

# Experimental Study on the Effects of Discharge and Tailwater Depth on Bed Topography Downstream of a Trapezoidal Piano Key Weir

Aram Ghafouri <sup>1</sup>, Masoud Ghodsian <sup>2\*</sup>, Chonoor Abdi Chooplou <sup>3</sup>

1- M.Sc. Student, Water and Hydraulic Structures Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

2- Prof., Faculty of Civil and Environmental Engineering and Water Engineering Research Center, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

3- Ph.D. Candidate, Water and Hydraulic Structures Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

\* [ghods@modares.ac.ir](mailto:ghods@modares.ac.ir)

Received: 26 June 2020, Accepted: 28 August 2020      J. Hydraul. Homepage: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

## Abstract

**Introduction:** Non-linear Piano Key Weirs (PKW) enjoy not only a higher discharge but also a relatively simple and economic structure compared to linear weirs. Other advantages of the PKWs include the fact that they increase the discharge per unit width over the weir up to  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ , the discharge over this type of weir is at least four times that over ordinary (linear) weirs, it increases the capacity of the reservoirs, and it is cost effective with lower maintenance expenses. This type of weir is utilized mainly with the aim of increasing its capacity over the available spillways and also as controlling structures on newly constructed spillways. Despite the research studies conducted in this regard, the scour downstream of the trapezoidal Piano key weirs has not yet been investigated, and there has been no comprehensive information on the properties of the scour profile downstream of these weirs. Hence, given the several advantages of the Piano key weir and lack of a comprehensive research on the amount of scour downstream of this type of weir, the need for investigation on the scour downstream of this weir under different hydraulic conditions is obvious.

**Methodology:** Experiments were conducted in a rectangular channel with a width of 75 cm, metal bed, glass walls and a height of 80 cm in the hydraulic laboratory of water and hydraulic structural engineering of Tarbiat Modares University, Tehran. Water flow was supplied from an underground storage tank using a pump with a maximum discharge of 85 Lit/sec. A valve installed at the end of the channel was used to adjust the flow depth in the channel. The PKW was set up and sealed at a distance of 1 m from the channel end. All experiments on the weir were conducted under free flow conditions. A layer of uniform sediments with an average diameter of 1.64 mm, a geometric standard deviation of 1.24, a height of 42.5 cm, and a length of 2 m was placed downstream of the weir.

The type-A trapezoidal piano key weir made of thermoplastic (common PLA Filament) with a thickness of 1.2 cm was utilized in this study. Weirs with 6 keys (3 inlet keys and 3 outlet keys), a width of 75 cm (the same as the channel), and the crest length (B) and a height (P) of respectively 50 and 20 cm were used. The experiments were conducted with three values of

discharge 0.03, 0.04 and 0.05  $m^3/s$  and five tailwater depths varied from 0.08 to 0.18 m.

**Results and discussion:** It is observed during the experiment that with the impact of the outlet flow from the weir with a downstream bed, the scour began and the process of erosion and sedimentation continuously occurred with development of the scour hole. Observations indicated that during the erosion stage, after the impact of the water jet with the bed and upon its dispersion, the scour of the bed material begins immediately and considerably. The material washed away from the bed is mostly transported downstream along with the flow and is deposited there. Generation of the scour hole entails circulation of flow inside the scour hole. Also, a portion of circulating flow inside the hole is deviated upward. A large body of sediments washed from the bed is transported downstream with the flow leaving the hole and a part of it rotates with the circulating flow inside the hole. A part of these sediments along with the circulating flow is deposited inside the scour hole and the other part is transported downstream by the flow leaving the scour hole. After the scour hole is generated, the jet entering the hole is divided into two parts at the deepest point of the scour hole. Such division is observable from the movements of sediments inside the hole so that some of the sediments are separated and transported downstream, leaving the scour hole, and the remaining sediments move and reside in the same zone as the circulating flow due to the backflow towards the weir foot. A sedimentary ridge is created downstream of the hole as a result of the eroded sediments concentration which have left the scour hole. As the scour hole is deepened, the sedimentary ridge is also enlarged. This trend continues until the flow is able to carry the particles out of the scour hole. These variations mainly occurred at the initial 20% of the test duration.

It is also observable that the scour hole downstream of the weir is not symmetrical with the longitudinal axis of the channel, which is due to the effect of inlet and outlet keys on the direction of the outlet flow over the weir. However, the overall scour pattern is nearly the same under different conditions. Variations in the maximum scour depth downstream of the weir are approximately 5.8 to 8.8 times the water depth over the weir. The location of the maximum scour depth is also a function of discharge and tailwater depth, which was measured at a distance of 15 to 27 cm from the weir foot.

**Conclusions:** This study has investigated the dimensions of the scour hole as well as variations of bed topography downstream of a trapezoidal piano key weir. It was found that with a 112% increase in the tailwater depth under a constant discharge of 30 L/s, the maximum scour depth is reduced by 37%. Increasing the discharge results in an increase in the dimensions of the scour hole, in such a way that a 66.6% increase in discharge with a constant tailwater depth has increased the scour hole by 18.5%. With an increase of the tailwater depth, the development of the scour hole downstream of the piano key weir is reduced. The minimum scour hole development in downstream direction was measured in tests with a discharge of 30 L/s and tailwater depths of 15 and 17 cm. 112 and 89.5% increase in the tailwater depth for discharge values of 30 and 40 L/s reduces the area of the scour hole by approximately 46 and 25% respectively.

**Keywords:** Experimental study, bed topography variations, scour, piano key weir, flow discharge, tailwater depth.



© 2020 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/>)

# مطالعه آزمایشگاهی تأثیر دبی جریان و عمق پایاب بر روی عوارض بستر پایین دست سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای

آرام غفوری<sup>۱</sup>، مسعود قدسیان<sup>۲\*</sup>، چنور عبدی چوپلو<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۲- استاد هیدرولیک، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست و پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۳- دانشجوی دکتری مهندسی عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

\* ghods@modares.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۰۶، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۰۷، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

**چکیده:** در این تحقیق آبشستگی پایین دست سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای شکل به صورت آزمایشگاهی بررسی و ارزیابی شد. آزمایش‌ها در آبراه‌ای به طول ۱۰ متر، عرض ۷۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۸۰ سانتی‌متر برای دبی و عمق پایاب‌های مختلف انجام شد. نتایج نشان داد که بیشینه عمق آبشستگی و گستره حفره‌ی آبشستگی، با افزایش ۶۶/۷ درصدی دبی جریان در عمق پایاب ثابت ۱۳/۵ سانتی‌متر، حدود ۲۹/۵ و ۱۸/۵ درصد افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش عمق پایاب، طول حفره‌ی آبشستگی کاسته شده است. افزایش ۱۱۲، ۸۹/۵ و ۶۳/۵ درصدی عمق پایاب در دبی‌های ۳۰، ۴۰ و ۵۰ لیتر بر ثانیه، به ترتیب کاهش ۳۷، ۳۵ و ۲۰/۳ درصدی عمق آبشستگی را به دنبال دارد. در آزمایش‌ها با دبی ۵۰ لیتر بر ثانیه، با افزایش ۶۳/۵ درصدی عمق پایاب، ۷/۳ درصد از گستره حفره‌ی آبشستگی کاسته می‌شود. همچنین معادله‌ای برای نیمرخ طولی حفره آبشستگی به دست آمد.

**کلیدواژگان:** بررسی آزمایشگاهی، تغییرپذیری‌های عوارض بستر، آبشستگی، سرریز کلید پیانویی، دبی جریان، عمق پایاب.

## ۱- مقدمه

به طور کلی سرریزهای کلیدپیانویی را می‌توان به چهار نوع

زیر که در شکل (۱) نشان داده شده تقسیم کرد:

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

اجزای یک سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای نوع A که در شکل (۲) نشان داده شده عبارت‌اند از: P ارتفاع سرریز، W عرض کل سرریز،  $W_i$  عرض کلید ورودی،  $W_o$  عرض کلید خروجی،  $S_i$  و  $S_o$  به ترتیب شیب کف کلیدهای ورودی و خروجی، B طول دیوار جانبی سرریز،  $B_i$  و  $B_o$  به ترتیب طول بیرون زدگی‌های ورودی و خروجی سرریز می‌باشند. محققانی همچون Lempérière and Ouamane

سرریز کلیدپیانویی، شکل جدیدی از سرریزهای غیرخطی هست که افزون بر ظرفیت آگذری بیشتری که نسبت به سرریزهای ساده دارند، از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه می‌باشند (Mehboudi et al., 2014). برتری‌های دیگر سرریزهای کلیدپیانویی عبارت‌اند از: افزایش دبی بر واحد عرض عبوری از سرریز تا ۱۰۰ مترمکعب بر ثانیه بر متر، افزایش دست‌کم ۴ برابری دبی نسبت به سرریزهای خطی و هزینه نگهداری کمتر (Machiels, 2012). این ویژگی‌های سرریزهای کلیدپیانویی، آنها را به سازه‌های کارآمدی تبدیل کرده است. این نوع سرریز به‌طور عمده با هدف افزایش ظرفیت آگذری روی سرریزهای موجود و همچنین به عنوان سازه‌ی کنترلی در سرریزهای نوساز استفاده می‌شوند (Phillips and Leslighter, 2013; Laugier et al., 2013).

صورت گرفته است. (Ahmadi Dehrashid et al. (2016) به بررسی تأثیر دبی و عمق پایاب بر ابعاد حفره آبستگي پایین دست سرریز کلیدپیانویی مستطیلی پرداختند. نتایج تحقیقات آنان نشان داد که با افزایش عمق پایاب، بیشینه عمق آبستگي کاهش می یابد و افزایش دبی موجب افزایش ابعاد حفره آبستگي می شود. (Jüstrich et al. (2016) به بررسی آزمایشگاهی آبستگي در پایین دست سرریز کلید پیانویی مستطیلی شکل پرداختند. آنان تأثیر فراسنجه های مانند دانه بندی رسوب، دبی جریان، ارتفاع جت و عمق پایاب بر حفره آبستگي را بررسی کردند. نتایج تحقیقات آنان نشان داد که بیشینه عمق آبستگي به ویژگی های رسوب، دبی، اختلاف ارتفاع جریان در بالادست و پایین دست و عمق پایاب بستگی دارد. افزون بر این ابعاد هندسی حفره آبستگي، تابعی از بیشینه عمق حفره آبستگي هستند.

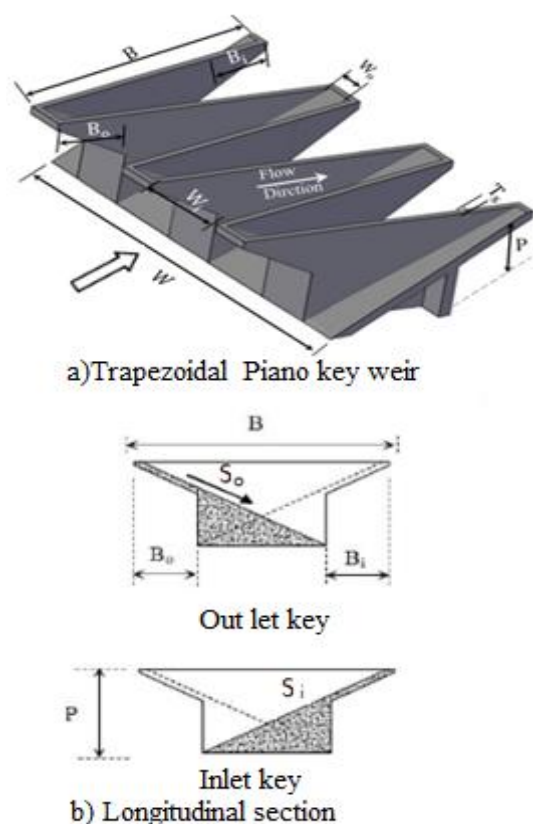


Fig. 2 Symbols and geometric dimensions of the Piano Key weir

شکل ۲ نشانه ها و ابعاد هندسی سرریز کلیدپیانویی

(Hien et al. (2006), Barcouda et al. (2006), (2003) Laugier et al. (2006), Ouamane and Lempérière (2006) (2011) و (2011) Machiels et al. (2011) هیدرولیک سرریزهای کلیدپیانویی را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که برای بارآبی کم، زیاد کردن شماره چرخه های سرریز باعث افزایش کارایی آن می شود. (Ouamane and Lempérière (2006), Barcouda et al. (2006) و Hien et al. (2006) (2006) در نتایج بررسی های خود نشان دادند اگر دهانه ورودی این نوع سرریز بزرگتر از دهانه خروجی آن در نظر گرفته شود، باعث افزایش دبی عبوری از سرریز می شود. (Machiels et al. (2012) با بررسی نیمرخ های سرعت، فشار، سطح آب و همچنین عدد فرود جریان، ارزیابی های روی سرریزهای کلیدپیانویی انجام دادند. (Machiels et al. (2014) با بررسی فراسنجه های جریان روی سرریزهای کلید پیانویی رابطه ای را برای تعیین دبی عبوری از این سرریزها ارائه دادند. (Khasraf and Baghdadi (2015) در نتایج بررسی های خود برتری های سرریزهای کلیدپیانویی را نسبت به سرریزهای خطی بیان کردند. (Safarzadeh and Noroozi (2016) با بررسی هیدرودینامیک سه بعدی سرریزهای کلیدپیانویی انحنادار در پلان نشان دادند که این نوع سرریز ضریب آبگذری بیشتری دارد.

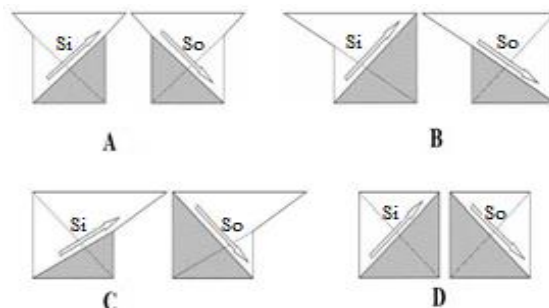


Fig. 1 Type of piano key weirs

شکل ۱ انواع سرریزهای کلیدپیانویی

بررسی منبع های موجود نشان می دهد که بیشتر تحقیقات انجام شده روی سرریزهای کلیدپیانویی، در زمینه هیدرولیک جریان عبوری از روی این سرریزها می باشد که به برخی از آنها در بالا اشاره شد. اما در زمینه آبستگي در پایین دست این سرریزها بررسی و ارزیابی های کم شماری

وسیله یک پمپ با بیشینه دبی ۸۵ لیتر بر ثانیه تامین می‌شد. نمایی از نقشه آبراهه آزمایشگاهی و محل سرریز کلیدپیانویی در شکل (۳) نمایش داده شده است. مخزنی به عرض ۲/۰۵ متر در بالادست از طریق یک تبدیل به آبراهه وصل شده است. تنظیم عمق جریان در آبراهه به وسیله دریچه تعبیه شده در انتهای آبراهه انجام می‌شد.

سرریز کلیدپیانویی مورد نظر در فاصله ۱ متری از انتهای تبدیل نصب و آب‌بندی آن انجام شد. همه‌ی آزمایش‌ها با سرریز در شرایط جریان آزاد انجام شد. برابر توصیه Raudkivi and Ettema (1983) برای جلوگیری از تشکیل رپل روی بستر رسوبی، قطر میانگین ذرات باید از  $0.7$  میلی‌متر بزرگتر باشد، همچنین، برابر توصیه Chiew and Melville (1987) برای حذف تأثیر غیر یکنواختی ذرات بر آبشستگی، لازم است که انحراف معیار هندسی ذرات کوچکتر از  $1/33$  باشد. با توجه به این موارد، ماسه از جنس سیلیس با قطر میانگین  $1/64$  میلی‌متر و ضریب انحراف  $1/24$  انتخاب و در لایه‌ای به ضخامت  $42/5$  سانتی‌متر و طول ۲ متر در پایین‌دست سرریز، برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد. تراز اولیه بستر رسوبی در همه‌ی آزمایش‌ها افقی بود. دستگاه مختصات و فراسنجه‌های هندسی آبشستگی در شکل (۴) نشان داده شده است.

در این شکل P ارتفاع سرریز، Pd ارتفاع تکیه‌گاه سرریز، ht عمق پایاب، hr و ds,m به ترتیب ارتفاع پشته‌ی رسوبی و عمق آبشستگی، H ارتفاع آب در بالادست سرریز، Hu هد کل در بالادست، Hd هد کل در پایین‌دست،  $Z_f$  عمق آبشستگی پای دیوار پایین‌دست سرریز،  $L_{su}$  و  $L_{sd}$  به ترتیب طول بالادست و پایین‌دست حفره‌ی آبشستگی،  $L_{ru}$  و  $L_{rd}$  به ترتیب طول بالادست و پایین‌دست پشته‌ی رسوبی و  $\alpha d$  و  $\alpha u$  به ترتیب شیب پایین‌دست و بالادست حفره‌ی آبشستگی است.

در این تحقیق سرریز کلیدپیانویی نوع A ذوزنقه‌ای شکل در پلان، از جنس ترموپلاستیک (فیلامنت رایج PLA) با ضخامت  $1/2$  سانتی‌متر استفاده شد. هر سرریز دارای ۶ کلید (۳ کلید ورودی و ۳ کلید خروجی) و عرض ۷۵ سانتی‌متر (هم عرض آبراهه)، طول جانبی سرریز (B) و ارتفاع خالص (P) به ترتیب ۵۰ و ۲۰ سانتی‌متر می‌باشد.

(Nosed et al. 2019) به بررسی آزمایشگاهی عبور رسوب و فرسایش بالادست در سرریز کلید پیانویی مستطیلی شکل پرداختند. Ghodsian et al. (2020) آبشستگی پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی مثلثی شکل را بررسی کردند. نتایج تحقیقات آنان نشان داد که با افزایش ۱۱۲ درصدی عمق پایاب، بیشینه عمق آبشستگی  $4/2$  درصد افزایش و با افزایش  $66/6$  درصد دبی، بیشینه عمق آبشستگی ۷۳ درصد افزایش یافته است.

با وجود بررسی‌های چندی که در این زمینه صورت گرفته، تاکنون آبشستگی پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی ذوزنقه‌ای شکل بررسی نشده و اطلاعاتی درباره‌ی ویژگی‌های نیمرخ آبشستگی پایین‌دست این سرریزها ارائه نشده است. به دلیل برتری‌های زیاد سرریز کلیدپیانویی و همچنین نبود بررسی‌ها و ارزیابی جامع درباره میزان آبشستگی پایین‌دست این نوع سرریز، لزوم تحقیق و ارزیابی روی آبشستگی پایین‌دست این نوع سرریز، در شرایط هیدرولیکی مختلف (تغییرپذیری‌های دبی و عمق پایاب) ضروری به نظر می‌رسد. در این تحقیق آزمایشگاهی، زمان تعادل و تغییرپذیری‌های زمانی عمق آبشستگی، تغییرپذیری‌های پستی و بلندی یا عوارض بستر، بیشینه عمق آبشستگی و موقعیت آن، نیمرخ‌های عرضی و طولی حفره‌ی آبشستگی، تغییرپذیری‌های شیب حفره‌ی آبشستگی، حجم و گستره حفره‌ی آبشستگی پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی ذوزنقه‌ای شکل در دبی‌های ۳۰، ۴۰ و ۵۰ لیتر بر ثانیه و عمق پایاب‌های مختلف (۸ الی ۱۸ سانتی‌متر) بررسی شد. با استفاده از نتایج این پژوهش می‌توان نیمرخ آبشستگی ناشی از این نوع سرریز را محاسبه کرد و در صورت نیاز تمهیدهایی برای کاهش عمق آبشستگی در پایین‌دست سرریز در نظر گرفت.

## ۲- مواد و روش‌ها

همه‌ی آزمایش‌های این پژوهش در یک آبراهه مستطیلی به عرض ۷۵ سانتی‌متر، با کف فلزی، دیواره‌های شیشه‌ای و ارتفاع ۸۰ سانتی‌متر واقع در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه تربیت مدرس تهران انجام شد. جریان آب از یک مخزن زیر زمینی به

و پنج عمق پایاب از ۰/۰۸ تا ۰/۱۸ متر انجام شد. در طول آزمایش عمق آبشستگی و نیمرخ بستر در دیواره سمت راست و سمت چپ آبراهه، با عکس برداری به وسیله دوربین اندازه گیری و ثبت می شد. در انتهای هر آزمایش با خاموش کردن پمپ آب، جریان آب به صورت تدریجی کاهش یافته و از آبراهه خارج و زهکشی آن صورت می گرفت. سپس عوارض کامل بستر برابر شبکه بندی نشان داده شده در شکل (۵)، با استفاده از دستگاه برداشت عوارض لیزری با دقت ۱ میلی متر اندازه شد. در این شکل X فاصله طولی از دیوار پایین دست سرریز و Y فاصله عرضی از دیوار سمت راست آبراهه است. فاصله نقطه های برداشت عوارض بستر در محدوده حفره ی آبشستگی ۳ سانتی متر و در پایین دست آن ۵ سانتی متر بود.

ویژگی های هندسی سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه ای در شکل (۲) و میزان های ابعاد هندسی آن ها در جدول (۱) ارائه شده است.

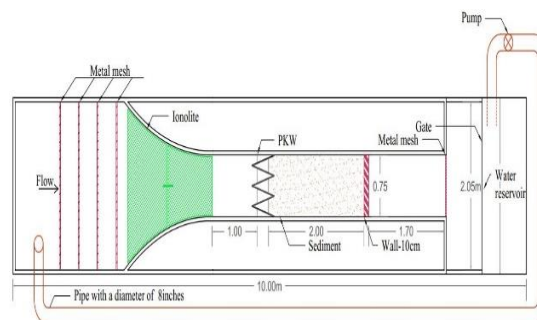


Fig. 3 Plan view of the laboratory channel

شکل ۳ نمایی از نقشه آبراهه آزمایشگاهی

جدول ۱ ویژگی های سرریز کلید پیانویی  
Table 1 Piano Key weir configurations

Parameters	Values
Total width of the weir, (W)	75 cm
Width of a cycle, (w)	25 cm
Width of the inlet key, (Wi)	17.5 cm
Width of the outlet key, (Wo)	5.1 cm
Sidewall thickness, (Ts)	1.2 cm
Laterl length of the weir, (B)	50 cm
Upstream overhang length, (Bo)	12.5 cm
Downstream overhang length, (Bi)	12.5 cm
Height of the PKW crest, (P)	20 cm
The height of the weir support, (Pd)	42.5 cm
Total Height of the weir, (P*=P+Pd)	62.5 cm
Number of key of the weir, (N)	3
Slope of the inlet key, (Si)	28°
Slope of the outlet key, (So)	28°
B/W	2
Wi/Wo	3.4
B/P	2.5
Bi/P	0.625
Bo/P	0.625

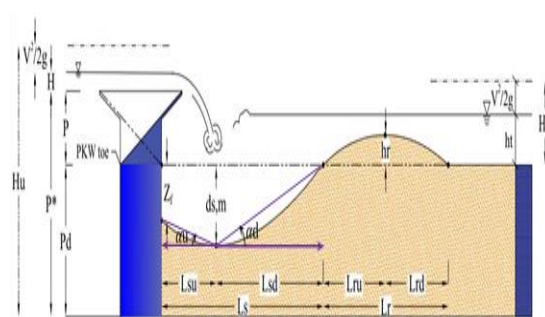


Fig. 4 General view of geometric and hydraulic parameters

شکل ۴ فراسنجه های هندسی و هیدرولیکی

به منظور تعیین مدت زمان مورد نیاز برای آزمایش ها، یک آزمایش طولانی مدت ۱۲ ساعته انجام شد. تغییر پذیری های زمانی عمق آبشستگی (ds) این آزمایش در شکل (۶) نشان

پیش از انجام هر آزمایش، رسوبها در کف آبراهه و پایین دست سرریز ریخته و سطح آن با دستگاه صاف کننده صاف و یک دست شد. در آغاز هر آزمایش، آب از مخزن تعبیه شده در زیر آبراهه وارد مخزن ورودی و پس از آن وارد آبراهه می شد. با تنظیم دبی و تنظیم عمق پایاب مورد نظر توسط دریچه پایین دست، آزمایش آغاز می شد. برای اندازه گیری عمق جریان در بالادست سرریز از عمق سنج دیجیتال با دقت ۰/۱ میلی متر استفاده شد. برای اندازه گیری میزان دبی جریان، از دبی سنج فراصوت (آلتراسونیک) مدل TFM3100-F1 استفاده شد که میزان دبی را با دقت ۰/۱ لیتر بر ثانیه اندازه گیری و از طریق کابل رابط به صفحه نمایشگر دبی سنج منتقل می کند. آزمایش ها با سه دبی ۰/۰۳، ۰/۰۴ و ۰/۰۵ متر مکعب بر ثانیه

جدول ۲ جزئیات آزمایش‌ها

Table 2 Details of experiments

Test No.	Test names	(Q) discharge (Lit/s)	(ht) Tailwater depth (cm)	(H) Water heigh on Weir Crest (cm)	(Hu) Total upstream height (cm)	(Hd) Total downstream height (cm)	(Fru) Upstream Froude number (-)	(Frd) Downstream Froude number (-)
1	Tra 30-8	30	8	3.5	0.66	7.51	0.02	0.62
2	Tra 30-11	30	11	3.5	0.66	9.51	0.02	0.44
3	Tra 30-13.5	30	13.5	3.4	0.66	11.01	0.02	0.35
4	Tra 30-15	30	15	3.4	0.66	13.50	0.02	0.26
5	Tra 30-17	30	17	3.3	0.66	16.00	0.02	0.20
6	Tra 40-9.5	40	9.5	4.4	0.67	8.52	0.03	0.69
7	Tra 40-12	40	12	4.4	0.67	12.01	0.03	0.41
8	Tra 40-13.5	40	13.5	4.3	0.67	13.51	0.03	0.34
9	Tra 40-16	40	16	4.3	0.67	15.01	0.03	0.30
10	Tra 40-18	40	18	4.2	0.67	17.01	0.03	0.24
11	Tra 50-11	50	11	5.3	0.68	10.02	0.04	0.67
12	Tra 50-12	50	12	5.3	0.68	12.02	0.04	0.51
13	Tra 50-13.5	50	13.5	5.2	0.68	13.51	0.04	0.43
14	Tra 50-16	50	16	5.2	0.68	16.01	0.04	0.33
15	Tra 50-18	50	18	5.1	0.68	17.01	0.04	0.30

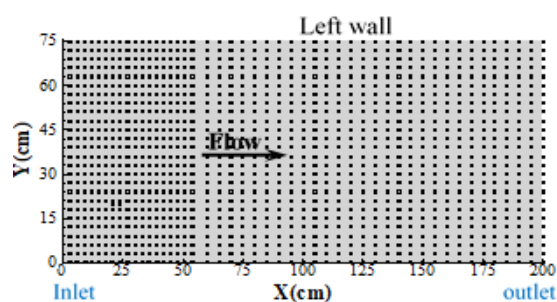


Fig. 5 Grid points for topography data  
شکل ۵ نمایشی از شبکه برداشت عوارض بستر

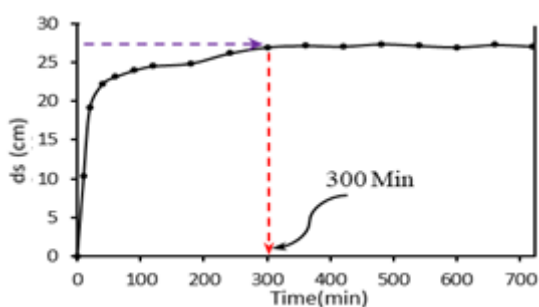


Fig. 6 Temporal evolution curve of the scour depth  
شکل ۶ منحنی توسعه زمانی عمق آبستنی

داده شده است. با توجه به این شکل روشن است که حفره‌ی آبستنی پس از حدود ۵ ساعت، برابر معیار Chiew (1992)، به تعادل رسیده است. لذا با انتخاب این زمان تعادل، آزمایش‌های بعدی برای مدت زمان ۵ ساعت انجام شد. ویژگی‌های آزمایش‌های انجام شده در جدول (۲) ارائه شده است. در ادامه متن نیز برای هر کدام از آزمایش‌ها از نام اختصاری نشان داده شده در جدول یاد شده استفاده می‌شود. همان‌طور که در این جدول مشخص است برای بیان شرایط آزمایش‌ها از نمادهای Tra، ht و Q استفاده شده است. به این صورت که نماد اول معرف نوع سرریز (Tra<sup>1</sup> سرریز دوزنقه‌ای) و عدد دوم معرف میزان دبی جریان (Q) بر حسب لیتر بر ثانیه است. عمق پایاب (ht) بر حسب سانتی‌متر با عدد آخری نمایش داده می‌شود. برای مثال نماد Tra 30-8، به معنی آزمایش با دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه و عمق پایاب ۸ سانتی‌متر است.

<sup>1</sup> Trapezoidal

## ۳- نتایج و بحث

با برخورد جریان خروجی از روی سرریز به بستر پایین دست، آبشستگی آغاز و با توسعه حفره‌ی آبشستگی، فرسایش و رسوبگذاری به طور پیوسته انجام می‌شود. در مدت زمان فرسایش، پس از برخورد جت خروجی از سرریز به بستر و پخش آن، آبشستگی سریع و قابل توجه مصالح بستر آغاز می‌شود. مصالح جدا شده از بستر، به همراه جریان به‌طور عمده به پایین‌دست منتقل شده و در آنجا ته‌نشین می‌شود. با تشکیل حفره‌ی آبشستگی، جریان چرخشی درون حفره شکل می‌گیرد. بخشی از جریان چرخشی درون حفره نیز به سمت بالادست منحرف و از آن خارج می‌شود. بخش زیادی از رسوب‌های جدا شده از بستر، به همراه جریان خروجی از حفره به پایین‌دست منتقل و بخشی از آن به همراه جریان چرخشی درون حفره به چرخش در می‌آید. بخشی از این رسوب‌ها همراه جریان چرخشی، درون حفره ته‌نشین شده و بخش دیگر آن توسط جریان خروجی از حفره، به پایین‌دست منتقل می‌شود. پس از تشکیل حفره‌ی آبشستگی، جت ورودی به حفره در عمیق‌ترین نقطه حفره‌ی آبشستگی به دو قسمت تقسیم می‌شود. این تقسیم شدن را می‌توان از نحوه حرکت رسوب‌ها درون حفره مشاهده کرد. به گونه‌ای که میزانی از رسوب‌ها جدا شده به سمت پایین‌دست حرکت کرده و از حفره خارج می‌شود و باقی‌مانده رسوب‌ها در جریان برگشتی به سمت بالادست و پاشنه‌ی سرریز جابجا شده و در یک ناحیه با جریان چرخشی قرار می‌گیرند. در پایین‌دست حفره، در نتیجه تجمع رسوب‌ها فرسایش یافته که از حفره خارج شده‌اند، پشته‌ی رسوبی تشکیل می‌شود. با عمیق‌تر شدن حفره‌ی آبشستگی، ابعاد پشته‌ی رسوبی نیز افزایش می‌یابد. این روند تا زمانی که جریان قادر به حمل ذرات از حفره‌ی آبشستگی باشد ادامه پیدا می‌کند. عمده این تغییرپذیری‌ها در حدود ۲۰ درصد اولیه از زمان آزمایش انجام می‌گرفت. با افزایش عمق آبشستگی انرژی جنبشی جت به تدریج کاهش می‌یابد. به همین دلیل در آغاز سرعت پیشروی آبشستگی افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد و در شرایطی که دیگر انرژی جنبشی جت قادر به جابجایی و حمل ذرات نباشد، آبشستگی به بیشترین میزان خود رسیده است.

نتایج نشان داد با افزایش عمق پایاب در دبی ثابت، ارتفاع پشته رسوبی نیز افزایش می‌یافت. زیرا افزایش عمق پایاب منجر به کاهش سرعت جریان و کاهش توان بالقوه حمل رسوب شده و در نتیجه با رسوبگذاری بیشتر منجر به افزایش ارتفاع پشته رسوبی در این حالت می‌شود. (شکل ۷) جریان درون حفره‌ی آبشستگی در پایین‌دست سرریز را نشان می‌دهد.

منحنی تغییرپذیری‌های زمانی عمق آبشستگی برای دبی‌ها و عمق‌های مختلف پایاب در شکل (۸) ارائه شده است. محور افقی این نمودارها زمان (t) بی بعد شده با زمان تعادل (te) و محور عمودی عمق آبشستگی ( $d_s$ ) بی بعد شده با ارتفاع آب روی تاج سرریز (H) می‌باشد در این شکل مشاهده می‌شود که قسمت اعظم آبشستگی در دقایق اولیه آزمایش رخ داده و پس از آن نرخ آبشستگی به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش عمق پایاب، عمق آبشستگی در پایین‌دست سرریز روند کاهشی دارد. زیرا افزایش عمق پایاب، کاهش ارتفاع ریزش جریان و در نتیجه کاهش سرعت جریان برخوردی به پایاب را به همراه دارد. در نتیجه از قدرت تخریبی جریان کاسته شده و عمق آبشستگی کاهش می‌یابد.

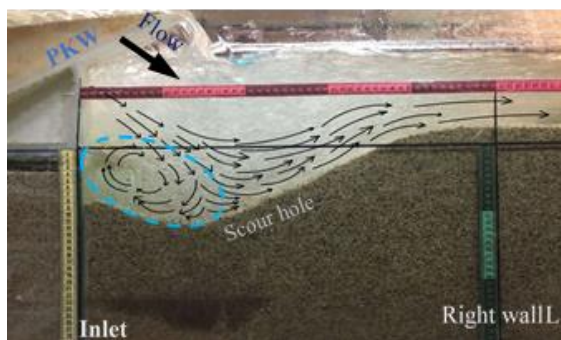
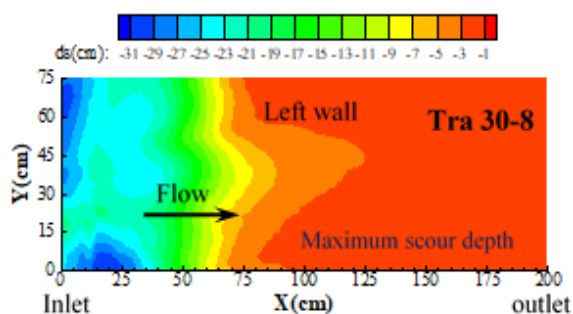


Fig. 7 Flow inside the scour hole

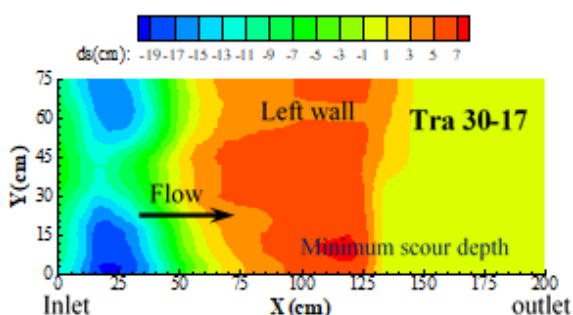
شکل ۷ جریان درون حفره‌ی آبشستگی

به منظور بررسی تغییرپذیری‌های عوارض بستر پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی در پایان زمان تعادل، شکل‌های (۹) تا (۱۱) مربوط به آزمایش‌هایی با بیشترین و کمترین تغییرپذیری‌های بستر ارائه شده است. روشن است که تغییرپذیری‌های ایجاد شده در بستر تابع میزان دبی و عمق پایاب است و بسته به عملکرد و شرایط هیدرولیکی جریان،





(a)



(b)

**Fig. 9** An instance of bed topography in tests with a discharge of 30 Lit/s in case of a) the maximum and b) the minimum topography variations

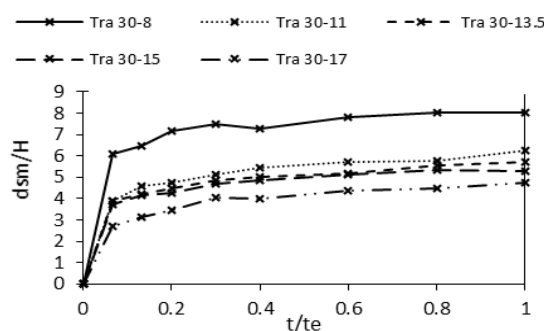
شکل ۹ نمونه‌ای از عوارض بستر در آزمایش‌های با دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه در حالت: (a) بیشترین و (b) کمترین تغییرپذیری‌های عوارض

تغییرپذیری‌های گسترده‌تر بستر در آزمایش با کمترین دبی و عمق پایاب استفاده شده در آزمایش Tra 30-8، در شکل (۹-الف) مشخص است. کم بودن عمق پایاب در این آزمایش باعث افزایش سرعت جت برخوردی به سطح بستر شده و در نتیجه تغییرپذیری‌های بیشتری در عوارض بستر، نسبت به آزمایش‌ها دیگر، را ایجاد کرده است. شکل (۹-ب) نشان می‌دهد که با افزایش عمق پایاب در آزمایش Tra 30-17، آبشستگی و تغییرپذیری‌های عوارض بستر کمتر شده است.

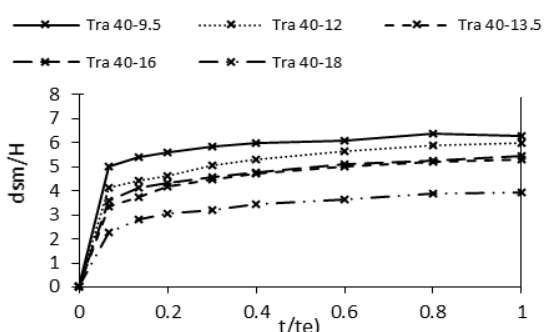
در شکل (۱۰) نشان داده شده است که در دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه، با افزایش عمق پایاب از ۹/۵ به ۱۸ سانتی‌متر، گستردگی حفره‌ی آبشستگی در پایین‌دست سرریز کاهش یافته است.

بیشترین و کمترین تغییرپذیری‌های عوارض بستر در پایین‌دست سرریز برای دبی ۵۰ لیتر بر ثانیه در شکل

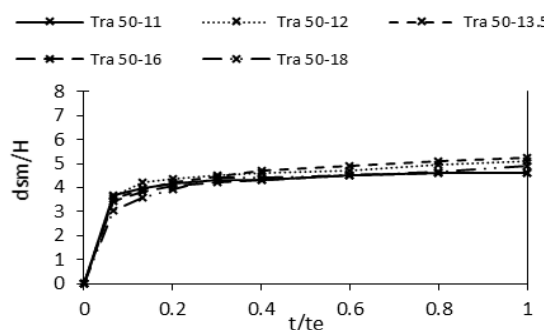
موقعیت عمق بیشینه و گستردگی این حفره‌ها در عرض و طول آبراهه متغیر است. همان‌طور که در شکل‌های (۹) و (۱۰) مشاهده می‌شود حفره‌ی آبشستگی، نسبت به محور طولی آبراهه تقارن ندارد که به دلیل اثرگذاری کلیدهای ورودی و خروجی روی جهت جریان خروجی از روی سرریز می‌باشد. البته می‌توان گفت الگوی کلی آبشستگی در شرایط مختلف تا حدودی همانند است.



(a)



(b)

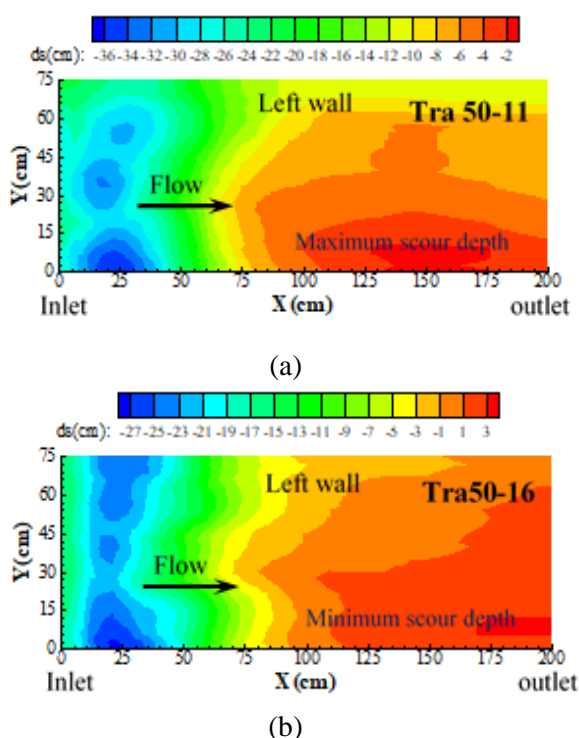


(c)

**Fig. 8** Temporal variations of the scour depth with discharge of (a) 30, (b) 40, and (c) 50 Lit/s

شکل ۸ تغییرپذیری‌های زمانی عمق آبشستگی با دبی: (a) ۳۰، (b) ۴۰ و (c) ۵۰ لیتر بر ثانیه

عمق آبستگي در پایین دست سرریز، در حدود ۵/۸ تا ۸/۸ برابر عمق آب روی سرریز می باشد. با توجه به این شکل روشن است که موقعیت رخداد بیشینه عمق آبستگي نیز تابع دبی و عمق پایاب است و در فاصله ی ۱۵ الی ۲۷ سانتی متری از پاشنه ی سرریز ایجاد شده است. همچنین کمترین و بیشترین میزان بیشینه عمق آبستگي مربوط به دو آزمایش Tra 30-17 و Tra 50-11 می باشد. شکل (۲۱-ب) نشان می دهد که کمترین فاصله ی بیشینه عمق آبستگي از دیواره سمت راست آبراهه، مربوط به آزمایش های Tra 40-9.5، Tra 40-12، Tra 40-13.5 و Tra 40-18 می باشد که در مجاورت دیواره آبراهه شکل گرفته است.

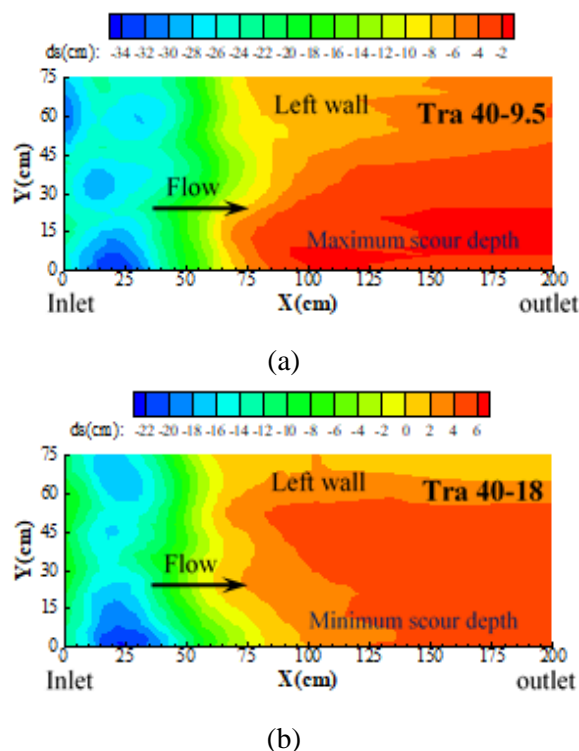


**Fig. 11** Typical bed topography in tests with a discharge of 50 Lit/s in case of a) the maximum, and b) the minimum topography variations

شکل ۱۱ نمونه ای از عوارض بستر در آزمایش با دبی ۵۰ لیتر بر ثانیه در حالت: الف) بیشترین و ب) کمترین تغییرپذیری های عوارض

در این شکل نیز مشاهده می شود که افزایش عمق پایاب در همه ی دبی ها موجب کاهش بیشینه عمق آبستگي می شود. به طوری که افزایش ۱۱۲، ۸۹/۵ و ۶۳/۵ درصدی عمق پایاب در دبی های ۳۰، ۴۰ و ۵۰ لیتر بر

(۱۱) نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشاهده می شود که در نزدیکی دیوار پایین دست سرریز آبستگي ایجاد شده است. علت آن را می توان جریان چرخشی ایجاد شده و وجود گردابه ها در این ناحیه (شکل ۷) دانست. ویژگی های حفره ایجاد شده در این ناحیه و موقعیت بیشینه عمق آبستگي، در عمق های مختلف پایاب متفاوت می باشد. به طوری که با افزایش ۴۵ درصدی عمق پایاب، عمق آبستگي چسبیده به سرریز حدود ۳۶ درصد کاهش و بیشینه عمق آبستگي حدود ۱۲/۵ درصد به پاشنه ی سرریز نزدیک می شود.

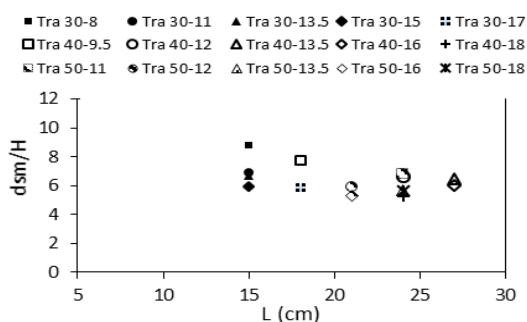


**Fig. 10** Typical bed topography in tests with a discharge of 40 Lit/s in case of a) the maximum and b) the minimum topography variations

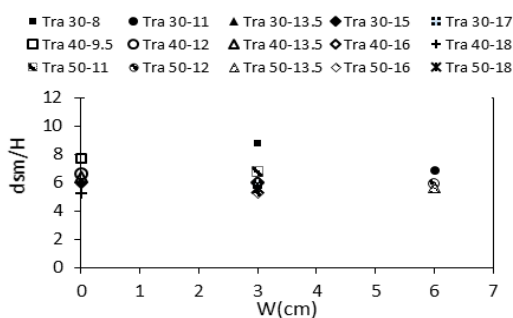
شکل ۱۰ نمونه ای از عوارض بستر در آزمایش با دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه در حالت: الف) بیشترین و ب) کمترین تغییرپذیری های عوارض

تأثیر دبی و عمق پایاب، بر موقعیت بیشینه عمق آبستگي در پایین دست سرریز کلیدپیانویی، در شکل (۱۲) نشان داده شده است. در این شکل L، فاصله از سرریز و ds، بیشینه عمق آبستگي است. با توجه به شکل (۱۲-الف) مشاهده می شود که تغییرپذیری های بیشینه

ج) قابل مشاهده می‌باشد، شکل نیمرخ عرضی در دبی ۵۰ لیتر بر ثانیه به تقریب یکسان است با این تفاوت که بیشینه آبشستگی در مجاورت دیواره سمت راست حدود ۱/۳ برابر آزمایش Tra 50-16 می‌باشد. همچنین در این آزمایش (Tra 50-16)، گستردگی حفره‌ی آبشستگی در جهت طول آبراهه نسبت به دیگر آزمایش‌ها کمتر بوده است و در نتیجه حجم مواد شسته شده کاهش یافته است.



(a)



(b)

**Fig. 12** Maximum scour depth and its position along the: a) length, and b) width of the channel

شکل ۱۲ بیشینه عمق آبشستگی و موقعیت آن در: الف) طول آبراهه و ب) عرض آبراهه

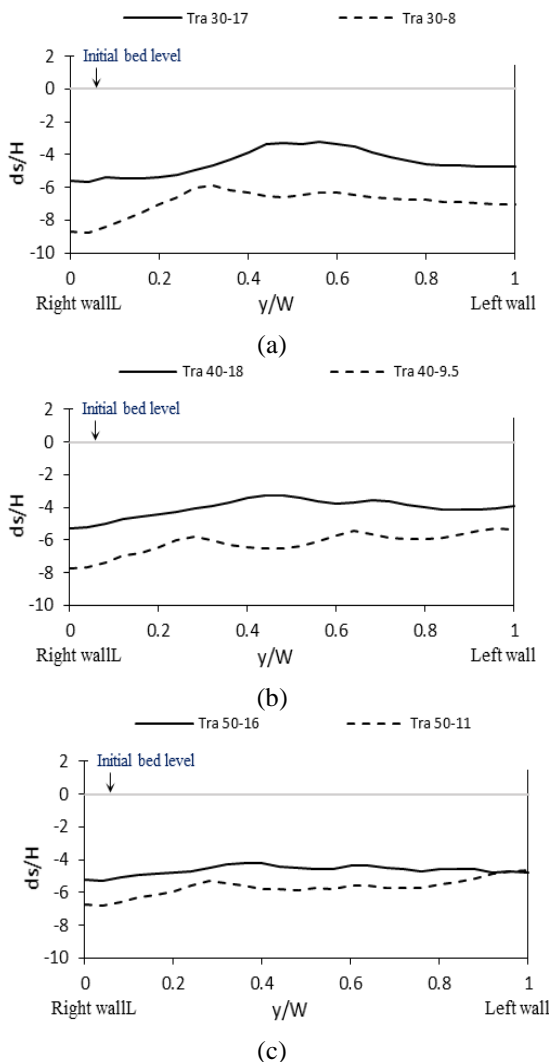
به دلیل تفاوت سرعت و انرژی جریان خروجی از کلیدهای ورودی و خروجی سرریز و در نتیجه تغییر زاویه برخورد جریان به پایاب، حفره‌ی آبشستگی با شیب‌های متفاوت در جهت‌های مختلف، گسترش یافته است. میزان‌های شیب‌های بالادست و پایین‌دست حفره‌ی آبشستگی در همه‌ی آزمایش‌ها در شکل (۱۵) نشان داده شده است.

در این شکل  $\alpha u$  و  $\alpha d$  به ترتیب معرف شیب بالادست و پایین‌دست حفره‌ی آبشستگی می‌باشند. این شکل نشان

ثانیه، به ترتیب کاهش ۳۷، ۳۵ و ۲۰/۳ درصدی عمق آبشستگی را به دنبال دارد. همچنین مشاهده شد در بیشتر آزمایش‌ها (مانند آزمایش‌های Tra 30-11، Tra 50-12 و Tra 50-13.5) بیشترین میزان آبشستگی در پایین‌دست کلیدهای خروجی (فاصله‌ی معادل ۶ سانتی‌متری از دیواره سمت راست) رخ داده است. برخورد و اندرکنش جریان‌های خروجی از کلیدهای ورودی و خروجی سرریز و جریان‌های عرضی ایجاد شده، باعث آشفته‌گی بیشتر جریان در محدوده کلیدهای خروجی شده، و با تاثیر پذیری از دبی و عمق پایاب، تغییرپذیری‌های موضعی آبشستگی را به همراه دارد. به‌منظور درک بهتر علل این تغییرپذیری‌های موضعی عمق آبشستگی، داده‌های برداشت میدان جریان مفید است که در آینده انجام شود.

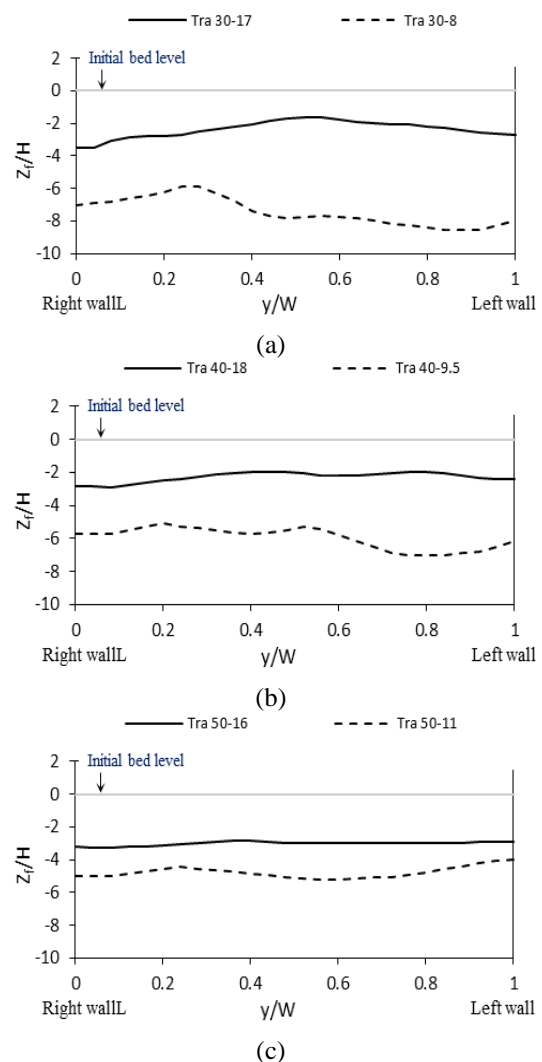
نمونه‌ای از نیمرخ‌های عرضی بستر در مجاورت پاشنه‌ی سرریز و در مقطع با بیشینه عمق آبشستگی در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) ارائه شده است. این شکل‌ها مربوط به آزمایش‌هایی با بیشترین و کمترین آبشستگی است. در اینجا محور افقی فاصله‌ی بی‌بعد شده از دیواره سمت راست و محور عمودی تراز بستر بی‌بعد شده با ارتفاع آب روی سرریز را نشان می‌دهد. شکل (۱۳) نشان می‌دهد که بیشترین کاهش تراز بستر در پاشنه سرریز، در همه‌ی دبی‌ها در حالت کمترین عمق پایاب (۸، ۹/۵ و ۱۱ سانتی‌متر) رخ داده است. زیرا در عمق پایاب کمتر، جریان با سرعت بیشتری به پایین دست برخورد می‌کند و در نتیجه در این حالت میزان آبشستگی و کاهش تراز بستر بیشتر است. همچنین در عمق پایاب کمتر، به علت آشفته‌گی بیشتر جریان، تغییرپذیری‌های عرضی بستر بیشتر است.

همان‌طور که در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود، نیمرخ عرضی بستر در مقطع با بیشینه عمق آبشستگی در میانه آبراهه دارای آبشستگی کمتری است و میزان آن حدود ۳/۳ برابر ارتفاع آب روی تاج سرریز می‌باشد. با افزایش دبی به ۴۰ لیتر بر ثانیه (شکل (۱۴-ب)) مشاهده می‌شود حفره‌ی آبشستگی پایین‌دست سرریز کلید پیانویی عمیق‌تر می‌شود، همان‌گونه که در شکل (۱۴-)



**Fig. 14** Typical bed cross section at the maximum scour depth with a discharge of a) 30, b) 40, and c) 50 Lit/s  
 شکل ۱۴ نمونه‌ای از نیمرخ عرضی بستر با بیشینه عمق آبستگي در دبی: (a) ۳۰، (b) ۴۰ و (c) ۵۰ لیتر بر ثانیه

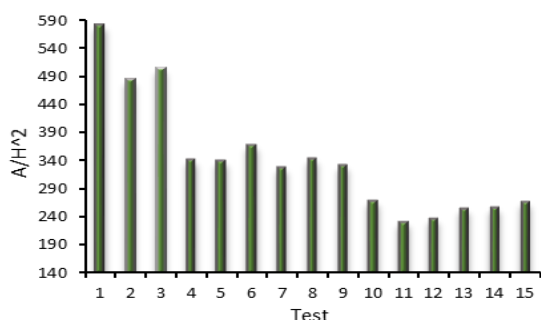
می‌دهد که میزان‌های شیب بالادست حفره‌ی آبستگي بین ۰/۳۱ تا ۰/۵۲ و میزان‌های شیب پایین‌دست حفره‌ی آبستگي بین ۰/۳۵ تا ۰/۴۶ است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش عمق پایاب، شیب پایین‌دست حفره‌ی آبستگي افزایش می‌یابد به طوری که با افزایش ۱۱۲ درصدی عمق پایاب در دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه، شیب پایین‌دست حفره‌ی آبستگي ۱۹۰/۵ درصد افزایش و با افزایش ۸۹ و ۶۴ درصدی عمق پایاب، در دبی‌های ۴۰ و ۵۰ لیتر بر ثانیه، شیب پایین‌دست حفره‌ی آبستگي به ترتیب ۲۰۰/۱۶ و ۱۰۹ درصد افزایش یافته است. با توجه به شکل (۱۵) مشاهده می‌شود که کمترین شیب بالادست و پایین‌دست حفره‌ی آبستگي به ترتیب در آزمایش‌های



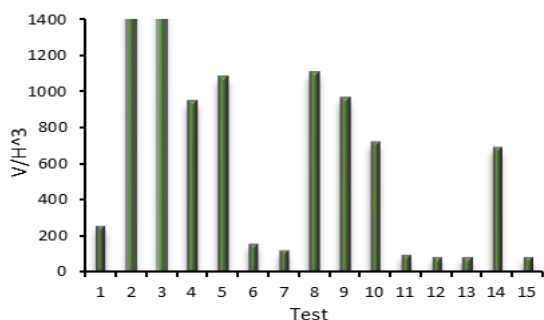
**Fig. 13** Typical lateral bed profile in the vicinity of the weir foot with a discharge of a) 30, b) 40, and c) 50 Lit/s  
 شکل ۱۳ نمونه‌ای از نیمرخ عرضی بستر در مجاورت پاشنه‌ی سرریز در دبی: (a) ۳۰، (b) ۴۰ و (c) ۵۰ لیتر بر ثانیه

در Tra 50-16 و Tra 40-16 و بیشترین میزان آن در آزمایش‌های Tra 30-15 و Tra 30-13 ایجاد شده است. حفره‌ی آبستگي در جهت محور طولی آبراهه تقارن ندارند. این حفره از دو بخش تشکیل شده است بخش اول به دلیل وجود انرژی جنبشی ناشی از جت به پایین‌دست کشیده شده و بخش دوم به علت جریان‌های برگشتی به سمت بالادست کشیده شده است. بخش اول، به دلیل قدرت جت جریان، قسمت اعظم حفره آبستگي را در بر می‌گیرد. میزان‌های طول حفره‌ی آبستگي در پایین‌دست (Lsd) و در بالادست (LSu) حفره آبستگي در شرایط هیدرولیکی مختلف جریان، در شکل (۱۶) مقایسه شده است. با توجه به این شکل روشن است که در همه‌ی آزمایش‌ها حفره‌ی

Tra 30-8 و Tra 40-9.5 بیشینه و برابر ۵۸۲ و ۳۶۸ برابر توان دوم ارتفاع آب روی تاج سرریز می‌باشد. نتایج نشان داد که در بعضی از آزمایش‌ها روند تغییرپذیری‌های گستره و حجم حفره‌ی آبستگي متفاوت می‌باشد به‌عنوان مثال گستره حفره‌ی آبستگي در آزمایش Tra 30-8 حدود ۲۰ درصد بیشتر از آزمایش Tra 30-11 است در حالی که حجم حفره‌ی آبستگي در آزمایش Tra 30-11 حدود ۶۴۲ درصد بیشتر از آزمایش Tra 30-8 می‌باشد. همچنین مشاهده شد با افزایش ۱۱۲ و ۸۹/۵ درصدی عمق پایاب در دبی‌های ۳۰ و ۴۰ لیتر بر ثانیه، گستره حفره‌ی آبستگي به ترتیب حدود ۴۶ و ۲۵ درصد کاهش می‌یابد. اما در آزمایش‌ها با دبی ۵۰ لیتر بر ثانیه با افزایش ۶۳/۵ درصدی عمق پایاب، حدود ۷/۳ درصد کاسته می‌شود.



(a)

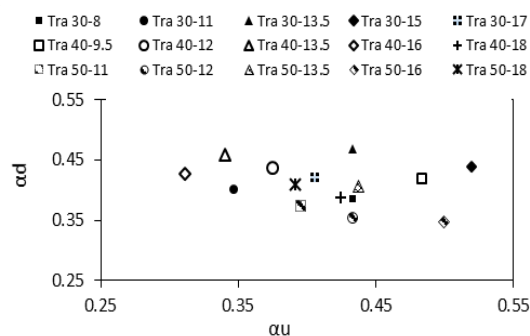


(b)

**Fig. 17** a) Area, and b) Volume of scour hole  
شکل ۱۷ نمودار الف) گستره و ب) حجم حفره‌ی آبستگي

نیمرخ‌های طولی بدون بعد حفره‌ی آبستگي در میانه‌ی آبراهه برای همه‌ی آزمایش‌ها در شکل (۱۸) ترسیم شده است. در این شکل  $L_s$  طول کل حفره‌ی آبستگي است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که روند

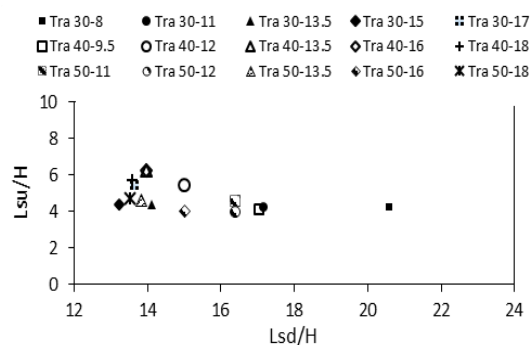
آبستگي به سمت پایین دست توسعه‌ی بیشتری داشته است. با مقایسه نتایج آزمایش‌ها مشاهده می‌شود که با افزایش عمق پایاب از میزان طول حفره‌ی آبستگي در پایین دست کاسته شده است.



**Fig. 15** Slope of the scour hole

شکل ۱۵ شیب دیواره‌های حفره‌ی آبستگي

شکل (۱۶) نشان می‌دهد که میزان طول بالادست حفره‌ی آبستگي بین ۶/۳ و ۴ و میزان طول پایین دست حفره‌ی آبستگي بین ۱۳/۲ تا ۲۰/۶ برابر عمق جریان روی سرریز است.



**Fig. 16** Scour hole length

شکل ۱۶ طول حفره‌ی آبستگي

نمودار تغییرپذیری‌های گستره و حجم حفره‌ی آبستگي بی‌بعد شده با توان دوم و سوم ارتفاع آب روی تاج سرریز برای همه‌ی آزمایش‌ها، در شکل (۱۷) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که بیشترین حجم حفره‌ی آبستگي در آزمایش Tra 50-16 با میزان ۶۸۸ برابر توان سوم ارتفاع آب روی تاج سرریز و کمترین آن در آزمایش Tra 40-12 رخ داده است. گستره حفره‌ی آبستگي در دو آزمایش

پرداخته شد. نتایج این پژوهش در محدوده تغییرپذیری‌های فراسنجه‌های مورد بررسی به صورت زیر بیان می‌شود:

با افزایش ۱۱۲ درصدی عمق پایاب در شرایط دبی ثابت ۳۰ لیتر بر ثانیه، بیشینه عمق آبستگي ۳۷ درصد کاهش می‌یابد.

شکل عوارض بستر در شرایط مختلف، به تقریب با یکدیگر همانند می‌باشند.

با افزایش عمق پایاب، طول حفره‌ی آبستگي در پایین‌دست کمتر می‌شود.

کمترین میزان طول حفره‌ی آبستگي در آزمایش‌های دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه و عمق‌های پایاب ۱۵ و ۱۷ سانتی-متر، اندازه‌گیری شد.

با افزایش ۱۱۲ و ۸۹/۵ درصدی عمق پایاب در دبی ۳۰ و ۴۰ لیتر بر ثانیه، گستره حفره‌ی آبستگي به ترتیب حدود ۴۶ و ۲۵ درصد کاهش می‌یابد.

با افزایش ۶۳/۵ درصدی عمق پایاب در آزمایش با دبی ۵۰ لیتر بر ثانیه، از گستره حفره‌ی آبستگي حدود ۷/۳ درصد کاسته شد.

کمترین گستره حفره‌ی آبستگي، در دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه در عمق پایاب ۱۷ سانتی-متر، ۳۴۰ برابر توان دوم ارتفاع آب روی تاج سرریز می‌باشد.

بیشترین حجم حفره‌ی آبستگي، در آزمایش با دبی ۵۰ لیتر بر ثانیه و عمق پایاب ۱۶ سانتی-متر، با میزان ۶۸۸ برابر توان سوم ارتفاع آب روی تاج سرریز اندازه‌گیری شد. کمترین حجم حفره آبستگي در دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه و عمق پایاب ۱۵ سانتی-متر رخ داد.

رابطه‌ای تجربی برای محاسبه نیمرخ طولی حفره‌ی آبستگي ارائه شد.

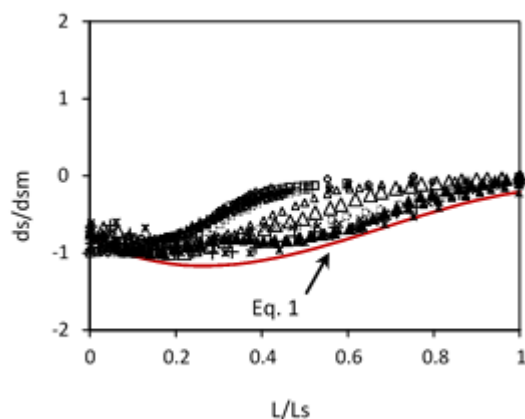
#### ۵- فهرست نشانه‌ها

A	گستره حفره‌ی آبستگي (cm <sup>2</sup> )
B	طول جانبی سرریز (cm)
Bo	طول بیرون زدگی‌های ورودی سرریز (cm)
Bi	طول بیرون زدگی‌های خروجی سرریز (cm)
Frd	عدد فرود پایین‌دست (-)
Fru	عدد فرود بالادست (-)
H	ارتفاع آب بر روی تاج سرریز (cm)

تغییرپذیری‌های نیمرخ طولی بستر در همه‌ی آزمایش‌ها به نسبت همانند است به طوری که آبستگي در پاشنه‌ی سرریز رخ داده و با فاصله گرفتن از سرریز، میزان آن بیشتر شده، و پس از رسیدن به بیشینه آن، به سمت پایین‌دست کاهش می‌یابد. نتایج نشان داد که با افزایش عمق پایاب، عمق آبستگي کاهش یافته و محل رخداد بیشینه عمق آبستگي از پاشنه‌ی سرریز دورتر می‌شود. افزون بر این طول حفره آبستگينیز افزایش یافته است. خط نشان داده شده در شکل (۱۸) در برگزیده همه‌ی نیمرخ‌های حفره آبستگي است و نشان دهنده بیشترین میزان آبستگي در آزمایش‌های انجام شده است و رابطه آن به صورت زیر به دست آمد:

$$\frac{ds}{dsm} = -3.4 \left( \frac{L}{L_s} \right)^3 + 6.99 \left( \frac{L}{L_s} \right)^2 - 3 \frac{L}{L_s} - 0.8 \quad (1)$$

در این رابطه  $ds$  عمق آبستگي در فاصله  $L$  از سرریز و  $dsm$  بیشینه عمق آبستگي است. خطای میانگین جذر مربعات (RMSE) برای رابطه بالا برابر ۰/۸ بوده که دارای دقت قابل قبولی می‌باشد.



**Fig. 18** Longitudinal bed profile at mid-channel  
شکل ۱۸ رخ‌نمای طولی حفره‌ی آبستگي در میانه‌ی آبراهه

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی ابعاد حفره‌ی آبستگي و همچنین تغییرپذیری‌های عوارض بستر در پایین‌دست سرریز کلید-پیانویی دوزنقه‌ای شکل با تغییر دبی جریان و عمق پایاب

Anderson, R.M. (2011). Piano key weir head discharge relationships. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of science in civil and environmental Engineering, Utah State university Logan, Utah, USA.

Barcouda, M., Cazaillet, O., Cochet, P., Jones, B.A., Lacroix, S., Laugier, F., Odeyer, C. and Vingny, J.P. (2006). Cost-effective increase in storage and safety of most dams using fuse gates or P. K. weirs. Proc. 22nd ICOLD Congress. Barcelona, Spain.

Chiew, Y. and Melville, B. (1987). Local scour around bridge piers. Journal of Hydraulic Research, 25(1), 15-26.

Chiew, Y.M. (1992). Scour protection at bridge piers. Journal of Hydraulic Engineering, 118(9), 1260-1269.

Ghodsian, M., Ghafouri, A. and AbdiChooplou, Ch. (2020). Experimental investigation of scour downstream of a triangular Piano Key Weir, 3rd International Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Development Management, Iran, Tehran. (In Persian)

Hien, T.C., Son, H.T. and Khanh, M.H.T. (2006). Results of some piano keys weir hydraulic model tests in Vietnam, Proc. 22nd ICOLD Congress, CIGB/ICOLD, Barcelona Q87(R39), 581-596.

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.

Khassaf, S.I. and Al-Baghdadi, M.B. (2015). Experimental study of non-rectangular piano key weir discharge coefficient. International Journal of Energy and Environment, 6(5), 425-436.

Laugier, F., Pralong, J. and Blancher, B. (2011). Influence of structural thickness of sidewalls on PKW spillway discharge capacity. Proc. Intl workshop on wabyrinths and Piano Key Weirs PKW 2011, 159-165.

Laugier, F., Vermeulen, J. and Lefebvre, V. (2013). Overview of piano key weirs experience developed at EDF during the past few years. Labyrinth and piano key weirs II, CRC, Boca Raton, FL, 213-226.

Lempérière, F. and Ouamane, A. (2003). The Piano Keys weir: a new cost-effective solution for spillways. International Journal on Hydropower & Dams, 10(5), 144-149.

Machiels, O. (2012). Experimental study of the hydraulic behavior of Piano Key Weirs, PhD Dissertation, Faculty of Applied Science, University of Liège.

Hd	هد کل در پایین دست (cm)
Hu	هد کل در بالادست (cm)
Lr	طول پشته رسوبی (cm)
L <sub>s</sub>	طول حفره آبشستگی (cm)
Lsd	طول پایین دست حفره آبشستگی (cm)
Lsu	طول بالادست حفره آبشستگی (cm)
N	تعداد کلیدهای سرریز (-)
P	ارتفاع سرریز (cm)
Pd	ارتفاع تکیه گاه سرریز (cm)
P*=P+Pd	ارتفاع کل سرریز (cm)
Q	دبی جریان (Lit/s)
Si	شیب کلیدهای ورودی سرریز (deg)
So	شیب کلیدهای خروجی سرریز (deg)
t	زمان از آغاز آبشستگی (s)
te	زمان تعادل آبشستگی (s)
Tra	نوع سرریز دوزنقه ای شکل
Ts	ضخامت دیواره جانبی سرریز (cm)
V	حجم حفره ی آبشستگی (cm <sup>3</sup> )
W	عرض کل سرریز (cm)
w	عرض هر سیکل از سرریز (cm)
Wi	عرض کلیدهای ورودی سرریز (cm)
Wo	عرض کلیدهای خروجی سرریز (cm)
x	فاصله طولی از دیوار پایین دست
y	فاصله عرضی از دیوار سمت راست
αd	شیب پایین دست حفره ی آبشستگی (deg)
αu	شیب بالادست حفره ی آبشستگی (deg)

## ۶- منابع ها

Ahmadi Dehrashid, F. and Gohari, S. (2016). Investigating the effect of discharge and tailwater depth on the dimensions of score hole downstream of a Piano Key Weir. International Conference on Civil Engineering, Tehran. (In Persian)

Anderson, R.M., and Tullis, B.P. (2012). Piano key weir: Reservoir versus channel application. Journal of irrigation and drainage engineering, 138(8), 773-776.

- 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.
- Ouamane, A. and Lempérière, F. (2006). Design of a new economic shape of weir. *Proceedings of the International symposium on dams in the societies of the 21st Century*, 18, 463-470.
- Phillips, M.A. and Lesleighter, E.J. (2013). Piano Key weir spillway, Upgrade option for a major dam. *Labyrinth and piano key weirs II*, CRC/Balkema, Leiden, Netherlands, 159-168.
- Raudkivi, A.J. and Ettema, R. (1983). Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(3), 338-350.
- Safarzadeh, A. and Noroozi, B. (2016). 3D hydrodynamics of trapezoidal Piano Key spillways. *International Journal of Civil Engineering*, 15(1), 89-101.
- Machiels, O., Erpicum, S., Dewals, B.J., Archambeau, P. and Pirotton, M. (2014). Large scale experimental study of Piano Key weir. *Journal of Hydraulic Research*, 50(2), 101-108.
- Machiels, O., Erpicum, S., Archambeau, P., Dewals, B.J. and Pirotton, M. (2011). Piano key weir preliminary design method: Application to a new dam project. *Proc. Int. Conf. Labyrinth and Piano Key Weirs Liège B*, 199-206.
- Mehboudi, A., Attari, J., Seyed Abbas Hosseini, S.A. and Jalili Ghazizadeh, M.R. (2014). Experimental study comparing Piano Key weir with artillery and linear Weirs, 13th Iranian Hydraulic Conference November 2014, University of Tabriz, Iran. (In Persian)
- Michael Scurlock, S., Thornton, C.I. and Abt, S.R. (2012). Equilibrium scour downstream of tree-dimensional grade control structures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138, 167-176.