every 3 degrees of the side wall angle of the piano key weir, Maximum scour hole depth on average, 5%, Spatial position distance, maximum scour hole depth and scour hole span length, respectively, and it decreases by 8% and 3% on average. Also, when $Frd > 65\%$ is, this difference becomes insignificant and there is not a significant difference in the shape of the scour hole for PKW models.

Discussion

As mentioned, in trapezoidal piano key weirs, the maximum depth of the hole is created under the output key. The reason for this is the external spill jets from the output keys, which cause the scour hole to fall into the downstream through vertex. As shown in Figures (6) and (7), For rectangular and trapezoidal piano key

weirs, at a constant flow rate, the depth and length of the scour hole have decreased with the increase of tail water depth. It is due to a decrease in the height of the drop jet and increase in jet speed during impact to downstream flow. Also, according to the figure (8) and the observations made, as the tail water depth decreases, the lateral changes of the scouring section increase. In such a way that at a certain flow rate, with the reduction of the tail water depth, the transverse opening of the scour hole is reduced, and the width of the ridge between it is increased. The reason for this is that, with the decrease of the tail water depth, the height of the falling jet increases, therefore the speed of the jet increases when it hits the surface of the downstream flow and the thickness of the jet decreases, so the length of the scour holes under the outlet switches and it increases in the direction of the flow, but the length of the hole decreases in the transverse direction (perpendicular to the flow) and accordingly, the width of the stack between them increases. Effect of discharge on the scour hole profile downstream of the rectangular and trapezoidal PKW models are shown in Figure (10). It can be seen that in all models, as discharge and upstream head increase, so do the hole depth and hole length and the distance of maximum scour depth from the weir toe. Previous studies have reported similar findings for linear and nonlinear weirs [20]. Also, comparison the scour hole characteristics of downstream piano key weirs in Figure (11) shows that the maximum scour hole depth downstream of the rectangular model is higher than the trapezoidal model and in trapezoidal piano key weirs, by increasing the side wall angle of the weir, the geometric dimensions of the scour hole are reduced. The greater cavity depth downstream of trapezoidal models with decreasing sidewall angle can be attributed to the fact that for any given flow rate, the upstream-to-downstream total head difference decreases. Also, according to Figure (11) with the increase of the flow rate, the difference in scouring parameters of the models decreases because according to the figure (4), the difference between the upstream and downstream head decreases with the increase in flow rate

Conclusion

The measurement results of the cascade characteristics showed that with increasing the flow rate and decreasing the tail water depth, the geometric characteristics of the score hole increase in all models. Also, in trapezoidal piano key weirs, by increasing the side wall angle of the weir, the geometric dimensions of the scour hole are reduced. In all flows, by increasing every 3 degrees of the side wall angle of the piano key weir, Maximum scour hole depth on average, 5%, Spatial position distance, maximum scour hole depth and scour hole span length, respectively, and it decreases by 8% and 3% on average. Also, when $Fr_d > 65\%$ is, this difference becomes insignificant and there is not a significant difference in the shape of the scour hole for PKW models.

Ethical Considerations compliance with ethical guidelines

The cooperation of the participants in the present study was voluntary and accompanied by their consent.

Funding

No funding.

Authors' contributions

All authors have contributed in different parts of the study.

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

مقاله پژوهشی

تأثیر زاویه پلان دیواره جانبی سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای
در رفتار آبشستگی پایین دستعلیرضا مسلمان یزدی^۱، سید عباس حسینی^{۲*}، سهراب نظری^۳، نصرت‌الله امانیان^۴

۱- استادیار دانشکده مهندسی عمران، واحد مهریز، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳- استادیار دانشکده مهندسی عمران، واحد اقلید، دانشگاه آزاد اسلامی، اقلید، ایران

۴- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

چکیده

مقدمه: مشکل اساسی که در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی از جمله سرریزها وجود دارد، آبشستگی و حرکت مصالح بستر می‌باشد، یکی از انواع سرریزها، سرریزهای کلید پیانویی می‌باشد. با توجه به آنکه شکل هندسی سرریز بر وضعیت آبشستگی پایین دست تأثیرگذار است به همین منظور در این تحقیق، آبشستگی پایین دست سرریزهای کلید پیانو با شکل هندسی دوزنقه‌ای مورد توجه بوده، مشخصات آبشستگی و نرخ تغییرات آن با تغییر زاویه دیواره جانبی سرریز مورد مقایسه قرار گرفت.

روش: بدین منظور چهار مدل آزمایشگاهی از این نوع سرریزها ساخته و در یک فلوم آزمایشگاهی در شرایط دبی‌های مختلف مورد آزمایش قرار گرفت. همچنین جهت بررسی تأثیر عمق پایاب بر پروفیل آبشستگی، یکی از مدل‌ها در سه عمق پایاب متفاوت بررسی شد.

یافته‌ها: نتایج اندازه‌گیری مشخصه‌های آبشستگی نشان داد در سرریزهای کلید پیانو دوزنقه‌ای، حداکثر عمق چاله زیر کلید خروجی ایجاد می‌شود و با افزایش دبی و کاهش عمق پایاب، ابعاد هندسی حفره آبشستگی در مدل‌های دوزنقه‌ای افزایش می‌یابد. همچنین در سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای، با افزایش زاویه دیواره جانبی سرریز، ابعاد هندسی چاله آبشستگی کاهش می‌یابد. به نحوی که در تمام دبی‌ها با افزایش هر ۳ درجه زاویه دیواره جانبی سرریز کلید پیانویی، حداکثر عمق چاله آبشستگی به طور میانگین، ۵ درصد، فاصله موقعیت مکانی حداکثر عمق چاله آبشستگی و طول دهانه چاله آبشستگی به ترتیب و به طور میانگین ۸ و ۳ درصد کاهش می‌یابد. همچنین وقتی $F_{rd} > 65\%$ گردد این اختلاف ناچیز می‌شود و تفاوت معناداری در شکل حفره آبشستگی بین مدل‌های سرریز کلید پیانویی وجود ندارد.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۱۸

تاریخ داوری: ۱۳۹۹/۰۹/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۳

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



DOI:

10.30495/wej.2021.26505.2277

واژه‌های کلیدی:

آبشستگی، مدل دوزنقه‌ای، دبی، سرریز کلید پیانویی، عمق پایاب

* نویسنده مسئول: سید عباس حسینی

نشانی: دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

تلفن: 09122805467

پست الکترونیکی: abbas_hoseyni@srbiau.ac.ir

مقدمه

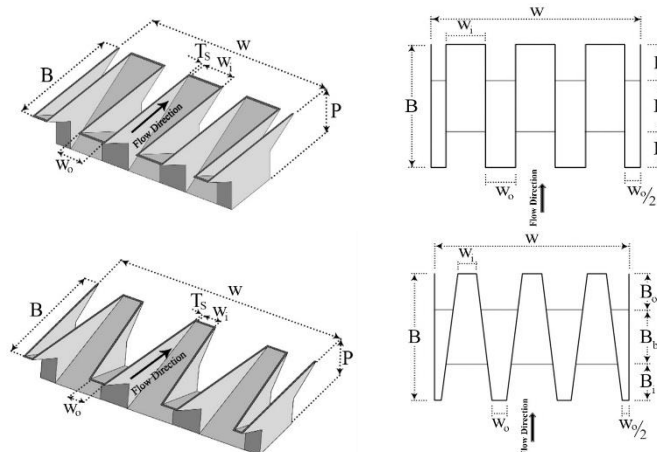
تولنایی بالای سرریزهای کلید پیاپویی در تخلیه جریان یک مزیت عمده این نوع خاص از سرریزهای زیگزاگی می‌باشد. این سرریزها به مخازن سدها این امکان را می‌دهند تا با تراز بالاتری عمل کنند که خود این موضوع باعث افزایش حجم ذخیره در مخزن می‌شود [5,9]. دو مزیت عمده این سرریزها نسبت به سرریزهای زیگزاگی معمولی شامل کاهش فضای سازه‌ای مورد نیاز برای احداث و ظرفیت بالای تخلیه سیلاب می‌باشد. این ویژگی‌ها اجازه می‌دهد که این سرریزها به آسانی بر روی تاج بسیاری از سدهای وزنی موجود قابل احداث باشد [10].

سرریزهای کلید پیاپو با توجه به زاویه پلان دیواره‌های جانبی، به دو دسته مستطیلی و دوزنقه‌ای تقسیم شده که بر اساس تحقیقات صورت گرفته، سرریزهای کلید پیاپو دوزنقه‌ای دارای کارایی بیشتری نسبت به سرریزهای کلید پیاپویی مستطیلی می‌باشند [11]. در شکل (۱)، مشخصات هندسی مدل‌های سرریزهای کلید پیاپویی تحقیق نشان داده شده است که در آن P : ارتفاع قائم، B : طول در جهت جریان، T_s : ضخامت دیوار جانبی، W : عرض جانبی است. علاوه بر این، زیرنویس i به کلید ورودی اطلاق می‌شود، یعنی کلیدی که زمانی که سطح آب در مخزن بالادست برابر تاج PKW می‌شود پر از آب است و زیرنویس 0 به کلید خروجی اطلاق می‌شود. این زیرنویس‌ها برای طول در جهت جریان B ، ارتفاع سرریز P و عرض سرریز W استفاده می‌شوند.

سرریزها به منظور رهاسازی دبی اضافی یا کنترل جریان سطح مخازن همچنین در سیستم‌های انتقال آب و کانال‌های آبیاری و زهکشی استفاده می‌شوند. به کمک سرریزها می‌توان جریان مازاد بر ظرفیت انتقال سدهای انحرافی را عبور و فرسایش در رودخانه‌ها را کاهش داد. همچنین سرریزها در افزایش و تثبیت تراز سطح آب در کانال‌ها مؤثر بوده به عنوان ابزار سنجش دبی در سیستم‌های انتقال آب استفاده می‌شوند. لذا بررسی و مطالعه آن‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است [1-3].

یکی از انواع سرریزها، سرریزهای کنگره‌ای هستند. سرریزهای کنگره‌ای، سرریزهای غیرخطی بوده که باعث افزایش طول کل تاج و ظرفیت جریان برای یک عرض مشخص می‌گردند. با پیشرفت تکنولوژی و امکان پیش‌بینی و تخمین سیلاب همچنین ضوابط بیشتر جهت ایمنی سدها، تعداد زیادی از سدهای موجود، جهت بهبود و افزایش ظرفیت هیدرولیکی به نوسازی سرریز نیاز دارند [4-6]. بدین منظور، در سال‌های اخیر، نوع خاص و جدیدی از سرریزهای کنگره‌ای به نام سرریزهای کلید پیاپویی مورد توجه قرار گرفته و توسعه یافته‌اند [7,8].

سرریزهای کلیدپیاپویی نوع جدیدی از سرریزهای طویل یا لبه طولانی هستند که ظرفیت تخلیه دبی بسیار بالایی دارند و می‌توانند به عنوان سازه‌ای اقتصادی با کارایی، راندمان بالا و هزینه نگهداری پایین مورد استفاده قرار گیرند.



شکل ۱- پارامترهای هندسی سرریزهای کلید پیاپویی

غیرخطی کنگره‌ای (RL)، کلید پیاپویی مستطیلی (PK) و کلید پیاپویی دوزنقه‌ای (TPK) را بررسی و مطالعه نمودند. نتایج تحقیقات نشان داد با تبدیل سرریز کنگره‌ای به کلید پیاپویی مستطیلی و سپس کلید پیاپویی دوزنقه‌ای، ناحیه استغراق موضعی کاهش یافته کارایی سرریز در هدایت جریان افزایش می‌یابد [17].

حسینی و مهرآیین (۱۳۹۷) در مطالعه‌ای، اثر زاویه دیواره سرریز کلید پیاپویی بر آبگذری را به کمک مدل‌سازی عددی با شبیه‌سازی جریان در سه عمق جریان مختلف بر روی مدل مستطیلی و مدل‌های دوزنقه‌ای با زوایای ۳، ۷ و ۱۰ درجه با ارتفاع یکسان مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیقات ایشان نشان داد ضریب آبگذری سرریز

طی سال‌های اخیر، محققین زیادی، مطالعات آزمایشگاهی و عددی متنوعی برای شناخت خصوصیات سرریزهای کلید پیاپویی و تأثیر هندسه بر رفتار جریان انجام داده‌اند. نتایج تحقیقات انجام شده روی این سرریزها نشان داد در سرریزهای کلید پیاپویی، برای هدهای پایین، زیاد کردن تعداد دهانه‌های سرریز باعث افزایش کارایی سرریز می‌شود [10, 12-14]. همچنین در سرریزهای کلید پیاپو، در صورتی که دهانه ورودی بزرگتر از دهانه خروجی در نظر گرفته شود، دبی عبوری از سرریز افزایش می‌یابد [12, 15, 16].

صفرزاده و نوروزی (۱۳۹۳)، در بخشی از یک تحقیق، عملکرد هیدرولیکی و همچنین ساختار جریان بر روی سه نوع سرریز

مطالعه‌ای انجام نشده است. لذا با توجه به کارایی بیشتر سرریزهای کلید پیانو دوزنقه‌ای در هدایت جریان نسبت به هندسه مستطیلی، مطالعه آبشستگی آنها حائز اهمیت بوده و مقایسه عملکرد پروفیل آبشستگی این نوع از سرریزها به لحاظ مسائل آبشستگی پایین دست نیز ضروری می‌باشد. لذا در تحقیق حاضر، با در نظر گرفتن چهار مدل از سرریزهای کلید پیانوی دوزنقه‌ای با زوایای دیواره صفر (مستطیلی)، ۳، ۶ و ۹ درجه، تأثیر پارامترهای هیدرولیکی جریان بر مشخصات هندسی ابعاد چاله آبشستگی مورد بررسی قرار گرفته و عوامل تأثیرگذار بر مکانیسم آبشستگی در پایین دست این نوع سرریزها مطالعه می‌گردد. بر این اساس، تأثیر دبی و عمق پایاب بر مشخصات چاله آبشستگی در پایین دست سرریزهای کلید پیانو دوزنقه‌ای و مقایسه این تغییرات در مدل‌ها مورد توجه قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها آنالیز ابعادی

با توجه به مطالعات و تحقیقات پیشین در خصوص آبشستگی سرریزهای غیرخطی، عوامل مؤثر بر چاله آبشستگی در پایین دست سرریزهای کلید پیانوی شامل پارامترهای هندسی و هیدرولیکی را می‌توان به صورت زیر نشان داد [20]:

$$f_1(\theta_s, h_d, \Delta H, P, d_{50}, q, g, \rho, \rho_w, \mu, \alpha) = 0 \quad (1)$$

در معادله فوق و مطابق شکل (۲)، مشخصه‌های هندسی چاله آبشستگی (θ_s) شامل حداکثر عمق حفره آبشستگی، X_{SM} فاصله حداکثر عمق حفره تا پای سرریز در راستای جریان و X_S طول دهانه حفره آبشستگی شامل فاصله محل تقاطع حفره آبشستگی با سطح اولیه رسوب تا پای سرریز در راستای جریان می‌باشند. متغیرهای نشان داده شده در معادله (۱) و مطابق شکل (۲) شامل ΔH ، اختلاف بار آبی بالادست و پایین دست سرریز، q ، دبی جریان در واحد عرض سرریز و α ، d_{50} ، g ، ρ ، ρ_s ، μ به ترتیب جرم مخصوص ماسه، جرم مخصوص آب، شتاب ثقل، اندازه قطر متوسط مواد رسوبی و لزجت دینامیکی و زاویه دیواره جانبی می‌باشد. با استفاده از تئوری باکینگهام، پارامترهای بی‌بعد مؤثر بر پدیده آبشستگی در پایین دست سرریز تعیین شده و رابطه (۲) قابل حصول است.

$$f_2\left(\frac{\theta_s}{\Delta H}, \frac{h_d}{\Delta H}, \frac{P}{\Delta H}, \frac{d_{50}}{\Delta H}, \frac{q}{\sqrt{g \cdot \Delta H^3}}, \frac{\rho_s - \rho}{\rho}, \frac{\mu}{\rho \cdot q}, \alpha\right) = 0 \quad (2)$$

عدد رینولدز یا همان $\frac{\mu}{\rho \cdot q}$ در همه آزمایشات بیشتر از 10^4 است که این موضوع بیانگر آشفته بودن جریان می‌باشد لذا اثر لزجت در مقایسه با اثر جاذبه کوچک بوده و می‌توان از اثر μ صرفنظر نمود. پارامتر بدون بعد $\frac{q}{\sqrt{g \cdot \Delta H^3}}$ ، معادل عدد فرود جریان روی سرریز می‌باشد. که با ترکیب پارامترهای $\frac{q}{\sqrt{g \cdot \Delta H^3}}$ و $\frac{\rho_s - \rho}{\rho}$ پارامتر بدون بعد $\frac{q}{\Delta H \sqrt{g(s-1)d_{50}}}$ بدست می‌آید که معادل عدد فرود ذره یا F_{rd} بوده و S چگالی نسبی ذرات یا همان $\frac{\rho_s}{\rho}$ می‌باشد. با توجه به ثابت بودن ارتفاع سرریز، در معادله (۲) از $\frac{P}{\Delta H}$ چشم‌پوشی می‌گردد. بنابراین

کلیدپیانوی دوزنقه‌ای بیشتر از مدل مستطیلی این نوع از سرریزها می‌باشد. همچنین با افزایش زاویه دیواره جانبی، کارایی سرریز کلید پیانوی دوزنقه‌ای بیشتر می‌شود. همچنین نتایج تحقیق ایشان نشان داد مقادیر ضریب آبگذری برای تمامی مدل‌ها با ارتفاع آب روی سرریز رابطه معکوس دارد. به نحوی که با افزایش نسبت $\frac{H_p}{P}$ میزان دبی عبوری به دلیل استغراق موضعی جریان کاهش می‌یابد [11].
عموم مطالعات انجام شده جهت سرریزها به ویژه سرریزهای کلید پیانو در خصوص شرایط هیدرولیکی جریان و هندسی سرریز می‌باشد. در حالی که یکی از پارامترهای مهم جهت ایمنی و پایداری سدها، آبشستگی پایین دست آن‌ها می‌باشد که تحقیقات کمتری انجام شده است. در زمینه آبشستگی پایین دست سرریزهای کلید پیانوی، تحقیقات بسیار محدود بوده و تعداد زیادی سؤالات بی‌پاسخ در خصوص آثار آبشستگی عمومی و حفاظت بستر برای این نوع از سرریزها وجود دارد. در یک تحقیق جامع که توسط Oertel (2018) انجام شد، ۱۳۵ تحقیق در مورد PKWs مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. ایشان تحقیقات را در ۱۵ رده از جمله هوادهی، رویکرد تحلیلی، تجزیه و تحلیل هزینه، دستورالعمل‌های طراحی، ضریب تخلیه، اتلاف انرژی، خصوصیات عمومی جریان و آبشستگی و حمل رسوبات طبقه بندی نمود. نتایج تحقیق نشان داد آبشستگی و حمل رسوبات برای سازه‌های هیدرولیکی دارای اهمیت و مورد توجه عمده می‌باشد اما تاکنون این موضوع در تحقیقات سرریزهای PKW مورد توجه قرار نگرفته است لذا بر اساس این مرور پیشینه، می‌توان نتیجه گرفت چالش‌های آینده برای پروژه‌های تحقیقاتی سرریزهای کلید پیانو، آبشستگی و حمل رسوبات بستر می‌باشد [18]. در مطالعه‌ای که بر روی آبشستگی پایین دست سرریزهای کنگره‌ای انجام شده است می‌توان به تحقیق (Rajaei et al. (2018) در مورد آبشستگی پایین دست سرریزهای کنگره‌ای مستطیلی و دوزنقه‌ای اشاره نمود. نتایج تحقیقات ایشان نشان داد سرریزهای کنگره‌ای دوزنقه‌ای در مقایسه با سرریزهای خطی حدود ۱۹ درصد، آبشستگی را به طور مؤثر کاهش می‌دهند در حالی که سرریزهای زیگزگ مستطیلی در مقایسه با سرریزهای خطی حدود ۱۰ درصد، آبشستگی را کاهش می‌دهند [19].

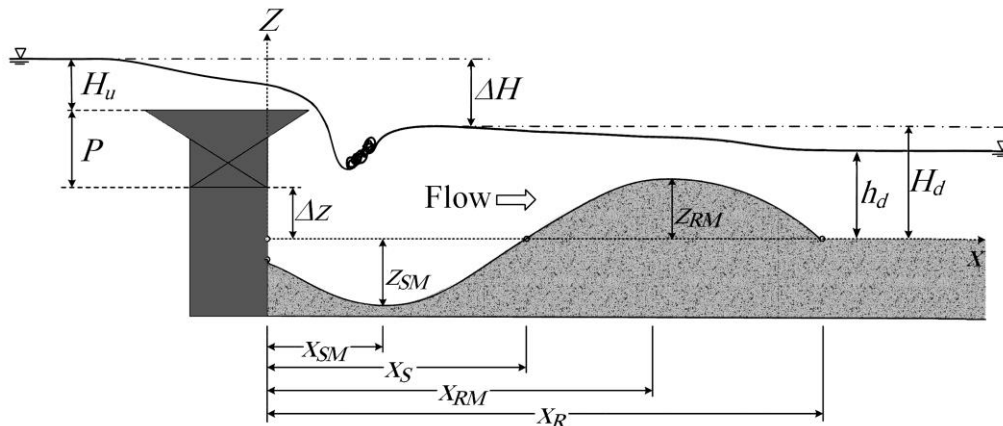
Justrich et al. 2016 در مطالعه‌ای آبشستگی پایین دست سرریز کلید پیانوی مستطیلی را بررسی نمودند. نتایج تحقیقات ایشان نشان داد ابعاد هندسی چاله آبشستگی به حداکثر عمق چاله آبشستگی وابسته است لذا روابطی به منظور پیش‌بینی ابعاد چاله آبشستگی بر اساس حداکثر عمق چاله پیشنهاد نمود [20].

احمدی دهرشید و گوهری (۱۳۹۵)، در تحقیقی آبشستگی پایین دست سرریز کلید پیانو مستطیلی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیقات نشان داد کاهش عمق پایاب موجب افزایش حداکثر عمق آبشستگی و دور شدن محل وقوع آن از انتهای کفبند همچنین گسترش طولی ابعاد حفره آبشستگی در جهت جریان می‌شود [21].

با توجه به تحقیقات پیشین، مطالعات انجام شده در مورد آبشستگی پایین دست سرریزهای کلید پیانوی مستطیلی محدود و در مورد آبشستگی پایین دست سرریزهای کلید پیانوی دوزنقه‌ای تاکنون

$$\frac{\phi_s}{\Delta H} = f\left(F_{ra}, \frac{h_d}{\Delta H}, \alpha\right) \quad (3)$$

پارامترهای بدون بعد مؤثر بر پدیده آبشستگی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت به صورت معادله (۳) قابل نمایش است.



شکل ۲- نمایش پارامترهای هندسی و هیدرولیکی

بهینترین زاویه دیواره جانبی با توجه به محدودیت عرض فلوم آزمایشگاهی و رعایت تعداد سیکل برابر برای مدل‌های سرریز تحقیق، تعیین کننده زاویه دیواره جانبی بوده است. این زاویه در محدود تحقیقات آزمایشگاهی در مورد اثر زاویه دیواره سرریز کلید پیانویی بر آبگذری نیز مورد استفاده قرار گرفته و افزایش زاویه دیواره جانبی سرریز کلید پیانو دوزنقه‌ای تا ۱۰ درجه با افزایش کارایی سرریز همراه بوده است [11]. لذا در این تحقیق، سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی و دوزنقه‌ای با زاویه دیواره ۳، ۶ و ۹ درجه مطابق با پلان نشان داده شده در شکل (۱) و با مشخصات هندسی در جدول (۱) مورد استفاده قرار گرفت.

روش انجام آزمایش

با توجه به تحقیقات قبلی انجام شده، با افزایش زاویه پلان دیواره جانبی سرریز دوزنقه‌ای، کارایی سرریز بیشتر می‌شود به نحوی که برای طراحی سرریزهای کلید پیانو دوزنقه‌ای با کارایی زیاد، مقادیر $\frac{L}{W} \geq 5$ و $\frac{B}{P} > 1.6$ ، $\frac{W_i}{W_o} = 1.33$ لذا در این تحقیق به منظور افزایش کارایی سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای، نسبت عرض دهانه ورودی به دهانه خروجی $\frac{W_i}{W_o} = 1.33$ انتخاب گردید. همچنین برای آنکه تعداد سیکلها بر نتایج تاثیر گذار نباشند بنحویکه شرایط تعداد سیکل سرریزهای مستطیلی و دوزنقه‌ای مشابه گردند و ثابت بودن عرض کانال، زاویه دیواره جانبی سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای معادل ۳، ۶ و ۹ درجه در نظر گرفته شد. در واقع،

جدول ۱- مشخصات هندسی سرریز کلید پیانویی مستطیلی و دوزنقه‌ای

| Parameter | Value | | | |
|--------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | RPKW | | TPKW | |
| | M ₁ | M ₇ | M ₃ | M ₅ |
| α | 0° | 3° | 6° | 9° |
| P | 15 cm | 15 cm | 15 cm | 15 cm |
| W _i | 8.75 cm | 6.65 cm | 4.55 cm | 2.42 cm |
| W _o | 6.58 cm | 5 cm | 3.42 cm | 1.82 cm |
| W | 50 cm | 50 cm | 50 cm | 50 cm |
| T _s | 0.4 cm | 0.4 cm | 0.4 cm | 0.4 cm |
| B | 35 cm | 35 cm | 35 cm | 35 cm |
| B _p | 15 cm | 15 cm | 15 cm | 15 cm |
| B _i | 10 cm | 10 cm | 10 cm | 10 cm |
| B _o | 10 cm | 10 cm | 10 cm | 10 cm |
| L | 260 cm | 245 cm | 239 cm | 226 cm |
| W _i /W _o | 1.33 | 1.33 | 1.33 | 1.33 |
| L/W | 5.20 | 4.9 | 4.78 | 4.52 |

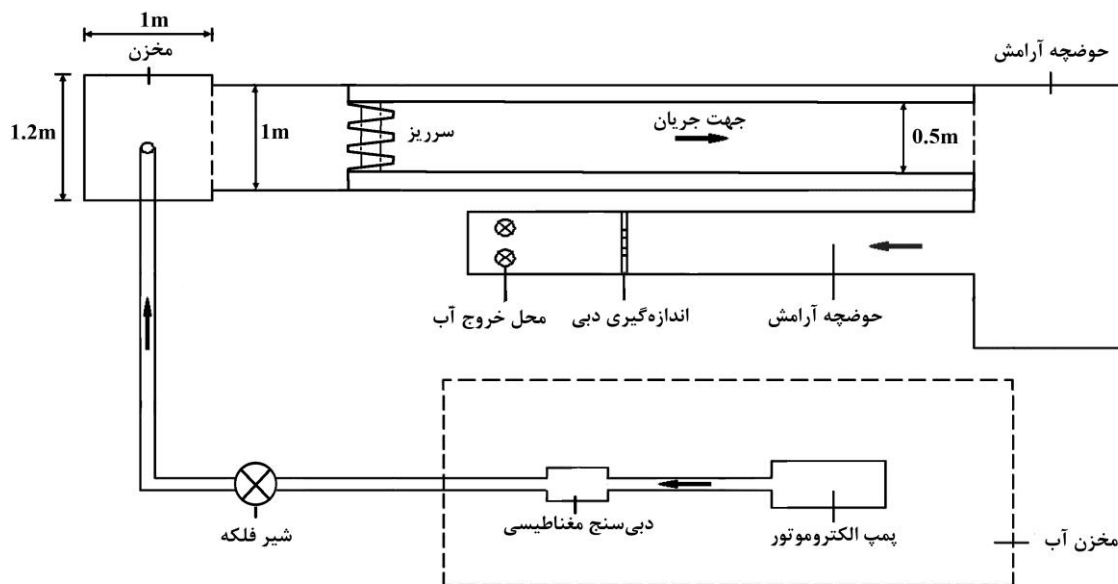
بستر رسوبی در پایین دست سرریزها، در طولی برابر ۲ متر و ضخامت ۱۵ سانتی متر تنظیم گردید. رسوب مورد استفاده در این تحقیق، شن با دانه‌بندی متوسط و چگالی ۲/۶۵ با زاویه اصطکاک داخلی ۳۵ درجه می‌باشد. مشخصات دانه‌بندی رسوب شامل $d_{10}=5.8$ mm،

بستر رسوبی در پایین دست سرریزها، در طولی برابر ۲ متر و ضخامت ۱۵ سانتی متر تنظیم گردید. رسوب مورد استفاده در این تحقیق، شن با دانه‌بندی متوسط و چگالی ۲/۶۵ با زاویه اصطکاک داخلی ۳۵ درجه می‌باشد. مشخصات دانه‌بندی رسوب شامل $d_{10}=5.8$ mm،

رو باز در ابتدای کانال که به همراه شبکه‌های توری آرام‌کننده جریان است هدایت شد. در هر آزمایش پس از تنظیم جریان با پمپ، که با شیر تنظیم صورت می‌گرفت و بعد از تعادل پروفیل آبشستگی بستر، ضمن قرائت دبی، عمق متوسط جریان در نقاط کنترل مشخص توسط سطح‌سنج نصب شده با دقت $1 \pm mm$ اندازه‌گیری شد. این آزمایش با دو دبی دیگر تکرار گردید. در ادامه آزمایشات، سرریزهای کلید پیانو دوزنقه‌ای نصب گردید و در دبی مشابه با دبی عبوری از سرریز مستطیلی آزمایشات انجام گردید. برای مدل M_1 ، سه عمق پایاب متفاوت در نظر گرفته شد و آزمایش‌ها با سه دبی آزمایش تکرار گردید. در هر آزمایش، با زهکشی کامل بستر پایین‌دست و چاله ایجاد شده، اندازه‌گیری سطح بستر انجام گردید. سطح رسوبات کف، توسط یک ارا به که روی آن متر لیزری با دقت یک میلی‌متر قرار می‌گرفت اندازه‌گیری شد.

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد اقلید انجام شد. جهت انجام آزمایش‌ها، از یک فلوم به طول ۶م عرض ۱ و ارتفاع ۰/۶ متر در پایین‌دست که بر روی پایه به ارتفاع ۱/۵ متر از زمین نصب شده است استفاده گردید. سازه اصلی فلوم، فلزی و دیواره-ها و کف، شیشه به ضخامت یک سانتیمتر می‌باشد. جریان از منبع زیرزمینی توسط پمپ وارد مخزن روباز در بالادست سرریز شده تا به همراه شبکه‌های توری از تلاطم و اغتشاش آن کاسته شود سپس از روی سرریز عبور کند. سیستم اندازه‌گیری دبی توسط یک دبی‌سنج مغناطیسی از نوع مگاب (با دقت $0/2 \pm$ تا $0/5 \pm$ درصد) کنترل شده و به منظور کنترل مضاعف دبی در هر آزمایش، از سرریز دوزنقه‌ای شکل کالیبره شده در خروجی فلوم استفاده می‌شود. به منظور نصب سرریزها جهت انجام آزمایشات، سکویی به ارتفاع ۲۵ و عرض ۱۵ سانتیمتر در قسمت ورودی کانال و در کف آن نصب و آب‌بندی گردید. مراحل و گام‌های انجام آزمایش در شکل (۳) نشان داده شده است.

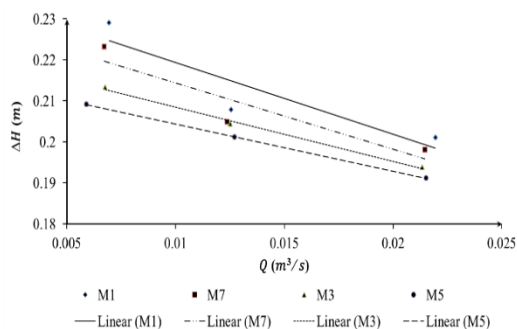
در مرحله اول آزمایشات، سرریز کلید پیانو مستطیلی روی سکو نصب و آب‌بندی گردید. جریان آب با پمپ از منبع زیرزمینی به مخزن



شکل ۳- پلان گام‌های آزمایش

پایاب‌های متفاوت و آزمایشات صورت گرفته جهت سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای با زوایای دیواره جانبی ۳، ۶ و ۹ درجه نیز در جدول، به ترتیب با عنوان‌های M_7 ، M_3 و M_5 در دبی‌های مختلف و با تست‌های شماره ۱۰ تا ۱۷ معرفی شده است.

به منظور بررسی پروفیل آبشستگی نسبت به زمان، آزمایش‌هایی در زمان‌های مختلف انجام شد و مشاهده گردید تغییرات آبشستگی در زمان‌های ابتدایی زیاد می‌باشد. لیکن تغییرات پروفیل بستر پس از زمان ۸۰ تا حدود ۱۲۰ دقیقه ناچیز می‌باشد. لذا با توجه به اینکه تغییرات عمق آبشستگی پس از زمان ۱۲۰ دقیقه بسیار ناچیز بوده به نحوی که بیش از ۹۰ درصد آبشستگی حاصل می‌گردد بنابراین زمان ۱۲۰ دقیقه برای تمام آزمایشات در نظر گرفته شد. تقریباً این زمان در تحقیقات قبلی برای محاسبه عمق آبشستگی در سرریزهای کلید پیانو مستطیلی با دانه‌بندی مشابه پیشنهاد گردیده و مورد استفاده قرار گرفت [۲۰]. در جدول (۲) خلاصه‌ای از شرایط اولیه و تعداد آزمایشات آورده شده است. آزمایشات صورت گرفته جهت سرریز کلید پیانویی مستطیلی، با عنوان M_1 و با تست‌های شماره ۱ تا ۹ در دبی‌ها و عمق



شکل ۴- مقایسه تغییرات دبی- اختلاف تراز بار آبی بالادست و پایین دست سرریزهای مورد مطالعه

نتایج و بحث

با توجه به اینکه بررسی آبشستگی در پایین دست سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای مد نظر می‌باشد. بر این اساس در پایان آزمایشات، سطح بستر فرسایش پذیر در محدوده‌ای به طول ۲ متر در جهت طولی (در راستای جریان) و $0/34$ متر در جهت عرضی، در فواصل هر $0/1$ متر اندازه‌گیری شد. همچنین ناحیه‌های نزدیک به دیواره‌های کناری به منظور حذف اثرات مدل و دیواره‌ها حذف گردید. در این تحقیق نحوه آرایش کلیدهای ورودی و خروجی متفاوت با تحقیقات پیشین در نظر گرفته شد تا تغییرات چاله آبشستگی مورد بررسی قرار گیرد. همانطور که در شکل (۱) نشان داده شد سرریزهای مورد مطالعه شامل سه کلید ورودی و دو کلید خروجی به همراه دو نیم کلید در طرفین می‌باشند که شکلی متقارن دارند. با توجه به آزمایشات انجام شده مشاهده شد با توسعه آبشستگی، حفره آبشستگی همچنین حداکثر عمق حفره، زیر کلیدهای خروجی ایجاد می‌شود که در شکل (۵) نشان داده شده است.

جدول ۲- شرایط اولیه آزمایشات سرریزهای کلید

پیانویی

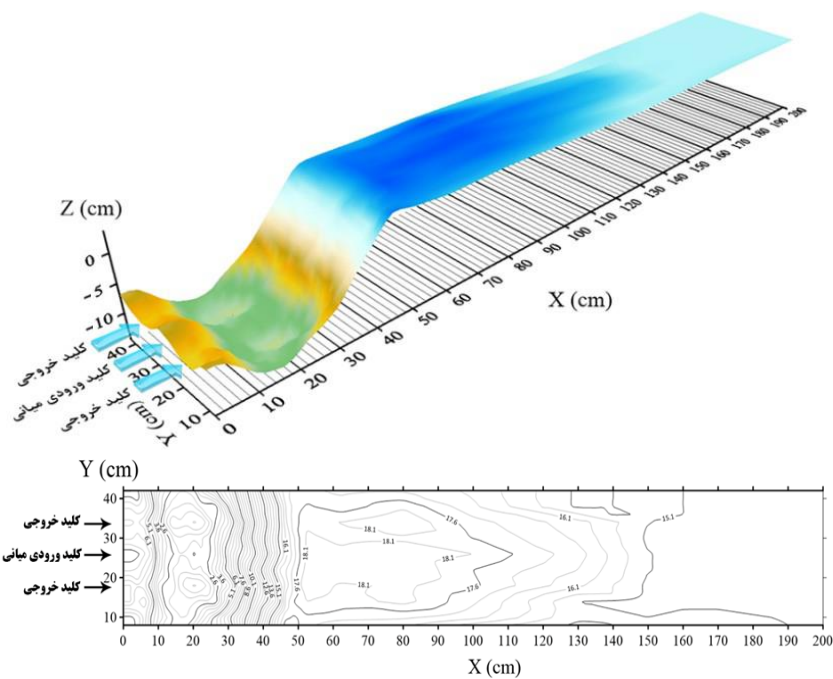
| M | Test N | Q (m ³ /s) | F _{rd} | ΔH(m) | h _d (m) |
|----------------|--------|-----------------------|-----------------|-------|--------------------|
| M ₁ | 1 | 0.0064 | 0.1710 | 0.229 | 0.037 |
| | 2 | 0.0064 | 0.1912 | 0.203 | 0.057 |
| | 3 | 0.0064 | 0.2189 | 0.177 | 0.079 |
| | 4 | 0.01249 | 0.3402 | 0.208 | 0.057 |
| | 5 | 0.01249 | 0.3683 | 0.192 | 0.07 |
| | 6 | 0.01249 | 0.4234 | 0.166 | 0.103 |
| | 7 | 0.02168 | 0.6150 | 0.201 | 0.066 |
| | 8 | 0.02168 | 0.7167 | 0.175 | 0.105 |
| | 9 | 0.02168 | 0.8037 | 0.156 | 0.128 |
| | 10 | 0.0064 | 0.1699 | 0.223 | 0.041 |
| M ₇ | 11 | 0.01249 | 0.3405 | 0.205 | 0.056 |
| | 12 | 0.02168 | 0.6108 | 0.198 | 0.067 |
| | 13 | 0.0064 | 0.1787 | 0.213 | 0.044 |
| M ₃ | 58 | 0.01249 | 0.3451 | 0.204 | 0.057 |
| | 14 | 0.02168 | 0.6205 | 0.194 | 0.068 |
| M ₅ | 15 | 0.0064 | 0.1589 | 0.209 | 0.045 |
| | 16 | 0.01249 | 0.3561 | 0.201 | 0.060 |
| | 17 | 0.02168 | 0.6343 | 0.191 | 0.07 |

در ابتدای آزمایش، منحنی $Q-\Delta H$ برای مدل‌های سرریز کلید پیانو، در شرایط آزمایش، مطابق شکل (۴) رسم شد. با توجه به مقایسه منحنی‌ها در شکل (۴) مشاهده گردید در دبی‌های مشابه، اختلاف تراز آب بالادست و پایین دست مدل مستطیلی بیش از مدل دوزنقه‌ای می‌باشد. همچنین در دبی مشخص، با افزایش زاویه دیواره جانبی سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای، اختلاف هد سرریزها کاهش می‌یابد. با افزایش دبی نیز، اختلاف بار آبی بالادست و پایین دست در مدل‌ها نسبت به یکدیگر کاهش می‌یابد.

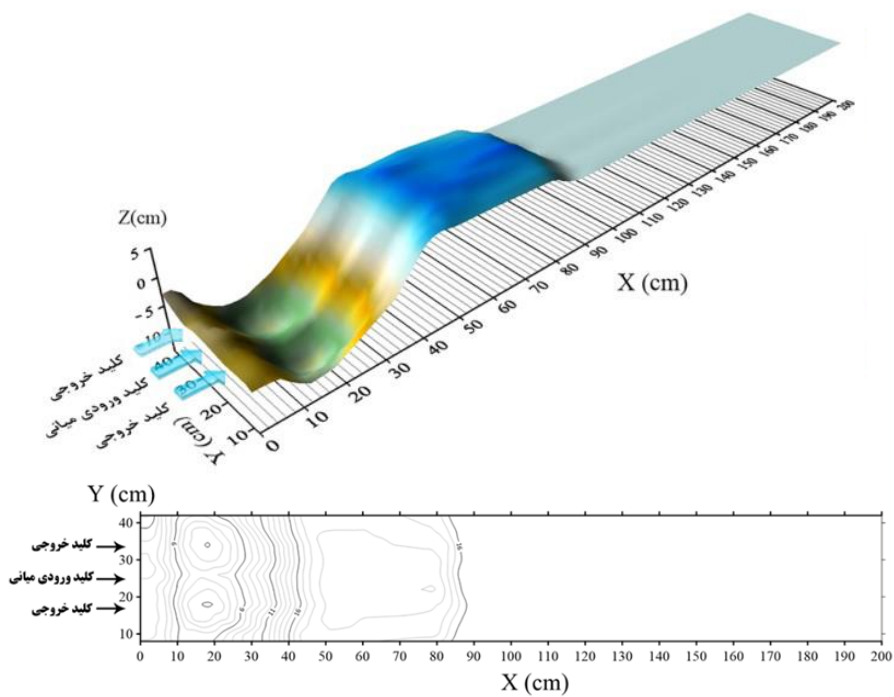


شکل ۵- پلان آبشستگی پایین دست سرریزهای کلید پیانو

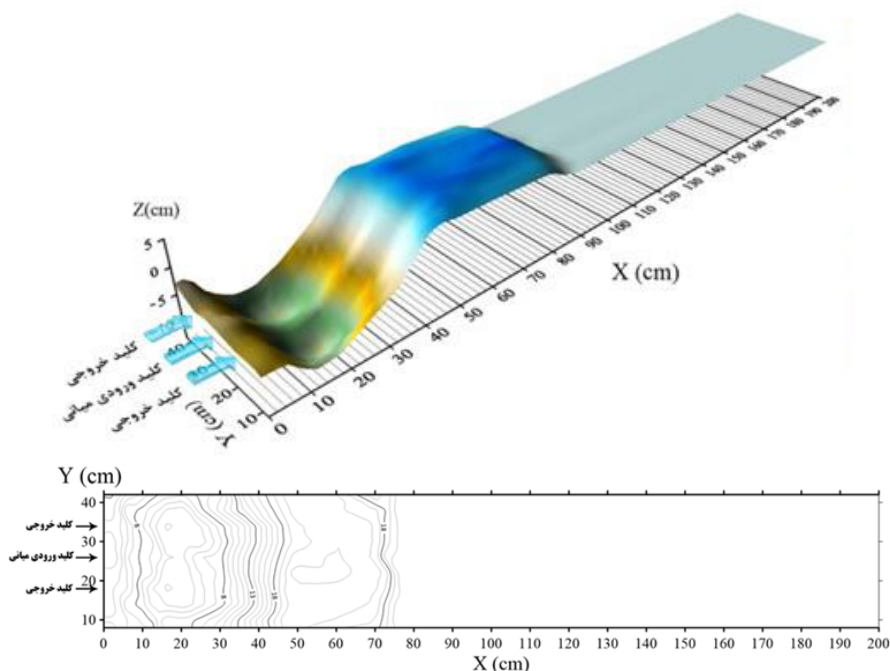
در شکل (۶)، پروفیل آبشستگی پایین دست سرریز کلید پیانو برای سه آزمایش، در دبی یکسان و با عمق پایاب‌های متفاوت نشان داده شده است.



الف: آزمایش شماره ۷



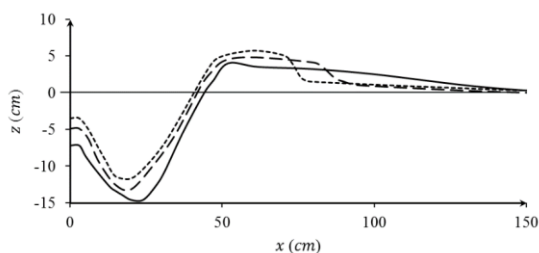
ب: آزمایش شماره ۸



ج: آزمایش شماره ۹

شکل ۶- پروفیل و پلان آبشستگی پایین‌دست سرریز کلید پیانو در عمق‌های پایاب متفاوت

آبشستگی می‌باشد. عامل مؤثر در تغییرات ارتفاع و طول تلماسه، قدرت حمل جریان می‌باشد که تابع انرژی جنبشی جت خارج شده از کلیدهای خروجی و عمق پایاب می‌باشد. لذا با کاهش عمق پایاب، سرعت و انرژی جنبشی افزایش یافته قدرت حمل جریان افزایش می‌یابد و مواد بستر شسته شده به پایین‌دست منتقل و تلماسه با ارتفاع کم و گسترش طولی زیاد ایجاد می‌شود.



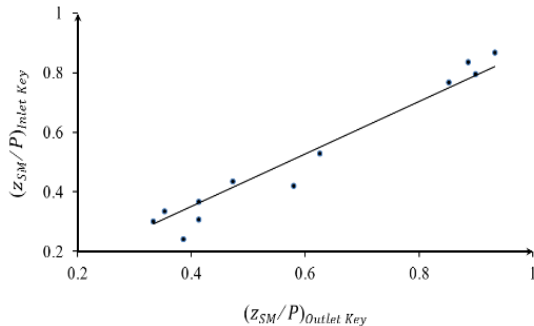
شکل ۷- تأثیر عمق پایاب بر پروفیل طولی آبشستگی

در شکل (۸)، مقطع عرضی پروفیل‌های آبشستگی شکل (۶) در راستای حداکثر عمق آبشستگی، مقایسه شده است. همانطور که در شکل (۸) نیز مشاهده می‌گردد، در هر سه وضعیت عمق پایاب، حداکثر عمق آبشستگی در محدوده زیر کلیدهای خروجی ایجاد می‌شود همچنین با کاهش عمق پایاب، تغییرات عرضی مقطع آبشستگی بیشتر می‌شود. به نحوی که در یک دبی مشخص، با کاهش عمق پایاب، دهانه عرضی چاله آبشستگی کاهش یافته، عرض پشته مابین آن افزایش می‌یابد. زیرا با افزایش عمق پایاب، ارتفاع جت ریزشی کاهش می‌یابد لذا سرعت جت حین برخورد به سطح جریان پایین‌دست کاهش می‌یابد. بنابراین تغییر سطح عرضی

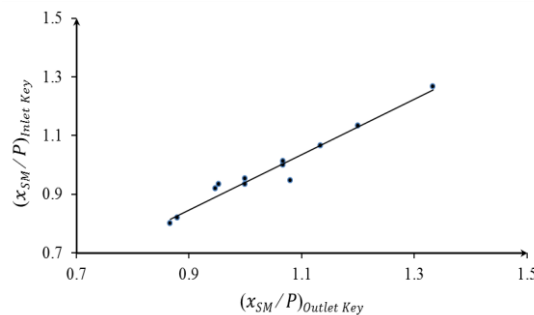
همانطور که در شکل‌های (۵) و (۶) مشاهده می‌گردد در سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای، با توجه به تغییر آرایش کلیدهای ورودی و خروجی، در هر عمق پایاب، حداکثر عمق آبشستگی در محدوده زیر کلیدهای خروجی ایجاد می‌شود. علت مشخص این موضوع، جت‌های ریزشی از روی کلیدهای خروجی و ایجاد گودال آبشستگی در پایین‌دست به واسطه ایجاد جریان‌های چرخشی در زیر کلیدهای خروجی می‌باشد. همچنین مابین کلیدهای خروجی طرفین و در زیر کلید ورودی میانی پشته ایجاد می‌شود. در شکل (۷)، پروفیل طولی آبشستگی شکل (۶) در راستای حداکثر عمق آبشستگی زیر کلید خروجی مقایسه شده است. همانطور که در شکل (۷) مشاهده می‌گردد، در سرریزهای کلید پیانویی، در یک دبی ثابت، با افزایش عمق پایاب، حداکثر عمق چاله و فاصله آن تا پای سرریز و گسترش طولی دهانه چاله فرسایش کاهش می‌یابد. آزمایشات انجام شده روی مدل‌های دیگر سرریزهای کلید پیانویی در دبی‌های تحقیق و در عمق پایاب‌های متفاوت نیز نتایج مشابهی را نشان داد. همچنین در مدل‌های سرریز کلید پیانویی، با افزایش عمق پایاب، طول تلماسه کاهش یافته ولی ارتفاع تلماسه افزایش می‌یابد.

در حقیقت عمق پایاب مانند یک بالشتک الاستیک عمل نموده که نقش زیادی در مستهلک نمودن انرژی جت‌هایی که از کلیدهای خروجی خارج می‌شوند دارند. همچنین با افزایش عمق پایاب، ضخامت جت ریزشی خارج شده از کلیدهای خروجی حین برخورد به سطح پایاب افزایش و سرعت آن کاهش می‌یابد لذا با افزایش عمق پایاب، عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. اما تأثیر عمق پایاب بر ارتفاع تلماسه رسوبات ناچیز بوده که علت آن قطر ذرات رسوبی و تمایل آن به ته‌نشینی بواسطه وزن ذرات، بلافاصله پس از خروج از چاله

به صورت بی‌بعد زیر کلیدهای خروجی به طور میانگین ۶ درصد بیشتر از فاصله حداکثر عمق زیر کلیدهای ورودی است.



الف: نسبت بی‌بعد بیشینه عمق چاله آبستتگی به ارتفاع سرریز



ب: نسبت بی‌بعد محل وقوع بیشینه عمق چاله به ارتفاع سرریز

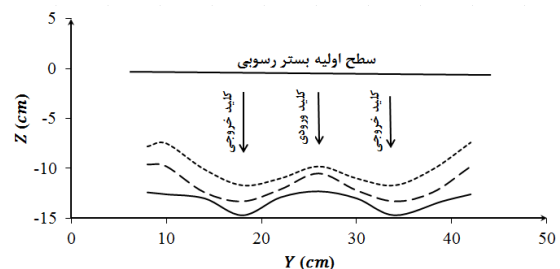
شکل ۹- مقایسه پارامترهای بی‌بعد چاله آبستتگی زیر کلید خروجی و کلید ورودی مدلهای سرریز

جدول ۳- مقایسه پارامترهای بی‌بعد حفره آبستتگی

| پارامترهای حفره آبستتگی | معادله | R ² |
|------------------------------|--|----------------|
| حداکثر عمق حفره آبستتگی | $\left(\frac{Z_{SM}}{P}\right)_{Inlet Key} = 0.879 \left(\frac{Z_{SM}}{P}\right)_{Outlet Key}$ | 0.953 |
| موقعیت مکانی حداکثر عمق حفره | $\left(\frac{X_{SM}}{P}\right)_{Inlet Key} = 0.941 \left(\frac{X_{SM}}{P}\right)_{Outlet Key}$ | 0.957 |

دهانه چاله آبستتگی افزایش می‌یابد که علت آن افزایش هد آب بالادست با افزایش دبی می‌باشد. رفتار مشابهی در تحقیقات قبلی برای سرریزهای خطی و غیرخطی نیز گزارش شده است [20]. همچنین در مدل‌های سرریز با زوایای دیواره متفاوت، با افزایش هد آب، حداکثر ارتفاع تلماسه و طول آن افزایش یافته است.

رسوبات بستر کم می‌شود به نحوی که طول دهانه عرضی چاله آبستتگی در راستای حداکثر عمق چاله افزایش یافته و به تبع آن عرض پشته مابین آن کاهش می‌یابد. این در حالی است که با توجه به شکل (۸) و مشاهدات صورت گرفته، با کاهش عمق پایاب، ارتفاع جت ریزشی افزایش یافته لذا سرعت جت حین برخورد به سطح جریان پایین دست افزایش و ضخامت جت کاهش می‌یابد بنابراین طول چاله‌های آبستتگی در زیر کلیدهای خروجی و در راستای جریان افزایش می‌یابد ولی طول چاله در جهت عرضی (در جهت عمود به جریان) کاهش می‌یابد و به تبع آن عرض پشته مابین آن‌ها افزایش می‌یابد. همچنین در شکل (۸) مشاهده می‌شود در سرریزهای کلید پیانویی، مقطع عرضی پروفیل آبستتگی در راستای بیشینه عمق آبستتگی نسبت به میانه عرض سرریز متقارن است. آزمایشات انجام شده روی مدل‌های دیگر سرریزهای کلید پیانویی در دبی‌های تحقیق و در سه عمق پایاب اولیه مورد نظر نیز نتایج مشابهی را نشان داد.

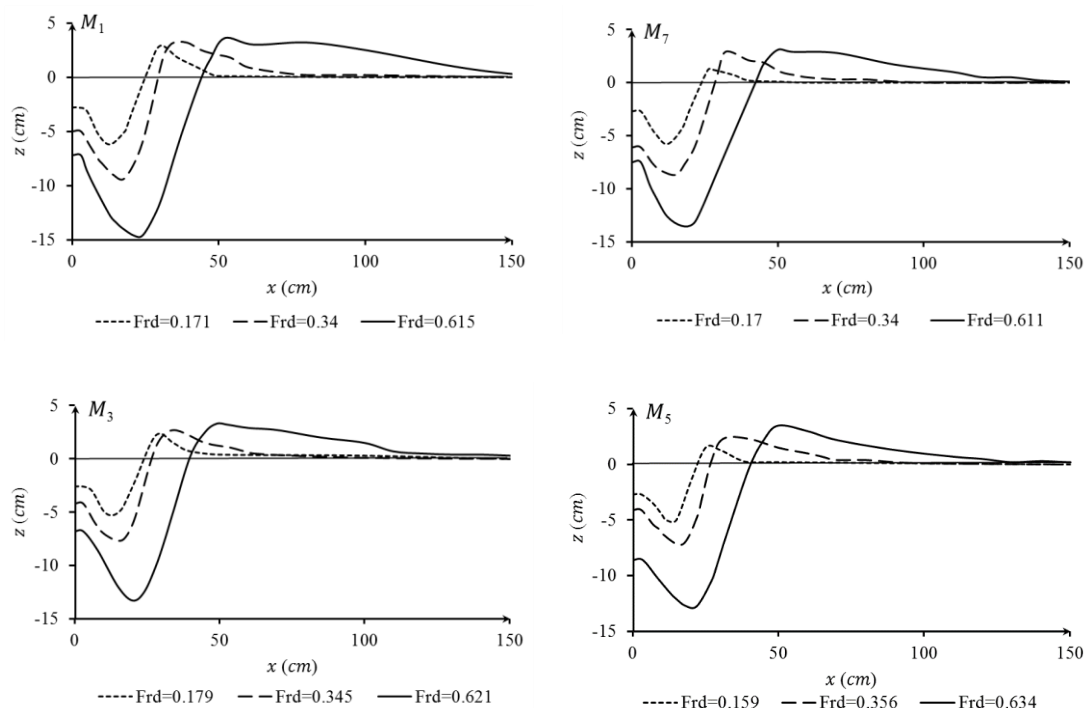


شکل ۸- مقطع عرضی حداکثر عمق آبستتگی در سه عمق پایاب متفاوت

در این تحقیق، نسبت بی‌بعد پارامترهای آبستتگی به ارتفاع سرریز، زیر کلید ورودی میانی و کلید خروجی مطابق شکل (۹) مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت که نتایج در جدول (۳) می‌باشد. با توجه به شکل (۹)، در تمام دبی‌ها به طور میانگین نسبت حداکثر عمق آبستتگی بی‌بعد زیر کلیدهای خروجی ۱۲ درصد بیشتر از زیر کلیدهای ورودی است. همچنین فاصله حداکثر عمق تا پای سرریز

با توجه به اینکه حداکثر عمق حفره آبستتگی در زیر کلیدهای خروجی ایجاد می‌شود لذا در شکل (۱۰)، تأثیر دبی یا هد آب بالادست در مشخصات چاله آبستتگی پایین دست مدل‌های سرریز کلید پیانویی مستطیلی و سرریزهای دوزنقه‌ای در راستای طولی و زیر کلید خروجی مقایسه شده است. با توجه به شکل (۱۰)، در تمام مدل‌های سرریز کلید پیانویی، با افزایش دبی و هد آب بالادست، بیشینه عمق چاله فرسایش، موقعیت مکانی آن تا پای سرریز و طول

در شکل (۱۱)، پروفیل‌های آبشستگی پایین دست مدل‌های سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای با تغییر در هندسه سرریز در اعداد فرود ذره متفاوت، مقایسه شد.



شکل ۱۰- تأثیر هد بالادست بر پروفیل حفره آبشستگی در پایین دست سرریزهای کلید پیانو

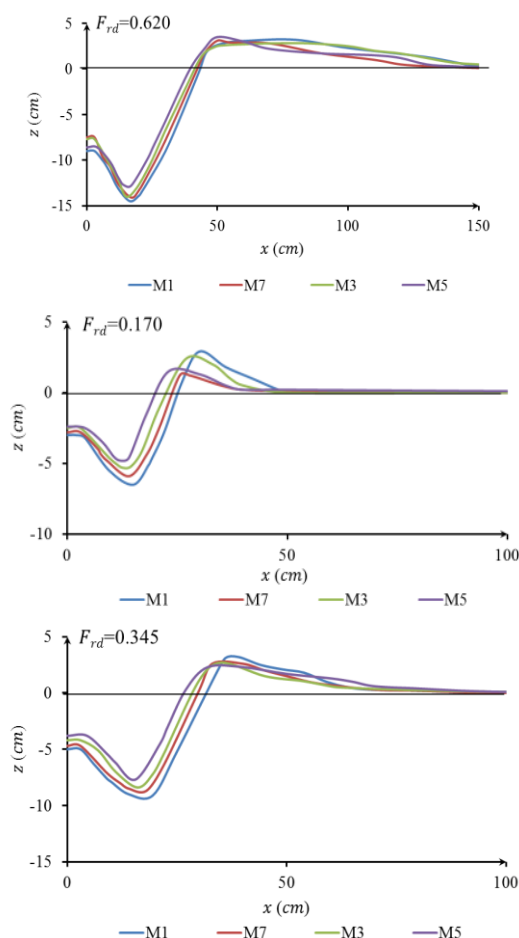
شکل ۱۱- مقایسه پروفیل‌های آبشستگی در پایین دست

سرریزهای کلید پیانویی

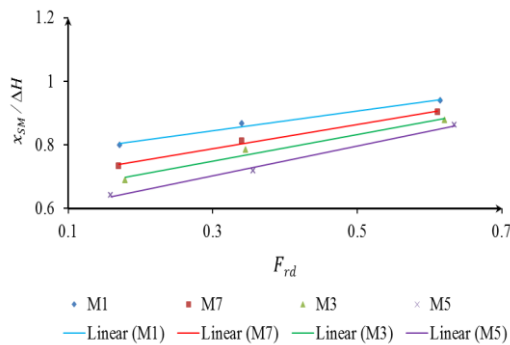
با توجه به مقایسه انجام شده در در شکل (۱۱) مشاهده می‌گردد در دبی ثابت، حداکثر عمق چاله آبشستگی مدل مستطیلی در مقایسه با مدل‌های دوزنقه‌ای بیشتر می‌باشد. همچنین با افزایش زاویه دیواره جانبی سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای، حداکثر عمق چاله آبشستگی، فاصله حداکثر عمق چاله تا پای سرریز و طول دهانه چاله آبشستگی در مدل دوزنقه‌ای کاهش می‌یابد.

همان طور که مشاهده می‌شود حداکثر ارتفاع تلماسه رسوبات در مدل‌های سرریزهای کلید پیانویی دارای اختلاف کمی است. که با افزایش دبی این اختلاف بسیار کاهش می‌یابد. به نحوی که تقریباً هندسه مدل از نظر زاویه دیواره جانبی تأثیر چندانی در مشخصات رسوبات قسمت تلماسه ندارد.

افزایش عمق چاله فرسایش در مدل مستطیلی در مقایسه با مدل‌های دوزنقه‌ای در شرایط هیدرولیکی مشابه، به دلیل آن است که مطابق شکل (۴) به ازای یک دبی مشخص، اختلاف بار آبی بالادست و پایین دست سرریز مستطیلی بیشتر از دوزنقه‌ای می‌باشد. با توجه به رابطه (۳) و تأثیر مستقیم اختلاف هد بالادست و پایین دست سرریز، عمق آبشستگی در مدل مستطیلی بیش از مدل دوزنقه‌ای می‌گردد. با توجه به کمتر بودن ضریب آبگذری سرریز کلید پیانویی مستطیلی نسبت به سرریز کلید پیانو دوزنقه‌ای، هد آب روی سرریز مستطیلی در شرایط دبی و عمق پایاب مشابه بیش از سرریز دوزنقه‌ای بوده لذا

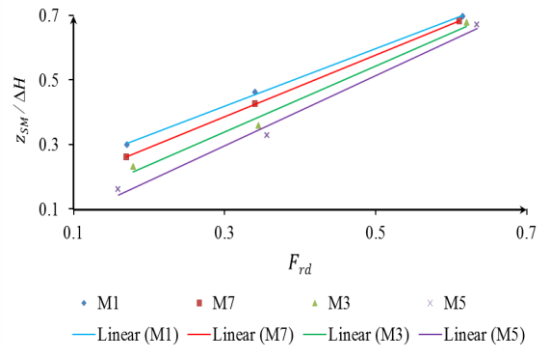


سرعت جت خارج شده از کلیدهای خروجی حین برخورد به جریان پایاب کاهش یافته، حداکثر عمق آبستتگی کاهش می‌یابد. با توجه به معادله (۳)، تأثیر عدد فرود ذره بر مشخصات چاله آبستتگی به صورت نمودارهایی از عدد فرود ذره (F_{rd}) بر حسب پارامترهای هندسی چاله آبستتگی به صورت بی‌بعد، در شکل (۱۲) نشان داده شده است.

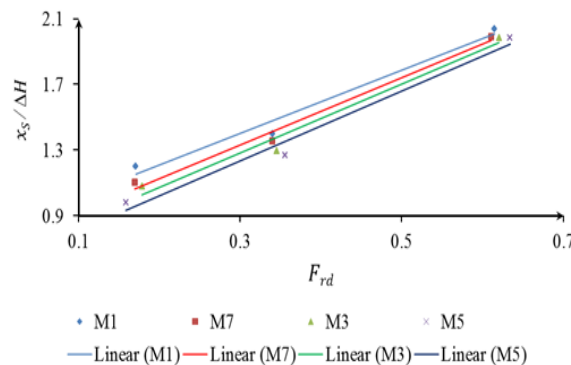


ب: تأثیر عدد فرود ذره بر محل وقوع حداکثر عمق آبستتگی

انرژی و سرعت جت ریزشی از روی کلیدهای خروجی سرریز مستطیلی در هنگام برخورد با بستر رسوبی بیش از سرریز دوزنقه‌ای بوده و سبب افزایش عمق فرسایش می‌شود. به صورت کلی، در سرریزهای کلید پانویبی دوزنقه‌ای، در یک دبی مشخص، با افزایش زاویه دیواره جانبی سرریز، عمق چاله فرسایش کاهش می‌یابد زیرا با توجه به تحقیقات پیشین، در یک دبی مشخص، سرریزهای کلید پانویبی با افزایش زاویه دیواره جانبی سرریز، ضریب آبگذری سرریز افزایش یافته، هد آب روی سرریز کاهش می‌یابد و با توجه به شکل (۵) اختلاف هد بالادست و پایین‌دست سرریز کاهش می‌یابد. لذا



الف: تأثیر عدد فرود ذره بر حداکثر عمق آبستتگی



ج: تأثیر عدد فرود ذره بر طول دهانه چاله آبستتگی

شکل ۱۲- تأثیر عدد فرود ذره بر مشخصات چاله آبستتگی به صورت بی‌بعد

حداکثر عمق چاله آبستتگی و طول دهانه چاله آبستتگی به ترتیب و به طور میانگین ۸ و ۳ درصد کاهش می‌یابد. با افزایش عدد فرود ذره، اختلاف مقادیر پارامترهای هندسی چاله آبستتگی مدل‌ها کاهش می‌یابد. وقتی $Fr_d > 0.65$ گردد عملکرد سرریزها از نظر نوع هندسه مدل در هدایت جریان و اختلاف هد (ΔH) کاهش یافته و اختلاف پروفیل چاله آبستتگی کم می‌شود. به نحوی که تفاوت معنی‌داری بین مدل‌های سرریز کلید پانویبی دوزنقه‌ای از نظر ابعاد چاله فرسایشی وجود ندارد. با توجه به اهمیت پیش‌بینی پارامترهای هندسی چاله آبستتگی به منظور تأمین ایمنی سدها، در این تحقیق می‌توان بر اساس آنالیز ابعادی انجام شده، مشخصه‌های هندسی آبستتگی را به

با توجه به شکل (۱۲) نیز مشاهده می‌شود، در تمام مدل‌های سرریز کلید پانویبی اعم از مستطیلی و دوزنقه‌ای، با افزایش عدد فرود ذره، پارامترهای هندسی چاله آبستتگی شامل حداکثر عمق چاله، فاصله آن تا پای سرریز و طول دهانه چاله افزایش می‌یابد. همچنین در یک عدد فرود ثابت، مقادیر پارامترهای هندسی چاله آبستتگی سرریز مدل مستطیلی بیش از مدل‌های دوزنقه‌ای می‌باشد و به صورت کلی، در سرریزهای کلید پانویبی دوزنقه‌ای، در یک عدد فرود ثابت، با افزایش زاویه دیواره جانبی سرریز، مقادیر پارامترهای هندسی چاله آبستتگی شامل حداکثر عمق چاله، فاصله آن تا پای سرریز و طول دهانه چاله کاهش می‌یابد. در تمام دبی‌ها با افزایش هر ۳ درجه زاویه دیواره جانبی سرریز کلید پانویبی، حداکثر عمق چاله آبستتگی به طور میانگین، ۵ درصد کاهش می‌یابد. همچنین فاصله موقعیت مکانی

صورت معادله با فرم عمومی $\frac{\theta_s}{\Delta H} = a F_{rd}^b \left(\frac{h_d}{\Delta H}\right)^c (\cos \alpha)^d$ بیان نمود.

در رابطه فوق، پارامترهای هندسی چاله آبشستگی (θ_s)، شامل: Z_{SM} حداکثر عمق حفره آبشستگی، X_{SM} فاصله افقی حداکثر عمق تا پای سرریز و X_G طول دهانه چاله آبشستگی می‌باشد که با ΔH ، اختلاف هد تراز آب بالادست و پایین دست سرریز بی‌بعد شد و توسط تابعی از عدد فرود ذره F_{rd} ، اختلاف هد نسبی $\frac{h_d}{\Delta H}$ و $\cos \alpha$ ارائه شد. لذا با توجه به فرم عمومی معادله، پارامترهای هندسی چاله آبشستگی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته و به کمک رگرسیون غیرخطی، ضرایب a ، b ، c و d تعیین و روابطی به منظور پیش‌بینی حدود ۹۰ درصد حداکثر عمق آبشستگی، موقعیت مکانی آن و دهانه چاله آبشستگی برای مدل‌های سرریزهای کلید پیاپویی، بر اساس روابط ارائه شده در جدول (۴) ارائه گردید.

بر اساس آنالیز ابعادی انجام شده، پارامترهای F_{rd} و $\frac{h_d}{\Delta H}$ و $\cos \alpha$ بر آبشستگی پایین دست سرریزهای کلید پیاپویی مؤثر هستند. که تأثیر تغییر هر یک از آن‌ها بر فرآیند آبشستگی پایین دست سرریزهای کلید پیاپویی مورد بررسی قرار گرفت. لذا با توجه به فرم اصلی و عمومی معادله پارامترهای هندسی چاله آبشستگی، برای هر یک از ابعاد حفره آبشستگی، تأثیر حذف پارامترها بر مقادیر R^2 و MSE که نشان‌دهنده میزان حساسیت رابطه اصلی به حذف هر یک از پارامترها می‌باشد (نسبت حساسیت) بررسی و مقایسه گردید. نتایج بدست آمده از تحلیل حساسیت پارامترهای مؤثر بر ابعاد چاله آبشستگی نشان داد هر سه بعد چاله آبشستگی، در حالت یک حذفی، به پارامتر F_{rd} بیشترین حساسیت را دارند. همچنین از بین ابعاد هندسی چاله آبشستگی، حداکثر عمق آبشستگی نسبت به حذف پارامتر F_{rd} حساسیت بسیار زیادی دارد.

نتیجه‌گیری

آبشستگی در پایین دست سرریزها یکی از مسایل مهم در پایداری سرریزها بوده و تاکنون مورد توجه بسیاری از محققین بوده است. در این تحقیق جهت بررسی فرآیند و الگوی آبشستگی پایین دست سرریزهای کلید پیاپویی، چهار مدل سرریز کلید پیاپویی در هندسه متفاوت از نظر زاویه دیواره جانبی و در شرایط هیدرولیکی متفاوت از نظر دبی و عمق پایاب مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج تحقیق نشان می‌دهد مشخصات پروفیل آبشستگی تابع هندسه سرریز و شرایط هیدرولیکی جریان می‌باشد. لذا با مقایسه رفتار آبشستگی در پایین دست سرریزهای کلید پیاپویی دوزنقه‌ای، نتایج حاصل از این تحقیق را می‌توان به صورت زیر جمع‌بندی نمود.

- در دبی‌های مشابه، اختلاف تراز آب بالادست و پایین دست مدل مستطیلی بیش از مدل دوزنقه‌ای می‌باشد. همچنین در دبی مشخص، با افزایش زاویه دیواره جانبی سرریزهای کلید پیاپویی دوزنقه‌ای، اختلاف هد سرریزها کاهش می‌یابد که با افزایش دبی، تفاوت اختلاف بار آبی بالادست و پایین دست در مدل‌ها نسبت به یکدیگر کاهش می‌یابد.

- در سرریزهای کلید پیاپویی دوزنقه‌ای، حداکثر عمق آبشستگی در محدوده زیر کلیدهای خروجی ایجاد می‌شود. به نحوی که در تمام دبی‌ها به طور میانگین نسبت حداکثر عمق آبشستگی بی‌بعد زیر کلیدهای خروجی ۱۲ درصد بیشتر از زیر کلیدهای ورودی است.

همچنین فاصله حداکثر عمق تا پای سرریز به صورت بی‌بعد زیر کلیدهای خروجی به طور میانگین ۶ درصد بیشتر از فاصله حداکثر عمق زیر کلیدهای ورودی است.

- در سرریزهای کلید پیاپویی، در یک دبی ثابت، با کاهش عمق پایاب، پروفیل چاله آبشستگی در راستای جریان گسترش می‌یابد به نحوی که حداکثر عمق چاله و فاصله آن تا پای سرریز و طول دهانه چاله فرسایش افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش عمق پایاب، طول تلماسه افزایش یافته ولی ارتفاع تلماسه کاهش می‌یابد.

- در سرریزهای کلید پیاپویی، مقطع عرضی پروفیل آبشستگی در راستای پیشینه عمق آبشستگی، نسبت به میانه عرض سرریز متقارن است. همچنین در یک دبی مشخص، با کاهش عمق پایاب، دهانه عرضی چاله آبشستگی در راستای پیشینه عمق چاله، کاهش یافته، عرض پشته مابین آن افزایش می‌یابد.

- در مدل‌های مستطیلی و دوزنقه‌ای سرریز کلید پیاپویی، با افزایش دبی و هد آب بالادست، حداکثر عمق چاله فرسایش و فاصله آن تا پای سرریز همچنین طول دهانه چاله آبشستگی افزایش می‌یابد.

- در شرایط هیدرولیکی ثابت، ابعاد چاله آبشستگی مدل مستطیلی در مقایسه با مدل‌های دوزنقه‌ای بیشتر می‌باشد و با افزایش زاویه دیواره جانبی سرریز کلید پیاپویی دوزنقه‌ای، حداکثر عمق چاله آبشستگی، فاصله حداکثر عمق چاله تا پای سرریز و طول دهانه چاله آبشستگی کاهش می‌یابد. به نحوی که در تمام دبی‌ها، با افزایش هر ۳ درجه زاویه دیواره جانبی سرریز کلید پیاپویی، حداکثر عمق چاله آبشستگی به طور میانگین، ۵ درصد، فاصله موقعیت مکانی حداکثر عمق چاله آبشستگی تا پای سرریز و طول دهانه چاله آبشستگی به ترتیب و به طور میانگین ۸ و ۳ درصد کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش عدد فرود ذره، اختلاف مقادیر پارامترهای هندسی چاله آبشستگی مدل‌ها کاهش می‌یابد. به نحوی که وقتی $F_{rd} > 0.65$ گردد تفاوت معنی‌داری بین مدل‌های سرریز کلید پیاپویی دوزنقه‌ای از نظر ابعاد چاله فرسایشی وجود ندارد.

- تحلیل حساسیت پارامترهای مؤثر بر هندسه چاله آبشستگی نشان داد تأثیرگذارترین پارامتر بر ویژگی‌های پروفیل آبشستگی، عدد فرود ذره می‌باشد که از بین پارامترهای حفره آبشستگی روی پیشینه عمق چاله بیشترین تأثیر را دارد.

ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

همکاری مشارکت‌کنندگان در تحقیق حاضر به صورت داوطلبانه و با رضایت آنان بوده است.

حامی مالی

هزینه تحقیق حاضر توسط نویسندگان مقاله تامین شده است.

مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان در قسمت‌های مختلف تحقیق نقش داشته‌اند.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

References

1. Khatsuria, R.M., Hydraulics of spillways and energy dissipators. 2004: CRC Press.
2. Vischer, D.L. and W.H. Hager, Dam hydraulics. JOHN WILEY & SONS, Chichester, West Sussex PO 19 1 UD(UK). 316, 1998: p. 316.
3. Khatsuria, R., Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators. Georgia Institute of Technology. Ed. 2005, Marcel Dekker. Atlanta, USA.
4. Leite Ribeiro, M., et al. Hydraulic capacity improvement of existing spillways—design of a piano key weirs. in Proceedings (on CD) of the 23rd Congress of the Int. Commission on Large Dams CIGB-ICOLD. 2009.
5. Leite Ribeiro, M., et al. Piano Key Weirs as efficient spillway structure. in Proceedings (on CD) of the 24th Congress of CIGB-ICOLD. 2012.
6. Pfister, M., S. Jüstrich, and A. Schleiss. Toe-scour formation at Piano Key Weirs. in Labyrinth and Piano Key Weirs III: Proceedings of the 3rd International Workshop on Labyrinth and Piano Key Weirs (PKW 2017), February 22-24, 2017, Qui Nhon, Vietnam. 2017. CRC Press.
7. Falvey, H.T., Hydraulic design of labyrinth weirs. 2003: ASCE Press (American Society of Civil Engineers) Reston, VA.
8. Machiels, O., et al., Experimental observation of flow characteristics over a Piano Key Weir. Journal of hydraulic research, 2011. 49(3): p. 359-366.
9. Ribeiro, M.L., et al., Hydraulic design of A-type piano key weirs. Journal of Hydraulic Research, 2012. 50(4): p. 400-408.
10. Lempérière, F. and A. Ouamane, The Piano Keys weir: a new cost-effective solution for spillways. International Journal on Hydropower & Dams, 2003. 10 : (5)p. 144-149.
11. Hasani, M.A. and M. Mehraein. The effect of the angle of the wire wall of the piano key on the water passage. in the first conference of engineering opportunities and challenges of Alborz province. 2017.
12. Barcouda, M., et al., Cost effective increase in storage and safety of most dams using fusegates or PK Weirs, in proceedings of 22 nd ICOLD congress. CIGB/ICOLD, Barcelona, Spain Q, 2006. 86: p. R3.
13. Hien, T.C., H.T. Son, and M.H.T. Khanh. Results of some piano keys weir hydraulic model tests in Vietnam. in Proc. of the 22nd Congress of ICOLD, Barcelona, Spain. 2006.
14. Anderson, R. and B. Tullis, Comparison of piano key and rectangular labyrinth weir hydraulics. Journal of Hydraulic Engineering, 2011. 138(4): p. 358-361.
15. Ouamane, A. and F. Lempérière. Design of a new economic shape of weir. in Proceedings of the International Symposium on Dams in the Societies of the 21st Century. 2006.
16. Kabiri-Samani, A. and A. Javaheri, Discharge coefficients for free and submerged flow over Piano Key weirs. Journal of Hydraulic Research, 2012. 50(1): p. 114-120.
17. Safarzadeh Gandashmin, A. and B. Neurozi. 3D Hydrodynamics of Trapezoidal Piano Key Spillways, 2017, International Journal of Civil Engineering, 15(1), p.89-101.
18. Oertel, M., Piano key weir research: State-of-the-art and future challenges. 2018.
19. Rajaei, A., M. Esmaeili Varaki, and B. Shafei Sabet, Experimental investigation on local scour at the downstream of grade control structures with labyrinth planform. ISH Journal of Hydraulic Engineering, 2018: p. 1-11.

20. Jüstrich, S., M. Pfister, and A.J. Schleiss, Mobile riverbed scour downstream of a Piano Key weir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016. 142(11): p. 04016043.
21. Ahmadi Dehrshid, F. and Q. Gohari. Investigating the effect of discharge and depth of tailwater on the dimensions of the washout hole downstream of the piano key weir. in *International Conference on Civil Engineering*. 2015.
22. Mehboudi, A., J. Attari, and S. Hosseini, Experimental study of discharge coefficient for trapezoidal piano key weirs. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2016. 50: p. 65-72.
23. Mehboudi, A., J. Attari, and A. Hosseini. Flow regimes over trapezoidal piano key weirs. in *Labyrinth and Piano Key Weirs III: Proceedings of the 3rd International Workshop on Labyrinth and Piano Key Weirs (PKW 2017)*, February 22-24, 2017, Qui Nhon, Vietnam. 2017. CRC Press.

