


# Investigate Foundation Local Scour Type-A Piano Key Weirs with Zigzag Sidewall

Sobhan Moradi <sup>1</sup>, Hamed Shahsavari <sup>1</sup>, Kazem Esmaili <sup>2\*</sup>

1- Ph.D. Student, Ferdowsi university of Mashhad/water structures Group.

2- Associate Professor, Ferdowsi university of Mashhad/water engineering/water structures Group.

\* [esmaili@um.ac.ir](mailto:esmaili@um.ac.ir)

Received: 8 October 2020, Accepted: 27 December 2020  J. Hydraul. Homepage: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

## Abstract

**Introduction:** Previous studies show that increasing the velocity of approaching flow has been reported as the most important factor in reducing the discharge capacity. Also, the falling jet from the inlet and outlet keys of a piano key weir has been reported as the main cause of foundation erosion. Researchers believe that the geometric characteristics of the piano key weirs have a significant effect on the hydraulic behavior, the phenomenon of immersion on the crest, as well as the downstream scour hole of this type of weirs. In the present study, in addition to investigating the hydraulic performance of Type A piano weir in standard and zigzag sidewall conditions, the dimensions of the scour hole in downstream of this weir have been studied. Therefore, the effects of zigzagging of the sidewall profile, which was modeled with the aim to improve transmission capacity and increases the immersion threshold in high water heads, are investigated on the geometric characteristics of the scour hole.

**Methodology:** Experiments in a rectangular open-channel, metal frame, and glass wall, with a length of 10 meters, a width of 0.3 meters and a height of 0.5 meters and a slope of 0.0012 in the laboratory of hydraulic models Department of Water Science and Engineering at Ferdowsi University of Mashhad was done. Based on the critical depth of the flow on the crest ( $h_c = (q^2/g)^{1/3}$ ), the range of ( $2.8 \leq Q \leq 42$ ) Lit/s for the input flow rate was set to achieve a minimum relative head of water on the weir crest with values greater than 0.1. According to this criterion, the relative water depth range of all experiments was in the range ( $0.2 \leq H_u/P \leq 1$ ). Free flow conditions were adjusted using  $h_d$  in the range of ( $0.04 \leq h_d \leq 0.145$ ) meters and up to the value of  $0.35H_u$  by the sleeper valve downstream of the channel. Physical modeling of weirs was modeled with two forms of standard weir crest profile (type A) and a zigzag crest with the ratios of  $P/Wu=1.33$  and  $Wi/Wo=1.2$  in 2.5 repetitions with the standard sharp crest weir model with constant and equal height. In the second model, the form of the zigzag crest weir of the piano key was designed as a sinusoid with a height of 1 cm. During the sidewall, 9 complete sinus zigzags were modeled. The sedimentary layer of the channel floor with two non-uniform and non-stick grains (1 and 3.2 mm), according to the results of the control experiment, was considered with a thickness of 0.4 m and a length of 2 m.

**Results and discussion:** In the present study; by designing a sinusoidal zigzag in the sidewall of a standard piano key weir (type A), it was shown that the maximum discharge coefficient occurs in a smaller ratio of  $H/P$  but with a higher numerical value than the standard model, so that the average discharge coefficient increases by 10% Improves discharge capacity efficiency. On the other hand; Due to the importance of scouring, changes in the geometric parameters of

the hole and ridge sedimentary in the downstream erosion bed were measured and analyzed by dimensional analysis using the  $\Pi$ -Buckingham method. The interaction of the output current jet in dealing with the sedimentary bed and intersecting with the falling jet of the inlet keys is the main cause of obstruction and the emergence of two rotating vortices in the lower hole erosion downstream of the piano key weir. The results showed that the maximum depth of the scour hole was reduced by approximately 31% with the piano key of a linear sharp crest. Also, with the zigzagging sidewall of a standard piano key weir (type A), it was shown that the length of the scours hole increase by 15% and, the depth of scouring equilibrium decreased by 12% compared to the standard model. Furthermore; At maximum critical relative depth values of  $h_c/P$  and  $h_d/P$  water level compared to minimum values, the maximum scours depth increases by 73% and decreases by 90%, respectively. Also, it was observed that scour values occurred in fine-grained sediments 68% more than coarse-grained sediments. The process of sediment transport in the hole and ridge scour increases with increasing particle Froude number. In the particle Froude number range,  $Fr_{d50} = 1.2-2.7$  for the PKW, the average depth, and length of the scour hole are estimated to decrease by 10% and increase by 22% respectively.

**Conclusion:** Finally, it should be noted that the proposed crest shape has reduced the maximum depth of the concrete slab in the economic design of downstream protection structures of Type-A PKW.

**Keywords:** Scour, Piano key weir, Zigzag crest, Current immersion.



© 2021 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.  
This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

# بررسی آبستگي موضعي پی در سرریزهای کلیدپیانویی تیپ A با تاج جانبی زیگزاگی

سبحان مرادی<sup>۱</sup>، حامد شهسواری<sup>۱</sup>، کاظم اسماعیلی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری، سازه‌های آبی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.

۲- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.

\* [esmaili@um.ac.ir](mailto:esmaili@um.ac.ir)

دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۱۷، پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۰۷، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

**چکیده:** پژوهش حاضر با مدل‌سازی فیزیکی دو شکل از پروفیل تاج سرریز کلید پیانویی استاندارد (تیپ A) و تاج زیگزاگی در ۲/۵ سیکل انجام شد. الگوی زیگزاگ با ۹ تکرار از سینوس کامل به دامنه ارتفاع ۱ سانتی‌متر در طول تاج جانبی طراحی گردید. عمق نسبی بحرانی جریان روی تاج سرریز مطابق با محدوده تغییرات دبی عبوری در بازه  $(1 \leq H_u/P \leq 0.2)$  و بستر رسوبی با دو دانه‌بندی غیرچسبنده (۶/۶۷ و  $d_{50}/P = 2/13$ ) انتخاب گردید. همچنین؛ برای انجام تحلیل ابعادی از روش پای-باکینگهام استفاده شد. نتایج نشان داد که حداکثر عمق گودال آبستگي با کلیدپیانویی شدن سرریز لبه تیز خطی به طور تقریبی ۳۱ درصد کاهش یافته است. با زیگزاگی شدن تاج جانبی سرریز کلیدپیانویی استاندارد (تیپ A)، نشان داده شد که طول گودال آبستگي با افزایش ۱۵ درصدی و عمق تعادل آبستگي با کاهش ۱۲ درصدی نسبت به مدل شاهد رخ داده است. علاوه بر این؛ در مقادیر حداکثر عمق نسبی بحرانی  $hc/P$  و تراز پای آب  $hd/P$  نسبت به مقادیر حداقلی، مقدار حداکثر عمق آبستگي به ترتیب ۷۳ درصد افزایش و ۹۰ درصد کاهش می‌یابد. همچنین، مشاهده شد که مقادیر آبستگي در رسوبات ریزدانه ۶۸ درصد بیشتر از رسوبات درشت‌دانه رخ داده است. روند انتقال رسوب در گودال و پشته رسوبی با افزایش عدد فرود ذره، افزایشی است. در بازه عدد فرود ذره  $Fr_{d50} = 2/7 - 2/11$  برای سرریزهای کلید پیانویی به طور متوسط مقادیر عمق و طول گودال آبستگي با ۱۰ درصد کاهش و ۲۲ درصد افزایش برآورد شده است.

**کلید واژگان:** آبستگي، سرریز کلید پیانویی، تاج زیگزاگی، استغراق جریان.

## ۱- مقدمه

نسبت به انواع سرریزها، می‌باشد. به طوری که برای یک دبی ثابت، عمق آب روی این نوع سرریز نسبت به سرریزهای دیگر به میزان قابل توجهی کمتر است (Anderson and Tullis, 2012). مقایسه عملکرد هیدرولیکی سرریزهای غیرخطی در شرایط استغراق کم نشان داد که سرریزهای کلید پیانویی تیپ A با کف شیبدار در کلیدهای ورودی و خروجی نسبت به سرریزهای زیگزاگی به دلیل کاهش افت انرژی جریان و به تبع آن، نیاز به انرژی کمتر در بالادست سرریز برای عبور یک دبی ثابت، عملکرد بهتری دارند (Dabbling and Tullis, 2012). بررسی بر روی انواع هندسه از سرریزهای کلید پیانویی، بیانگر بهبود عملکرد هیدرولیکی

سرریز به عنوان سازه‌ای در بدنه سد برای تخلیه ایمن حجم مازاد بر ذخیره مخزن ساخته می‌شود و عامل اصلی ایمنی سدها در زمان سیلاب است. به اختصار، انواع سرریزهای مورد استفاده در سدها، عبارت‌اند از: اوجی، پلکانی، نیلوفری، کنگره‌ای و کلید پیانویی. سرریز کلید پیانویی<sup>۱</sup> حالت توسعه یافته سرریزهای غیرخطی است که با رویکرد افزایش ظرفیت تخلیه سرریزهای زیگزاگی، طراحی و بر روی سازه‌های آبی ساخته می‌شود. این سرریز از جمله سازه‌های کنترل جریان می‌باشد که به ازای تراز آب معین روی تاج سرریز، دارای بیشترین ظرفیت تخلیه (دست‌کم چهار برابر)

<sup>1</sup> Piano Key Weir (PKW)

این نوع سرریز در اثر نصب دماغه در زیر شیروانی بالادست، افزایش ارتفاع تاج با نصب دیواره‌های سپری و همچنین تغییر شکل تاج کلیدهای خروجی به نیم دایره، می‌باشد (Anderson and Tullis, 2012). (Ribeiro et al., 2012). بررسی تاثیر سه هندسه متفاوت از تاج سرریز کلید پیانویی نشان دادند که با نصب دیواره‌های سپری روی تاج سرریز در سد اترویت، بازده (راندمان) هیدرولیکی سرریز کلید پیانویی تا ۱۵٪ افزایش یافته است. اندازه‌گیری سرعت میانگین جریان در بالادست سرریز کلید پیانویی، نشان‌دهنده‌ی مولفه‌های عمودی به نسبت قوی در نزدیکی بدنه سرریز، حتی در شرایط دبی تخلیه کم، می‌باشد (Sharma and Tiwari, 2013). با زیگزگی (سینوسی) شدن نیمرخ (پروفیل) تاج جانبی، بیشینه ضریب دبی در نسبت  $H_u/P$  کمتری رخ می‌دهد. به طوری که افزایش ۱۰ درصدی در میانگین میزان ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی با شکل هندسی زیگزگی نسبت به استاندارد، گزارش شده است (Moradi et al., 2020).

افزون بر بررسی عملکرد هیدرولیکی، پژوهش‌های محدودی نیز بر روی آبشستگی بستر فرسایش‌پذیر در پایین‌دست سرریزهای کلید پیانویی انجام شده است. در این راستا (Rajaei et al., 2018) میزان عمق آبشستگی در پایین‌دست سرریزهای کنگره‌ای را با کاهش ۱۹ درصدی نسبت به سرریزهای لبه تیز خطی، گزارش کردند. Palermo et al. (2020) با بررسی ریخت‌شناسی (مورفولوژی) آبشستگی در پایین‌دست سرریز کلید پیانویی با دو سری آزمایش نشان دادند که هندسه تعادلی بستر، در اصل تحت تأثیر سه فراسنجه (پارامتر)؛ دبی جریان، ارتفاع سرریز و عمق پای‌آب قرار دارد.

سرریزهای کنگره‌ای را با کاهش ۱۹ درصدی نسبت به سرریزهای لبه تیز خطی، گزارش کردند. Palermo et al. (2020) با بررسی ریخت‌شناسی (مورفولوژی) آبشستگی در پایین‌دست سرریز کلید پیانویی با دو سری آزمایش نشان دادند که هندسه تعادلی بستر، در اصل تحت تأثیر سه فراسنجه (پارامتر)؛ دبی جریان، ارتفاع سرریز و عمق پای‌آب قرار دارد.

افزون بر بررسی عملکرد هیدرولیکی، پژوهش‌های محدودی نیز بر روی آبشستگی بستر فرسایش‌پذیر در پایین‌دست سرریزهای کلید پیانویی انجام شده است. در این راستا (Rajaei et al., 2018) میزان عمق آبشستگی در پایین‌دست سرریزهای کنگره‌ای را با کاهش ۱۹ درصدی نسبت به سرریزهای لبه تیز خطی، گزارش کردند. Palermo et al. (2020) با بررسی ریخت‌شناسی (مورفولوژی) آبشستگی در پایین‌دست سرریز کلید پیانویی با دو سری آزمایش نشان دادند که هندسه تعادلی بستر، در اصل تحت تأثیر سه فراسنجه (پارامتر)؛ دبی جریان، ارتفاع سرریز و عمق پای‌آب قرار دارد.

این نوع سرریز در اثر نصب دماغه در زیر شیروانی بالادست، افزایش ارتفاع تاج با نصب دیواره‌های سپری و همچنین تغییر شکل تاج کلیدهای خروجی به نیم دایره، می‌باشد (Anderson and Tullis, 2012). (Ribeiro et al., 2012). بررسی تاثیر سه هندسه متفاوت از تاج سرریز کلید پیانویی نشان دادند که با نصب دیواره‌های سپری روی تاج سرریز در سد اترویت، بازده (راندمان) هیدرولیکی سرریز کلید پیانویی تا ۱۵٪ افزایش یافته است. اندازه‌گیری سرعت میانگین جریان در بالادست سرریز کلید پیانویی، نشان‌دهنده‌ی مولفه‌های عمودی به نسبت قوی در نزدیکی بدنه سرریز، حتی در شرایط دبی تخلیه کم، می‌باشد (Sharma and Tiwari, 2013). با زیگزگی (سینوسی) شدن نیمرخ (پروفیل) تاج جانبی، بیشینه ضریب دبی در نسبت  $H_u/P$  کمتری رخ می‌دهد. به طوری که افزایش ۱۰ درصدی در میانگین میزان ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی با شکل هندسی زیگزگی نسبت به استاندارد، گزارش شده است (Moradi et al., 2020).

افزون بر بررسی عملکرد هیدرولیکی، پژوهش‌های محدودی نیز بر روی آبشستگی بستر فرسایش‌پذیر در پایین‌دست سرریزهای کلید پیانویی انجام شده است. در این راستا (Rajaei et al., 2018) میزان عمق آبشستگی در پایین‌دست سرریزهای کنگره‌ای را با کاهش ۱۹ درصدی نسبت به سرریزهای لبه تیز خطی، گزارش کردند. Palermo et al. (2020) با بررسی ریخت‌شناسی (مورفولوژی) آبشستگی در پایین‌دست سرریز کلید پیانویی با دو سری آزمایش نشان دادند که هندسه تعادلی بستر، در اصل تحت تأثیر سه فراسنجه (پارامتر)؛ دبی جریان، ارتفاع سرریز و عمق پای‌آب قرار دارد.

افزون بر بررسی عملکرد هیدرولیکی، پژوهش‌های محدودی نیز بر روی آبشستگی بستر فرسایش‌پذیر در پایین‌دست سرریزهای کلید پیانویی انجام شده است. در این راستا (Rajaei et al., 2018) میزان عمق آبشستگی در پایین‌دست سرریزهای کنگره‌ای را با کاهش ۱۹ درصدی نسبت به سرریزهای لبه تیز خطی، گزارش کردند. Palermo et al. (2020) با بررسی ریخت‌شناسی (مورفولوژی) آبشستگی در پایین‌دست سرریز کلید پیانویی با دو سری آزمایش نشان دادند که هندسه تعادلی بستر، در اصل تحت تأثیر سه فراسنجه (پارامتر)؛ دبی جریان، ارتفاع سرریز و عمق پای‌آب قرار دارد.

نسبت‌های  $\frac{V_c}{\sqrt{gh_c}}$ ،  $\frac{\rho_w h_c V_c}{\mu}$ ، به ترتیب به عدد فرود  $(Fr)$ ، عدد رینولدز  $(Re)$  اشاره دارند.

با توجه به محدوده کمترین عمق پای آب (۰/۰۵ متر) و سرعت جریان (۰/۲۳ متر بر ثانیه)، کمترین عدد رینولدز روی بستر فرسایشی و در پایین دست سرریز ۳۱۲۰۰ محاسبه شد که شرایط لازم برای حذف عدد رینولدز از رابطه‌های بالا را برابر (Justrich et al. (2016) دارا می‌باشد. عدد فرود جریان نیز در همه آزمایش‌ها کمتر از یک بوده، و بدین گونه شرایط لازم برای زیر بحرانی بودن جریان در بالادست سرریز را ارضا می‌کند.

لازم به یادآوری است؛ با ترکیب سه نسبت بی بعد در رابطه (۲)، عدد فرود روی تاج سرریز، چگالی نسبی رسوب و نسبت قطر میانگین رسوب به عمق آب روی تاج سرریز، عدد فرود ذره یا عدد پایداری، به دست آمد:

$$Fr_{d50} = \frac{V}{\sqrt{\left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}\right) g d_{50}}} \quad (3)$$

در نهایت نسبت‌های بی بعد موثر بر نتایج آزمایش‌ها، برابر رابطه (۴) ارائه شد:

$$\frac{d_s}{h_c}, \frac{L_s}{h_c} = f \left( Fr_{d50}, \frac{h_d}{P}, \frac{h_c}{P}, \frac{d_{50}}{P}, SF \right) \quad (4)$$

## ۲-۲- تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در آبراه‌ای (کانال) با مقطع مستطیلی، اسکلت فلزی و دیواره شیشه‌ای، به طول ۱۰ متر، عرض ۰/۳ متر و ارتفاع ۰/۵ متر و شیب کف ۰/۰۱۲ در آزمایشگاه مدل‌های هیدرولیکی گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد انجام شده است (شکل ۱-ا).

برای آرام کردن هرچه بیشتر سطح آب در جریان ورودی به آبراه از یک صفحه یونولیت شناور در ابتدای آبراه استفاده شد. برای حذف اثر کشش سطحی بر نتایج آزمایش و همچنین بر مبنای عمق بحرانی جریان روی تاج  $h_c = (q^2/g)^{1/3}$  محدوده تغییرپذیری‌های دبی جریان ورودی در بازه  $2/8 \leq Q \leq 42$  لیتر بر ثانیه تنظیم شد تا کمینه عمق نسبی آب روی تاج سرریز نیز با میزان‌های بزرگتر از ۰/۱ بدست آید (Novak, and Cabelka, 1981).

طراحی و اجرای ابعاد بهینه- اقتصادی پی در بستر رسوبی و فرسایش‌پذیر رودخانه پایین دست این نوع سرریزها امری ضروری و کاربردی می‌باشد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- تحلیل ابعادی

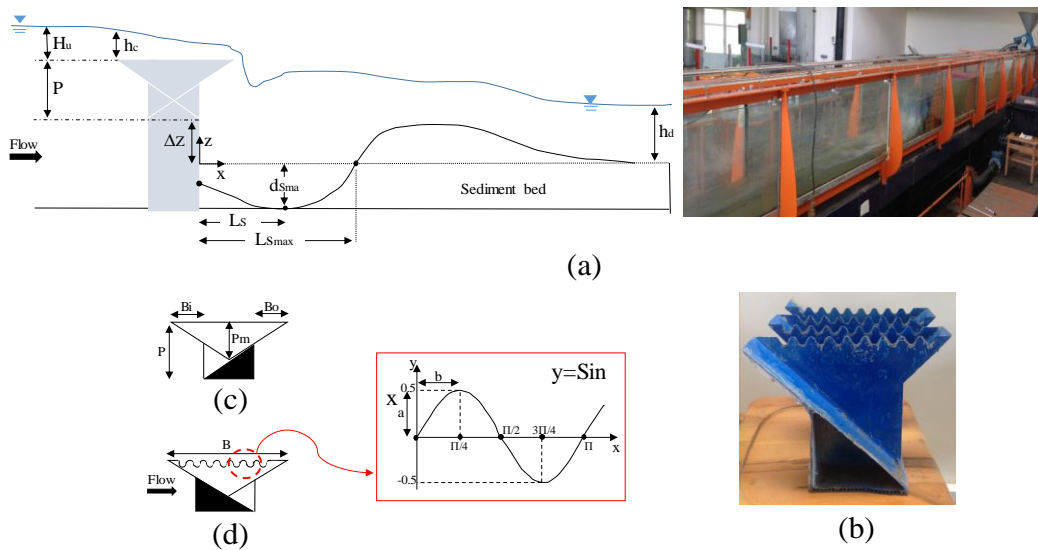
آبشستگی بستر فرسایشی در پایین دست سرریزهای کلید پیانویی وابسته به فراسنجه‌های هیدرولیکی و هندسی زیادی برابر رابطه (۱) می‌باشد. لازم به یادآوری است؛ در این پژوهش از روش پای- باکینگهام برای انجام تحلیل ابعادی استفاده شد.

$$f \left( \frac{d_s, L_s, SF, V_c, P, h_c, h_d, T_s, B, B_i, B_o}{W, W_i, W_o, a, b, g, \rho_w, \rho_s, \mu, S_i, S_o, d_{50}} \right) = 0 \quad (1)$$

در اینجا؛  $L_s, d_s$  به ترتیب؛ بیشینه عمق و طول گودال آبشستگی، SF فراسنجه شکل سرریز کلید پیانویی،  $V_c$  سرعت بحرانی جریان روی تاج بالادست،  $P$  ارتفاع سرریز،  $h_c$  عمق بحرانی جریان روی تاج بالادست،  $h_d$  عمق پای- آب،  $T_s$  ضخامت دیوار،  $B$  طول تاج جانبی،  $W$  عرض سرریز، افزون بر این؛  $a$  و  $b$  مشخصه‌های هندسی تاج زیگزگی، زیرنویس  $i$  برای کلید ورودی و زیرنویس  $o$  برای کلید خروجی مشخص شده است.  $g$  شتاب گرانش،  $\rho_w$  و  $\mu$  به ترتیب چگالی و لزوجت یا گرانروی (Viscosity) پویایی (دینامیکی) آب،  $\rho_s$  چگالی رسوب،  $S_o, S_i$  به ترتیب شیب کلیدهای ورودی و خروجی،  $d_{50}$  قطر میانگین رسوب می‌باشند.

گفتنی است که با انجام تحلیل ابعادی و همچنین، بدلیل ثابت بودن برخی فراسنجه‌های جریان و هندسه سرریز در کل آزمایش‌ها، رابطه (۱) به صورت زیر خلاصه و به شکل رابطه (۲) نمایان می‌شود:

$$f \left( \frac{V_c}{\sqrt{gh_c}}, \frac{\mu}{\rho_w h_c V_c}, \frac{h_d}{P}, \frac{d_{50}}{P}, \frac{d_s}{h_c}, \frac{L_s}{h_c}, \frac{h_c}{P}, \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}, SF \right) = 0 \quad (2)$$



**Fig. 1** View of the (a) flume and schematic of the geometric characteristics of the hole scour. (b) Type A piano key weir model (c) Inlet key - standard crest form. (d) Outlet key with Geometric characteristics of zigzag (sinusoidal) crest.  
 شکل ۱ نمایی از (a) آبراهه و نمای کلی از ویژگی‌های هندسی گودال آبشستگی. (b) مدل سرریز کلید پیانویی تیپ A (c) کلید ورودی - شکل تاج استاندارد. (d) کلید خروجی به همراه ویژگی‌های هندسی تاج زیگزاگی (سینوسی)

**جدول ۱** ویژگی‌های هندسی سرریز کلید پیانویی تیپ A با دو شکل تاج استاندارد و زیگزاگی (سینوسی) بر حسب سانتی‌متر

**Table 1** Geometric characteristics of Type A piano key weir with two standard and zigzag (sinusoidal) crest forms

Parameter	$W$	$W_i$	$W_o$	$W_u$	$T_s$	$B$	$B_i$	$B_o$	$P$	$a$	$b$	$L$
Value(cm)	30	7.5	7.5	15.2	0.1	32.5	7.5	10	15	0.5	0.75	158

تیپ A، تراز عمق پای آب، بیشینه به میزان  $0.48$  کمتر از تراز آب در سرآب را به عنوان شرایط جریان آزاد معرفی کردند. بنابراین؛ شرایط جریان آزاد با در نظر گرفتن  $h_d$  در بازه  $0.145 \leq h_u \leq 0.5$  (متر) توسط دریچه خوابان در پایین دست کانال، تنظیم شد.

همچنین، فراسنجه‌های هندسی گودال آبشستگی نیز بصورت:  $d_{SF}$  عمق آبشستگی نزدیک پی سرریز در  $X = 0$ ،  $d_{Smax}$  بیشینه عمق گودال آبشستگی در موقعیت مکانی  $X_s$ ،  $L_{Smax}$  بیشینه طول گودال آبشستگی در  $Z = 0$ ،  $V_s$  حجم گودال آبشستگی تعریف شده است.

مدل‌سازی فیزیکی سرریزها با دو شکل از نیمرخ تاج سرریز کلید پیانویی استاندارد (تیپ A) و تاج زیگزاگی (سینوسی) با نسبت‌های  $W_i/W_o = 1/2$  و  $P/W_u = 1/33$  معیار گزارش شده توسط Machiels (2012) طراحی شد و در کنار مدل سرریز لبه تیز خطی با ارتفاع ثابت و برابر، برای

بنابر این معیار محدوده عمق نسبی همه آزمایش‌ها در بازه  $(1 \leq H_u/P \leq 0.2)$  در نظر گرفته شد.

در شکل ۱ نمای کلی از فراسنجه‌های هندسی سرریز کلید پیانویی و گودال آبشستگی نشان داده شده است.

برابر شکل و جدول شماره ۱ نشانه‌های استاندارد در ویژگی‌های هندسی سرریز کلید پیانویی همگی بر حسب سانتی‌متر شامل؛  $L$  طول سرریز،  $W_u$  عرض یک چرخه (سیکل)،  $P$  ارتفاع سرریز،  $P_m$  ارتفاع مشخصه سرریز،  $B$  طول جانبی کلید،  $a$  و  $b$  مشخصه‌های هندسی تاج زیگزاگی،  $T_s$  ضخامت دیوار،  $W$  عرض سرریز، افزون بر این؛ زیر نویس  $i$  برای کلید ورودی و زیر نویس  $o$  برای کلید خروجی مشخص شده است.  $h_c$  عمق بحرانی روی تاج سرریزها،  $H_u$  عمق آب بالای تاج در مخزن بالادست

$(0.152 \leq H_u \leq 0.3)$  (متر) و  $h_d$  نیز عمق پای آب در پایین دست را نشان می‌دهد. (Dabbling and Tullis, 2012) با بررسی جزئیات آزمایش در مدل سرریز کلید پیانویی

طوری که در طول تاج‌های جانبی، بیشینه ۹ تکرار از زیگزاگ سینوسی کامل به صورت نامتقارن مدل‌سازی شد (شکل ۱-د).

ضخامت لایه رسوب‌های کف آبراهه با دو دانه‌بندی غیریکنواخت و غیرچسبیده، بنابر نتایج آزمایش شاهد، ۰/۴ متر و در طول ۲ متر در نظر گرفته شد. ویژگی‌های هندسی ذرات رسوبی به صورت  $d_{50}$  قطر میانگین رسوب،  $\varphi$  زاویه اصطکاک ایستایی رسوب و  $\delta_g$  انحراف معیار استاندارد رسوب در جدول ۲ ارائه شده است.

انجام آزمایش‌ها استفاده شده است. سرریزها با ورق فلزی، از جنس گالوانیزه با ضخامت یک میلی‌متر ساخته شده‌اند. گفتنی است؛ مدل‌های سرریز کلید پیانویی با شمار ۲/۵ چرخه مدل‌سازی شد (شکل ۱-ب).

در معرفی ویژگی‌های هندسی یک سرریز کلید پیانویی تیپ A، عرض یک چرخه ( $W_u$ ) به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود:

$$W_u = W_i + W_o + 2T_s \quad (5)$$

در مدل دوم شکل تاج زیگزاگی سرریز کلید پیانویی، به صورت سینوسی و با دامنه ۱ سانتی‌متر طراحی شد. به

جدول ۲ ویژگی‌های هندسی رسوب‌ها

Table 2 Geometric characteristics of sediments

Bed Material	Sediment Sizes (mm)	Specific Grav	Soil friction ang	Standard deviation	dimensionless ratio
	D10 D50 D90		$\varphi$	$\delta_g = (d_{90}/d_{10})^{0.5}$	d50/p d90/p
1	0.8 1 2.3	2.61	39	1.69	0.006 0.015
2	2.6 3.2 5.1	2.65	45	1.40	0.021 0.034

مشاهده شد که با گذشت ۲۸۰ دقیقه از لحظه آغاز، روند اثربخشی ویژگی‌های هیدرولیکی جریان بر ابعاد گودال آبشستگی ناچیز شد. بنابراین، برای صرف‌جویی در زمان، از آن پس همه آزمایش‌ها در مدت زمان ۲۸۰ دقیقه انجام شدند. که با نتایج بررسی‌های پیشین در مورد آبشستگی همخوانی دارد (Zolghadr et al., 2018).

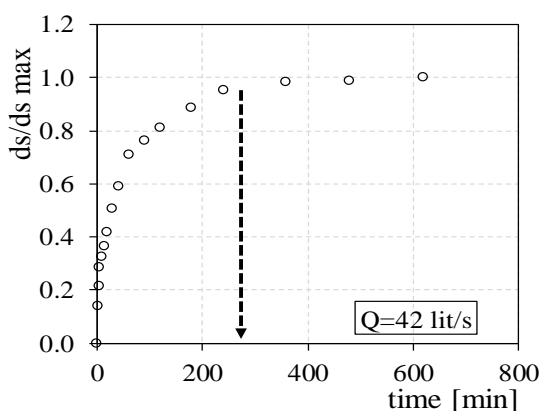


Fig. 2 Investigating the temporal development of scour

شکل ۲ بررسی توسعه زمانی آبشستگی

به جهت کاهش خطا در اندازه‌گیری میزان دبی جریان ورودی از دبی‌سنج الکترومغناطیسی (MID) با دقت ۰/۰۵ ± لیتر بر ثانیه و برای عمق جریان روی تاج سرریز و الگوی آبشستگی رو بستر فرسایشی کف آبراهه، از عمق‌سنج مکانیکی با دقت ۰/۱ ± میلی‌متر استفاده شده است.

مرحله‌های انجام آزمایش‌ها به این صورت است که پس از عبور دبی تخلیه مجاز از روی سرریز، دریچه پای‌آب با توجه به شرایط آستانه حرکت ذرات برای تشکیل جریان آب زلال در بستر رسوبی در بازه‌ی کمتر از  $(u/u_c = 0.9)$  تنظیم شد. در اینجا؛  $u$  معرف سرعت میانگین جریان و  $u_c$  سرعت بحرانی می‌باشد. لازم به یادآوری است؛ میزان سرعت میانگین و سرعت بحرانی جریان در راستای ایجاد شرایط آستانه حرکت رسوب‌ها، در هر آزمایش توسط رابطه پیوستگی و نمودار (دیگرام) شیلدز محاسبه شد.

برابر معیار (Kummar et al., 1999) زمانی که عمق گودال آبشستگی پس از گذشت ۳ ساعت، کمتر از ۱ میلی‌متر تغییر کند، پایداری پویایی (استاتیکی) در هندسه گودال رخ داده است. از این‌رو؛ با انجام آزمایش شاهد ۱۱ ساعته در مدل کلید پیانویی استاندارد با  $h/P = 0.84$ ، برابر شکل ۲

با توجه به جریان عبوری از روی سرریز در حین انجام آزمایش‌ها، به نظر می‌رسد دو دسته گردابه چرخشی در گودال آبشستگی پایین‌دست سرریز به وجود آمده است، که یکی در درون گودال آبشستگی و دیگری در فاصله کمی از سطح آب، جریان دارند. به احتمال زیاد اثر متقابل جت جریان خروجی در برخورد با بستر رسوبی و جریان ریزشی از کلیدهای ورودی سرریز، عامل اصلی پیدایش این دو دسته گردابه می‌باشند (شکل ۴).

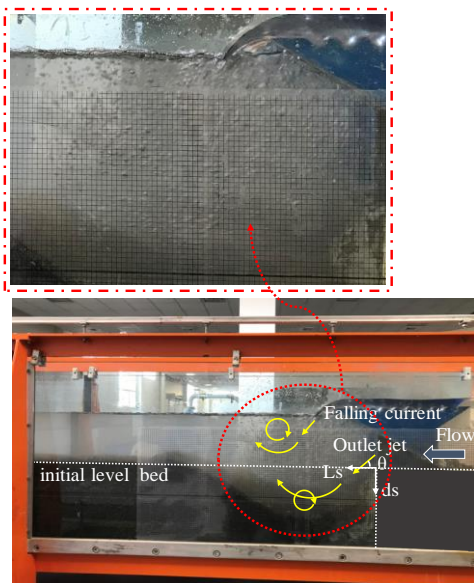


Fig. 4 Flow pattern in the inlet and outlet keys of the A-type piano key weir

شکل ۴ الگوی جریان در کلیدهای ورودی و خروجی سرریز A کلید پیانویی تیپ

شکل ۵-a تفاوت نیمرخ آبشستگی پایین‌دست سه مدل سرریز کلید پیانویی استاندارد، تاج زیگزاگی و لبه تیز خطی را در دبی ۴۲ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد. به روشنی مشخص است که سرریز کلید پیانویی به دلیل تخلیه جریان بیشتر از کلیدهای خروجی و به تبع آن افزایش توان فرسایشی رو به جلو جت‌های خروجی، ابعاد هندسی گودال فرسایشی با میزان عمق بیشینه‌ای کمتر و طولی بیشتر رخ داده است. شکل ۵-b نشان می‌دهد که بیشینه عمق گودال آبشستگی با کلید پیانویی شدن سرریز لبه تیز خطی به طور تقریبی ۳۱ درصد کاهش یافته است. همچنین با زیگزاگی شدن تاج جانبی سرریز کلید پیانویی تیپ A این میزان به ۴۳ درصد مدل سرریز لبه تیز خطی استاندارد کاهش یافته است.

پس از دستیابی به شرایط پایدار در فرسایش و رسوب‌گذاری، نیمرخ هندسی ابعاد آبشستگی (بیشینه عمق و طول آبشستگی) در محدوده گودال، متناسب با بستر رسوبی اولیه که بواسطه مختصات دهی (X,Y) مش بندی شده بود، اندازه‌گیری شد. در نهایت داده‌های گردآوری شده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

در این پژوهش در کل ۲۲ آزمایش بر روی سرریز کلید پیانویی تیپ A با دو مدل نیمرخ تاج استاندارد و زیگزاگی و یک مدل سرریز لبه تیز خطی انجام شد (جدول ۳).

جدول ۳ محدوده تغییرپذیری ویژگی‌های هیدرولیکی آزمایش‌ها

Table 3 Range of changes in hydraulic characteristics of experiments

Type-A Piano Key Weirs with Zigzag Lateral Crest	Sharp Crested Weir	Parameter
2-2.65	1.45-1.77	$Fr_{d50}$
0.2-0.6	0.2-1	$\frac{h_c}{P}$
0.53-1	0.33-1	$\frac{h_d}{P}$

### ۳- نتایج و بحث

شکل ۳ نشان‌دهنده نیمرخ بستر رسوبی در مرحله‌های توسعه زمانی آبشستگی در مدل شاهد کلید پیانویی استاندارد می‌باشد.

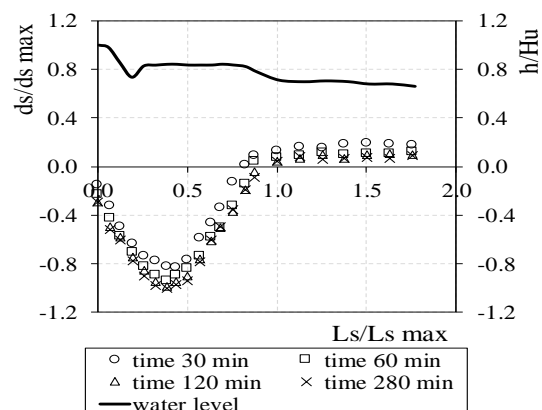


Fig. 3 Changes in the sedimentary bed downstream of the piano key weir

شکل ۳ تغییرپذیری‌های بستر رسوبی در پایین‌دست سرریز کلید پیانویی



۷۳ درصد بیشتر از آزمایش با کمینه عمق نسبی  $0.4 = h_c/P$  می‌باشد، برابر بررسی‌های (Machiels et al. 2013). تاثیر فراسنجه قطر میانگین رسوب نیز بر بیشینه عمق و طول آبستگي موثر برآورد شده است. شکل ۶-d, b برای  $h_c/P = 0.56$  و  $h_d/P = 0.67$  به وضوح نشان دهنده این است که بیشینه عمق آبستگي رسوبات ریزدانه نسبت به رسوب‌های درشت‌دانه ۶۸ درصد بیشتر می‌باشند. به طوری که در عمق‌های بحرانی بیشتر، گودال آبستگي بزرگتری به ویژه برای رسوبات ریزدانه رخ داده است. در انتها؛ آزمایشی با بیشینه عمق نسبی بحرانی، برای مدل سرریز کلید پیانویی زیگزاگ برابر شکل ۶-d, c نشان داده شد که در عمق‌های بیشتری برای تراز پای آب، عمق و به تبع آن طول گودال آبستگي کمتر رخ خواهد داد. به طوری که برای ارتفاع متفاوت جریان ریزشی از کلیدهای ورودی (تفاوت در حدفاصل بین تراز آب روی سرریز و تراز پای آب)، عمق و طول آبستگي در  $h_d/P = 0.33$ ، افزایش ۹۰ درصدی را نسبت به  $h_d/P = 1$  نشان داده است.

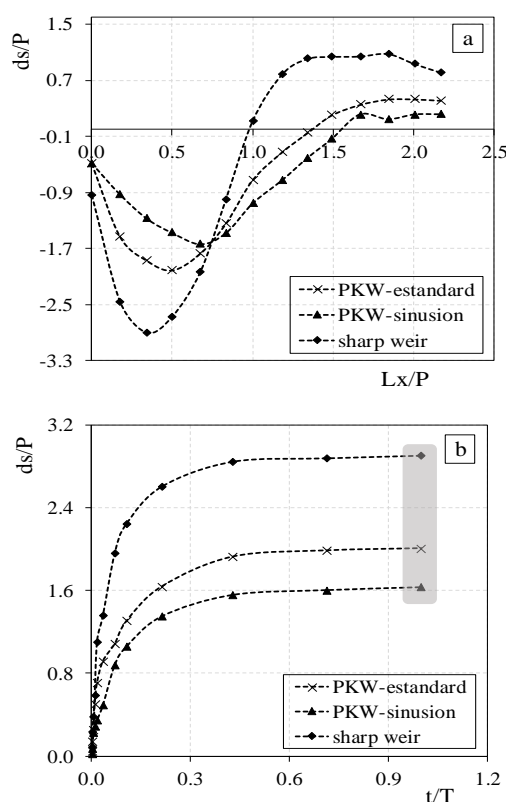
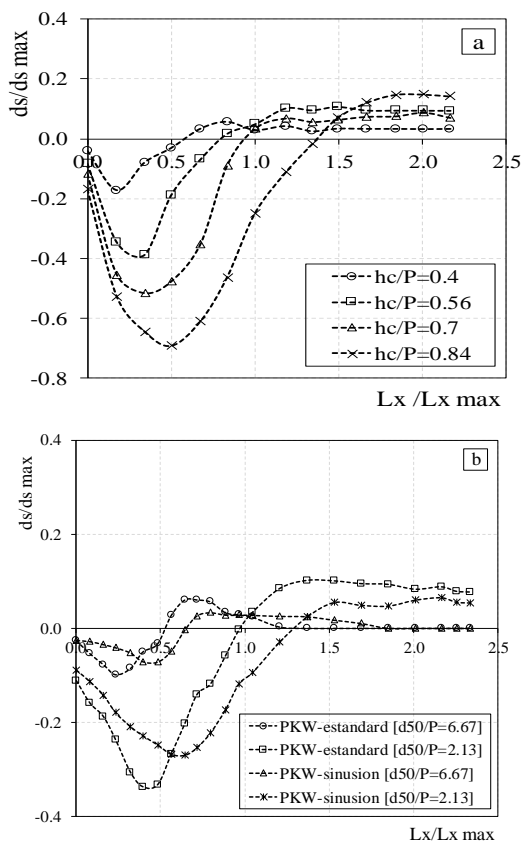


Fig. 5 a) Final scouring profile. b) Maximum relative instantaneous scour depth downstream of three weirs models (standard piano key and zigzag crest and linear sharp crest)

شکل ۵ a) نیمرخ تعادل آبستگي. b) بیشینه عمق نسبی لحظه‌ای آبستگي در پایین دست سه مدل سرریز کلید پیانویی استاندارد و تاج زیگزاگی و لبه تیز خطی) در عمق نسبی بحرانی

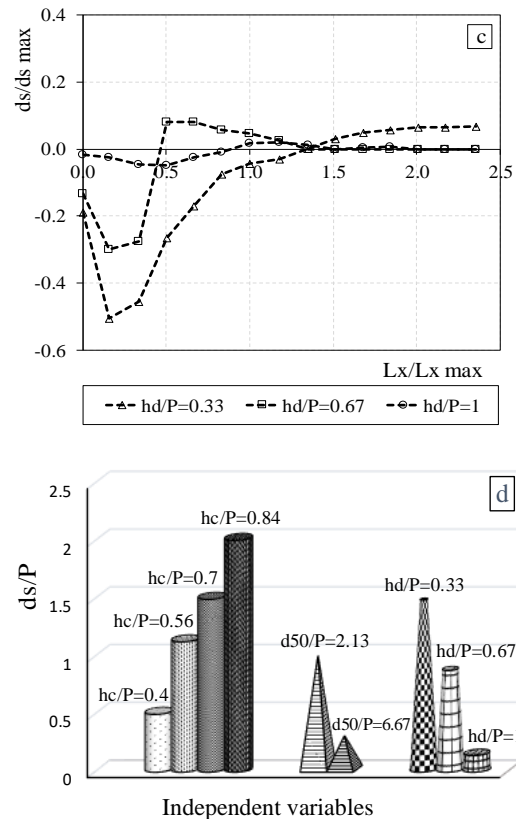
در شکل ۶ نیمرخ‌های طولی بستر متأثر از آبستگي، در شرایط بررسی تاثیر متغیرهای موثر بر الگوی فرسایش در پایین دست سرریز کلید پیانویی برای نمونه آورده شده است. همه‌ی فراسنجه‌های دیگر در مقایسه‌ی انجام شده، ثابت فرض شدند.

شکل ۶-d, a برای مدل کلید پیانویی با تاج استاندارد نشان می‌دهد که تغییرپذیری‌های نسبی افزایش عمق بحرانی روی تاج سرریز، تاثیر چشمگیری بر فرسایش بستر دارد. به طوری که بیشینه عمق آبستگي متأثر از افزایش عمق بحرانی، بر هندسه گودال، خط‌الراس و انتقال رسوب روی بستر اولیه موثر می‌باشد و در شرایط بیشینه عمق نسبی بحرانی  $h_c/P = 0.84$ ، میزان‌های بیشینه عمق آبستگي

با افزایش عدد فرود ذره، برای هر سه مدل، به دور از ساختار هندسی سرریز، توان فرسایشی جریان در عمق و طول افزایش یافته و در نهایت ابعاد گودال تعادلی آبشستگی را گسترش می‌دهد، برابر گزارش (Noseda et al., 2019). از این‌رو؛ گودال آبشستگی کشیده‌تر ولی با میزان عمق آبشستگی کمتری برای سرریز کلیدپیانویی نسبت به سرریز لبه تیز خطی رخ خواهد داد. این در حالی است که مقایسه بین مدل سرریز کلیدپیانویی با تاج استاندارد و زیگزگی در بازه عدد فرود ذره  $Fr_{d50} = 2/7 - 2/1$ ، عمق گودال کوچکتر و طول آبشستگی بزرگتری را برای مدل زیگزگی نشان می‌دهد. برای درک بهتر این مسئله می‌توان اشاره کرد که با زیگزگی شدن تاج جانبی، دبی جریان ریزشی از کلیدهای ورودی، کاهش و دبی جت از کلیدهای خروجی افزایش می‌یابد، و به تبع آن، با افزایش توان فرسایش روبه جلو جریان، به طور میانگین عمق و طول گودال آبشستگی به ترتیب، ۱۰ درصد کاهش و ۲۲ درصد افزایش می‌یابد.

شکل ۸ نشان دهنده مقایسه‌ای بین میزان‌های بیشینه عمق و طول آبشستگی در سرریز کلیدپیانویی با تاج جانبی استاندارد و زیگزگی (سینوسی) برای دانه‌بندی متفاوت رسوب می‌باشد. میزان‌های بیشینه عمق آبشستگی در مدل تاج زیگزگی، در شرایط دبی ورودی یکسان به طور میانگین ۱۲ درصد نسبت به مدل تاج استاندارد، کاهش یافته است. از سوی دیگر نشان داده شد که در تاج جانبی زیگزگی، میزان طول آبشستگی‌ها با افزایش ۱۵ درصدی رخ داده است. همخوانی با نتایج (Kumar and Zulfequar, 2020). در مروری بر منبع‌ها نشان داده شد که برای برآورد میزان بیشینه عمق گودال آبشستگی در پایین‌دست یک سازه کنترل، رابطه‌های زیادی ارائه شده است، که می‌توان با نتایج این پژوهش مقایسه شود (شکل ۹). رابطه (۶) تا (۸) به صورت استدلالی، میزان بیشینه عمق گودال آبشستگی را در پایین‌دست سرریز کلید پیانویی پیش‌بینی می‌کنند. (Stein and Julien, 1994) رابطه‌ای برای پیش‌بینی بیشینه عمق آبشستگی در پایین‌دست جت‌های ریزشی از تاج یک سرریز آزاد ارائه دادند:

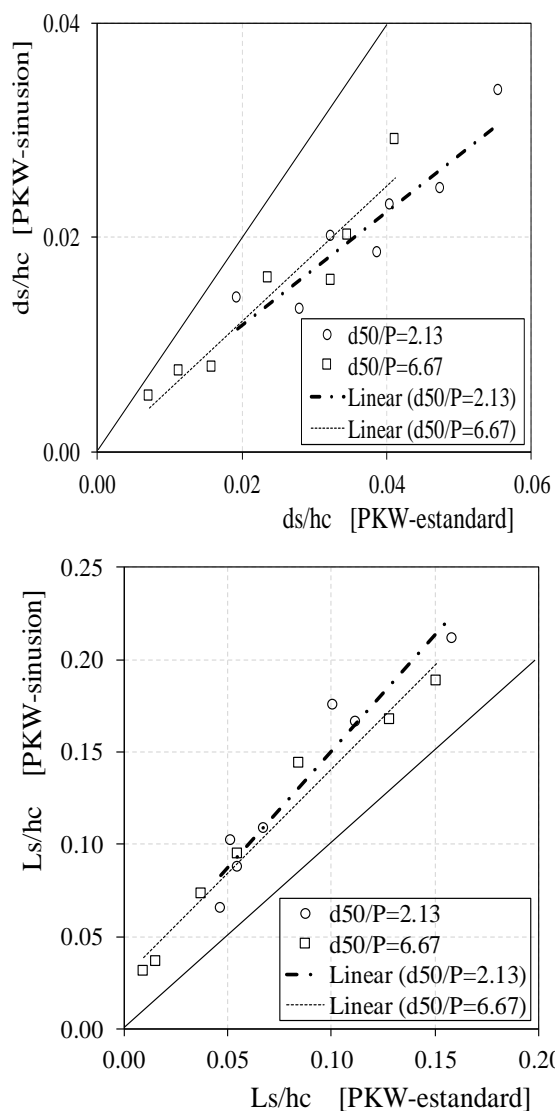
$$d_{s \max} = \frac{C_d^2 C_f \rho v_j^2 t_j}{\tau_c} \sin \gamma_j \quad (6)$$



**Fig. 6** Impact of parameters a) discharge, b) Medium diameter of sediments, c) tail water depth on the scour profile, d) Maximum relative scour depths due to independent variables

شکل ۶ تاثیر فراسنجه‌های (a) عمق نسبی بحرانی (دبی)، (b) قطر نسبی رسوب‌ها، (c) عمق نسبی پای آب بر نیمرخ آبشستگی، (d) مقایسه بیشینه عمق‌های نسبی آبشستگی در اثر متغیرهای مستقل تاثیرگذار.

شکل ۷ بیشینه عمق و طول آبشستگی را برای سه مدل سرریز در مقابل عدد فرود بی بعد ذره نشان می‌دهد. به ازای تغییرپذیری سرریز لبه تیز خطی به کلیدپیانویی، در میزان‌های عدد فرود ذره تفاوت محسوسی مشاهده می‌شود. به طوری که میزان عدد فرود ذره در آزمایش‌های سرریز لبه تیز خطی در بازه  $Fr_{d50} = 1/4 - 1/8$  و در سرریز کلید پیانویی در بازه  $Fr_{d50} = 2/1 - 2/7$  رخ داده است. با توجه به رابطه ۳ به نظر می‌رسد دلیل این اختلاف، ناشی از تفاوت در ماهیت فیزیکی سرریزها و به تبع آن تغییرپذیری فراسنجه‌های هیدرولیکی جریان (کاهش عمق آب روی تاج و همچنین تشدید سرعت روبه جلو جریان در سرریزهای کلید پیانویی نسبت به سرریز لبه تیز خطی) می‌باشد.

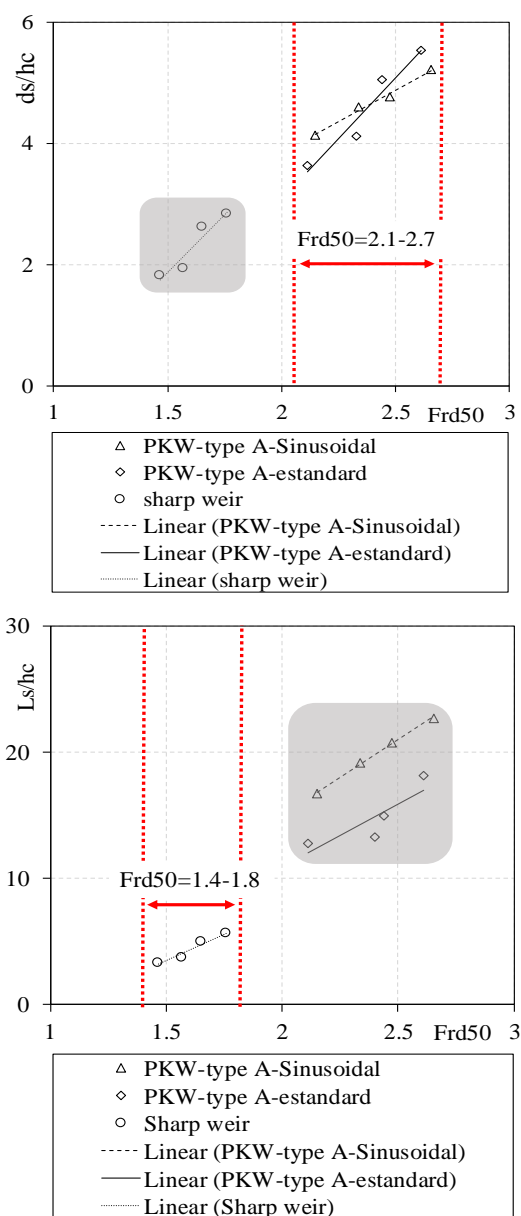


**Fig. 8** Comparison of relative values of maximum depth and length scour for different sedimentation grains  
**شکل ۸** مقایسه میزان نسبی بیشینه عمق و طول آبشستگی برای دانه بندی متفاوت رسوب

$$d_{s \max} = -0.38t_j \sin(\gamma_j + 22.5^\circ) Fr_{d50} \quad (7)$$

در اینجا؛ عدد فرود ذره  $Fr_{d50} = v_j / (d_{90} g')^{0.5}$  همچنین (Justrich et al., 2016) برای پیش بینی بیشینه عمق آبشستگی در پایین دست سرریزهای کلید پیاپویی، معادله تجربی زیر را پیشنهاد کرد:

$$d_{s \max} = 0.42 d_{50} \left( \frac{h_c}{d_{50}} \right)^{1.7} \left( \frac{\Delta H}{h_d} \right)^{0.3} \quad (8)$$



**Fig. 7** The effect of  $Fr_{d50}$  particle froude number on the relative depth and maximum length of the scour hole  
**شکل ۷** تاثیر عدد فرود ذره  $Fr_{d50}$  بر میزان نسبی بیشینه عمق و طول گودال آبشستگی

در اینجا؛  $C_d$  و  $C_f$  به ترتیب معرف ضریب دبی و ضریب اصطکاک،  $v_j = (2g\Delta h)^{0.5}$  سرعت تقریبی جت در عمق پای آب با تراز آب متفاوت  $\Delta h = H_u + P + \Delta z - h_d$ ،  $t_j = Q / (\pi W_o v_j)$  ضخامت جت ریزشی،  $\Delta z$  حداقل فاصله بین تراز بستر رسوبی و پی سرریز،  $\tau_c$  تنش برشی بحرانی و  $\gamma_j = (B + B_o) / P$  زاویه جت ریزشی می باشد. در این راستا؛ (Pagliara et al. 2006) رابطه زیر را پیشنهاد کردند:

گودال فرسایشی، عمق نهایی آبشستگی با کاهش ۱۵ درصدی نسبت به مدل استاندارد رخ داده است. ✓ در میزان‌های بیشینه عمق نسبی بحرانی  $h_c/P$  و تراز پای آب  $h_d/P$  نسبت به میزان‌های کمینه‌ای، میزان بیشینه عمق آبشستگی به ترتیب ۷۳ درصد افزایش و ۹۰ درصد کاهش می‌یابد. همچنین، مشاهده شد که میزان‌های آبشستگی در رسوب‌های ریزدانه ۶۸ درصد بیشتر از رسوب‌های درشت‌دانه رخ داده است. ✓ روند انتقال رسوب در گودال و پشته رسوبی با افزایش عدد فرود ذره، افزایشی است. در بازه عدد فرود ذره  $Fr_{d50} = 2/2 - 1/7$  به طور میانگین عمق و طول گودال آبشستگی به ترتیب با ۱۰ درصد کاهش و ۲۲ درصد افزایش برآورد شده است.

### ۵- فهرست نشانه

#### نشانه‌های انگلیسی:

$B$	طول هر کلید (m)
$B_i$	طول کلید ورودی (m)
$B_o$	طول کلید خروجی (m)
$W$	عرض آبراهه (m)
$W_u$	عرض یک چرخه (m)
$W_i$	عرض کلید ورودی (m)
$W_o$	عرض کلید خروجی (m)
$P$	ارتفاع سرریز (m)
$P_m$	ارتفاع مشخصه سرریز (m)
$H_u$	عمق آب روی تاج سرریز (m)
$L$	طول موثر تاج (m)
$T_s$	ضخامت تاج سرریز (m)
$V_{mean}$	سرعت میانگین جریان ( $m.s^{-1}$ )
$ds_{max}$	بیشینه عمق آبشستگی (m)
$Ls_{max}$	بیشینه طول آبشستگی (m)
$Sin$	شیب کف کلید ورودی
$Sout$	شیب کف کلید خروجی
$Q_{pkw, w}$	دبی سرریز کلید پیانویی و سرریز لبه تیز خطی ( $m^3.s^{-1}$ )
$g$	شتاب ثقل گرانش ( $m.s^{-2}$ )

در اینجا؛  $h_c$  عمق بحرانی،  $\Delta H$  تفاوت تراز آب بین مخزن و پای آب. نتایج آزمایشگاهی این پژوهش گویای همخوانی بیشتر با نتایج Justrich et al., (2016) می‌باشد. در شکل ۹ مشاهده می‌شود، میزان عمق آبشستگی پیش‌بینی شده رابطه (۸) در دبی‌های بالاتر همخوانی بیشتری با نتایج آزمایشگاهی این بررسی داشته است. لازم به یادآوری است؛ تفاوت در دیگر نتایج می‌تواند به علت شرایط متفاوت آزمایش‌ها باشد. تفاوت شرایط آزمایش می‌تواند شامل؛ دبی، عرض کانال، قطر میانگین رسوب و ... باشد.

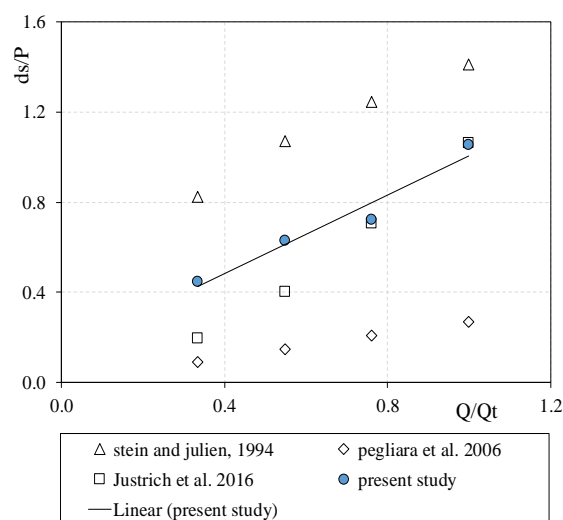


Fig. 9 Comparison of maximum depths of scour hole of the present study with other researchers  
 شکل ۹ مقایسه بیشینه عمق‌های گودال آبشستگی این بررسی با دیگر محققان

### ۴- نتیجه گیری

این بررسی به ارزیابی آبشستگی ناشی از آبشار آزاد کلید ورودی و جت ناشی از کلید خروجی سرریز کلید پیانویی تیپ A و تاثیر زیگزاگی شدن تاج جانبی آن در بستر فرسایش‌پذیر پایین دست پرداخته است. به طور خلاصه به نتایج بدست آمده زیر می‌توان اشاره کرد:

✓ بیشینه عمق گودال آبشستگی با کلید پیانویی شدن سرریز لبه تیز خطی به طور تقریبی ۳۱ درصد کاهش یافته است. همچنین با زیگزاگی شدن تاج جانبی سرریز کلید پیانویی تیپ A علی‌به‌رغم افزایش ۱۲ درصدی طول

Khanh, M.H.T. (2013). The Piano Key Weirs: 15 years of Research and Development—Prospect. Labyrinth and piano key weirs II, 3.

Kumar, B., and Ahmad, Z. (2020). Experimental study on scour downstream of a piano key weir with nose.

Kummar, V., Ranga Raju, K.G., and Vittal, N. (1999). Reduction of local scour around bridge piers using slot and collar. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 125(12), 1302–1305.

Leitz, A. (2016). Sedimenttransport bei Labyrinth-Wehren. Bachelor thesis, Institut, für Hydromechanik, Karlsruhe Institute of Technology KIT, and Bundesanstalt für Wasserbau BAW.

Machiels, O. (2012). Experimental study of the hydraulic behaviour of Piano Key Weirs. PhD diss., Université de Liège, Belgium.

Machiels, O., Erpicum, S., Archambeau, P., Dewals, B. and Piroton, M. (2013). Parapet wall effect on piano key weir efficiency. Journal of irrigation and drainage engineering. 139(6), 506-511.

Moradi, S., Shahsavari, h., Arfa, A., and Esmaili, K. (2020). Hydraulic Type-A Piano Key Weirs with Zigzag Lateral Crest. Journal of Ferdowsi Civil Engineering, 33(1), 1-16.

Novak, P. and Cabelka, J. (1981). Models in hydraulic engineering: Physical principles and design applications (Vol. 4). Pitman Publishing.

Nosedá, M., Stojnic, I., Pfister, M. and Schleiss, A.J. (2019). Upstream erosion and sediment passage at piano key weirs. Journal of Hydraulic Engineering, 145(8), 04019029.

Pagliara, S., Hager, W.H. and Minor, H.E. (2006). Hydraulics of plane plunge pool scour. Journal of Hydraulic Engineering, 132(5), 450-461.

Palermo, M., Crookston, B., and Pagliara, S. (2020). Analysis of Equilibrium Morphologies Downstream of a PK Weir Structure. In World Environmental and Water Resources Congress 2020: Hydraulics, Waterways, and Water Distribution Systems Analysis (pp. 43-51). Reston, VA: American Society of Civil Engineers.

Rajaei, A., Esmaeili Varaki, M. and Shafei Sabet, B. (2018). Experimental investigation on local scour at the downstream of grade control

$Cd$	ضریب دبی سرریز کلید پیانویی و سرریز لبه تیز خطی
$Fr$	عدد فرود جریان
$Fr_{d50}$	عدد فرود ذره رسوب
$Re$	عدد رینولدز
	<b>نشانه‌های یونانی:</b>
$\rho$	چگالی ( $kg.m^{-3}$ )
$\mu$	گرانروی پویایی ( $kg.m^{-1}.s^{-1}$ )
$\sigma$	کشش سطحی ( $kg.m^{-1}.s^{-2}$ )
$\varphi$	زاویه اصطکاک ایستایی رسوب (درجه)
$\delta_g$	انحراف معیار استاندارد رسوب
	<b>زیرنویس:</b>
$i, o$	ویژگی کلیدهای ورودی و خروجی

## ۶-منبع‌ها

Anderson, R.M. and Tullis, B.P. (2012). Piano key weir hydraulics and labyrinth weir comparison. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 139(3), 246-253.

Bhuiyan, F., Hey, R.D. and Wormleaton, P.R. (2007). Hydraulic evaluation of W-weir for river restoration. Journal of Hydraulic Engineering. 133(6), 596-609.

Dabling, M.R., and Tullis, B.P. (2012). Piano key weir submergence in channel applications. Journal of Hydraulic Engineering, 138(7), 661-666.

Elnikhely, E.A., and Fathy, I. (2020). Prediction of scour downstream of triangular labyrinth weirs. Alexandria Engineering Journal, 59(2), 1037-1047.

Gebhardt, M., Herbst, J., Merkel, J. and Belzner, F. (2019). Sedimentation at labyrinth weirs—an experimental study of the self-cleaning process. Journal of Hydraulic Research. 57(4), 579-590.

Herbst, J. (2016).Hydraulische Untersuchungen a Labyrinth-Wehrenzur Durchgängigkeit von Treibgut, Geschiebe und Eis. Master thesis, Karlsruhe Institute of Technology, and Bundesanstalt für Wasserbau.

Jüstrich, S., Pfister, M. and Schleiss, A.J. (2016). Mobile riverbed scour downstream of a piano key weir. Journal of Hydraulic Engineering. 142(11), 04016043.

structures with labyrinth planform. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*. 1-11.

Ribeiro, L.M., Bieri, M., Boillat, J.L., Schleiss, A.J., Singhal, G. and Sharma, N. (2012). Discharge capacity of piano key weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*. 138(2), 199-203.

Sarathi, P., Faruque, M.A.A. and Balachandar, R. (2008). Influence of tailwater depth, sediment size and densimetric Froude number on scour by submerged square wall jets. *Journal of Hydraulic Research*. 46(2), 158-175.

Sharma, N. and Tiwari, H. (2013). Experimental study on vertical velocity and submergence depth near Piano Key weir. *Labyrinth and piano key weirs II*, 93-100.

Stein, O.R. and Julien, P.Y. (1994). Sediment concentration below free overfall. *Journal of hydraulic Engineering*. 120(9), 1043-1059.

Zolghadr, M. (2018). Effect of Six-Legged Elements installation arrangement on bed topography around Wing-Wall Abutments. 47-57.