

# The Experimental Study of Downstream Scouring of Trapezoidal Piano Key Weir Type A Under Free and Submerged Flow


Elnaz Bodaghi<sup>1</sup>, Masoud Ghodsian<sup>2\*</sup> and 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., Civil Engineering Dept. 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: 19 February 2022, Accepted: 10 April 2022     J. Hydraul. Homepage: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

## Abstract

**Introduction:** Weir is a structure that is made in the body or support of the dam to safe drain the excess volume of water in the tank. Weirs are mainly considered for free flow mode, but in some cases there is a possibility of immersion in them. Submersion in weirs occurs in two general and local ways. General submersion will occur if the downstream water level is higher than the weir crown level. This is more likely to occur for weirs in canals and rivers and if the weir acts as a diversion dam. Local submersion is observed in the downstream part of weir due to local flow conditions. Weirs are divided into linear and non-linear weirs based on the shape in the plan. Piano key weirs are the newest type of non-linear weirs which recently due to its advantages. Non-linear Piano Key Weirs enjoy not only a higher water passage but also a relatively simple and economic structure compared to linear weirs.

**Methodology:** All experiments of this research were performed in a channel with a long 10 m, wide 0.75 m and high 0.8 m in Tarbiat Modares University hydraulic laboratory. The required water was supplied through an underground reservoir. In this research, trapezoidal piano key weir types A, made of thermoplastic with a thickness 1.2 m, slope of the input and output keys 28 degrees and a height 0.2 m was used. The weir has 6 keys (3 input keys and 3 output keys) with the same slope in the input key and the output key. Uniform bed materials with an average diameter 2.2 mm were used. Flow discharge was measured with an ultrasonic flowmeter and flow depth and bed level were measured with a laser level gauge. According to the selected discharges, the flow depth upstream of the weir was considered to be more than 3 cm so that the effect of surface tension is not significant. In this study, experiments were performed with five discharges 30, 40, 50, 60 and 70 liters per second. Under submerged flow for each discharge, two percent submersion and under free flow for each discharge, the tailwater depth was considered to be 0.13 m.

**Results and discussion:** Flow characteristics are affected in case of weir submersion. During the test, after the flow hit from the input switch to the tailwater surface, due to the amount of tailwater depth, surface rotations (at low tailwater depth) and surface turbulence (at high tailwater depth) are observed. Part of the flow moves downwards and after hitting the bed surface, a weak rotational zone is created in the range of the input switches. The flow enters

the downstream in the form of a submerged jet after the output switch and, due to the momentum to the upper fluid, causes a severe rotational zone in the range of the output switches. In the free flow, more turbulence is observed in the range of the output switches due to the intersection of the flow passing through the weir lateral wall and the falling current from the upstream and downstream crowns. Less tailwater depth in free flow limits the deep growth and development of the sedimentary hill in downstream of the scouring hole, and sedimentation occurs with longer length and lower elevation. However under the submerged flow, due to the greater tailwater depth and lower fall height, the flow strength is more depleted and the flow strikes the bed with less energy, and result in less scouring. In this case, the flow does not have the power to transfer all the sediments to the downstream and most of the sediments accumulate on top of each other and a sedimentary hill is created as a point. As a result, a sedimentary hill with a higher height and less length is visible under submerged current than free flow. Therefore, in the free flow than in the submerged flow, the length and depth of the scour hole occur more, and sedimentation occurs with less height and longer length. Under submerged flow, most of the sediment bed remains unchanged, while under free flow most of the sediment bed is affected by scouring and sedimentation. Of course, changes vary depending on the hydraulic conditions. In the early times, in both free and submerged currents, scouring occurs with greater intensity, but over time, its severity decreases and scouring reaches a stable state. In this case, sediments are rarely transported downstream. The surface of the sedimentary hill downstream of the scour hole in the open stream is almost smooth and in the submerged stream is sharp.

**Conclusion:** The results showed that most of the scour hole changes occur in 20% of the initial time of the experiment and the changes in the free flow are faster than the submerged flow. The depth and length of the scour hole in free flow is greater than in submerged flow. Relative scour depth with increasing 77% in tailwater depth for discharges 30, 40, 50, 60 and 70 (L/s), respectively 42, 45, 21, 28 and 27% and with increasing the tailwater depth 123% is reduced by 95%, 92%, 90%, 75% and 68%, respectively. With increasing 18% in the submersion ratio in the Froude number of particle 0.9 and increasing 96% in the submersion ratio in the Froude number of particle 2.2, the maximum relative scour depth decreases by 92 and 56%, respectively. The location of the maximum scouring is also a function of Froude number of particle and the tailwater depth. Maximum scour depth at the tailwater depth 0.13 m at a distance 0.18 to 0.30 m from the weir toe, at the tailwater depth 0.23 m at a distance 0.18 to 0.36 m from the weir toe and at a tailwater depth 0.29 m is at a distance 0.03 to 0.30 m from the weir toe.

**Keywords:** Scouring, Piano key weir, Free flow, Submerged flow, Submersion ratio.



© 2023 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 و ارزیابی تجربی آبستگي پایین دست سرریز کلیدپیانویی ذوزنقه‌ای نوع A در جریان آزاد و مستغرق

الناز بدایغی<sup>۱</sup>، مسعود قدسیان<sup>۲\*</sup> و 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: ۱۴۰۰/۱۱/۳۰، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۱، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: [www.jhyd.ihia.ir](http://www.jhyd.ihia.ir)

**چکیده:** در این پژوهش، آبستگي پایین دست سرریز کلیدپیانویی ذوزنقه‌ای نوع A در جریان آزاد و مستغرق، به صورت آزمایشگاهی بررسی و ارزیابی شد. برای انجام آزمایش‌ها از فلومی به طول ۱۰، عرض ۰/۷۵ و ارتفاع ۰/۸ متر استفاده شد. آزمایش‌ها با دبی‌های بین ۳۰ تا ۷۰ لیتر بر ثانیه، عدد فرود ذره بین ۰/۷-۳/۸، عمق پایاب ۰/۱۳ متر برای جریان آزاد و ۰/۲۳ و ۰/۲۹ متر برای جریان مستغرق انجام شد. جنس بستر در پایین دست سرریز، ماسه‌ای با دانه‌بندی یکنواخت، قطر میانگین ۲/۲ میلی‌متر و به ضخامت ۰/۴۲۵ متر و طول ۲ متر بود. نتایج نشان داد در جریان آزاد تغییرپذیری‌های بستر نسبت به جریان مستغرق با سرعت بیشتری انجام می‌شود و عمق و طول حفره‌ی آبستگي بیشتر می‌باشد. عمق آبستگي نسبی با افزایش ۷۷ درصدی عمق پایاب برای دبی‌های ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ لیتر بر ثانیه به ترتیب ۴۲، ۴۵، ۲۱، ۲۸ و ۲۷ درصد و با افزایش ۱۲۳ درصدی عمق پایاب، به ترتیب ۹۵، ۹۲، ۹۰، ۷۵ و ۶۸ درصد کاهش می‌یابد. با افزایش ۱۸ درصدی نسبت استغراق در عدد فرود ذره ۰/۹، و افزایش ۹۶ درصدی نسبت استغراق در عدد فرود ذره ۲/۲، بیشینه عمق آبستگي نسبی به ترتیب ۹۲ و ۵۶ درصد کاهش می‌یابد. محل رخداد بیشینه عمق آبستگي در عمق پایاب ۰/۱۳، ۰/۲۳ و ۰/۲۹ متر به ترتیب در فاصله‌ی ۰/۱۸ الی ۰/۳۰، ۰/۱۸ الی ۰/۳۶ و ۰/۳۰ الی ۰/۳۰ متری از پنجه‌ی سرریز، ایجاد شده است. با افزایش عدد فرود ذره، طول نسبی حفره‌ی آبستگي افزایش یافته است.

**کلیدواژگان:** آبستگي، سرریز کلیدپیانویی، جریان آزاد، جریان مستغرق، نسبت استغراق.

## ۱- مقدمه

قسمتی از پایین دست سرریز مشاهده می‌شود. سرریزها بر مبنای شکل در پلان به دو دسته سرریزهای خطی و غیر خطی تقسیم می‌شوند. سرریزهای کلیدپیانویی جدیدترین نوع سرریزهای غیر خطی هستند که از چندی پیش با توجه به برتری‌هایشان مانند: افزایش دبی بر واحد عرض عبوری از سرریز تا ۱۰۰ متر مکعب بر ثانیه بر متر، هزینه‌ی نگهداری کمتر و افزایش دست کم ۴ برابری دبی نسبت به سرریزهای خطی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند (Machiels, 2012). به‌طورکلی سرریزهای کلیدپیانویی بر مبنای شیروانی بالادست و پایین دست به چهار نوع تقسیم می‌شوند:

- نوع A دارای شیروانی بالادست و پایین دست است.

سرریز سازه‌ای است که در بدنه یا تکیه‌گاه سد برای تخلیه ایمن حجم مازاد آب در مخزن، ساخته می‌شود. به طور معمول سرریزها برای جریان آزاد در نظر گرفته می‌شوند، ولی در برخی موارد احتمال رخداد استغراق در آنها نیز وجود دارد. استغراق در سرریزها به دو صورت کلی و موضعی رخ می‌دهد. استغراق کلی در صورتی که تراز آب پایاب بالاتر از تراز تاج سرریز باشد، رخ خواهد داد. امکان رخداد این حالت برای سرریزهای واقع در آبراهه‌ها و رودخانه‌ها و در صورتی که سرریز به‌عنوان بند انحرافی عمل کند، بیشتر است. استغراق موضعی، به واسطه شرایط جریان محلی در

(Safarzadeh and Noroozi (2015), Javaheri (2012) و (Abhash and Pandey (2021) و Karimi et al. (2019) اشاره نمود. عمده‌ی این بررسی‌ها بر روی هیدرولیک سرریزهای کلیدپیانویی انجام شده است و پژوهش‌های محدودی بر روی آبشستگی پایین دست این سرریزها صورت گرفته که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره شده است. (Jüstrich et al. (2016) با انجام آزمایش روی آبشستگی در پایین دست سرریز کلیدپیانویی مستطیلی شکل با جریان آزاد به این نتیجه رسیدند که بیشینه عمق آبشستگی به ویژگی‌های رسوب، دبی جریان، اختلاف ارتفاع جریان در بالادست و پایین دست و عمق پایاب بستگی دارد. (Ahmadi Dehrashid and Gohari (2019) به بررسی تأثیر شرایط هیدرولیکی جریان و تأثیر عدد فرود ذره روی میزان آبشستگی پایین دست کفبند پس از سرریز کلیدپیانویی مستطیلی شکل در شرایط جریان آزاد پرداختند. نتایج تحقیقات آنان نشان داد که با افزایش عدد فرود ذره، میزان بیشینه عمق آبشستگی، محل رخداد بیشینه عمق آبشستگی و بیشینه گسترش طول حفره آبشستگی، افزایش می‌یابند. (Yazdi et al. (2020) با بررسی آبشستگی پایین دست سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای و مستطیلی در شرایط جریان آزاد بیان کردند که با افزایش دبی و کاهش عمق پایاب، ویژگی‌های هندسی حفره آبشستگی افزایش می‌یابد. (Kumar and Ahmad (2020) به بررسی آزمایشگاهی آبشستگی پایین دست سرریز کلیدپیانویی مستطیلی با ارزیابی اثرگذاری عمق پایاب به ازای دبی‌های مختلف در جریان آزاد پرداختند و در نتیجه بیان کردند که جت‌های ریزشی از کلیدهای ورودی و خروجی سرریز عامل اصلی ایجاد حفره آبشستگی و تپه‌ی رسوبی در پایین دست آن است. (Moradi et al. (2020) با بررسی آبشستگی در پایین دست سرریزهای کلیدپیانویی نوع A و B را انجام دادند. در ادامه بررسی‌ها و ارزیابی‌ها روی سرریزهای کلیدپیانویی انجام گرفته است که در این زمینه می‌توان به بررسی‌های (Hien et al. (2006) و (Ouamane and Lempérière, Barcouda et al. (2006) و (Kabiri-Samani and Machiels et al. (2012) (2006) اشاره کرد.

- نوع B تنها در بالادست دارای شیروانی است.
  - نوع C تنها در پایین دست دارای شیروانی است.
  - نوع D بدون شیروانی است و تنها کلیدها دارای سطح شیبدار هستند. (Lempérière et al., 2011).
- اجزای یک سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای در شکل (۱) نشان داده شده است. قسمت‌های این نوع سرریز عبارتند از: ارتفاع سرریز (P)، عرض کل سرریز (W)، عرض کلید ورودی ( $W_i$ )، عرض کلید خروجی ( $W_o$ )، طول دیوار جانبی سرریز (B)، طول پیشانی کلیدهای ورودی سرریز ( $B_i$ )، طول پیشانی کلیدهای خروجی سرریز ( $B_o$ ) و ضخامت تاج سرریز ( $T_s$ ) می‌باشد.

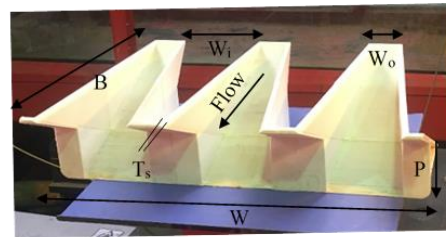


Fig. 1 Trapezoidal piano key weir  
شکل ۱ سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای

سرریز کلیدپیانویی برای نخستین بار در سال ۲۰۰۱ طراحی و همچنین در سال ۲۰۰۶ توسط شرکت الکتریسیته دی فرانس ساخته شده است (Machiels et al., 2011). در فاز اجرایی نیز نخستین سرریز کلیدپیانویی در سال ۲۰۰۶ برای اصلاح سرریز سد گلورز<sup>۱</sup> توسط وزارت برق فرانسه طراحی و ساخته شد (Laugier, 2007). پس از آن از سرریزهای کلیدپیانویی برای افزایش ظرفیت تخلیه سیل از سد های مارس<sup>۲</sup> (۲۰۰۸)، اتریت<sup>۳</sup> (۲۰۰۹) و گلوریتز<sup>۴</sup> (۲۰۱۰) استفاده شده است (Erpicum et al., 2011). (Lempérière and Ouamane (2003) نخستین آزمایش‌های مربوط به هیدرولیک سرریزهای کلیدپیانویی نوع A و B را انجام دادند. در ادامه بررسی‌ها و ارزیابی‌ها روی سرریزهای کلیدپیانویی انجام گرفته است که در این زمینه می‌توان به بررسی‌های (Hien et al. (2006) و (Ouamane and Lempérière, Barcouda et al. (2006) و (Kabiri-Samani and Machiels et al. (2012) (2006) اشاره کرد.

3 Etroit  
4 Gloriettes

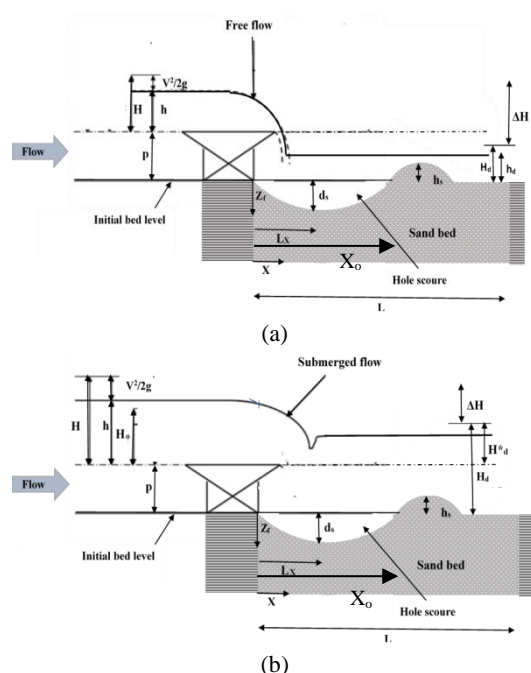
1 Goulours Dam  
2 St. Marc

نوع A، در دبی‌ها و عمق پایاب‌های مختلف در جریان آزاد و مستغرق بررسی شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- آنالیز ابعادی

در شکل (۲) سرریز کلیدپیانویی با جریان آزاد و مستغرق، و فراسنجه‌های حفره آبستگي ارائه شده است. در این شکل H بار کل جریان روی سرریز در بالادست، h عمق جریان روی سرریز در بالادست،  $H_d$  بار کل جریان در پایین‌دست،  $h_d$  عمق جریان در پایین‌دست در جریان آزاد،  $H^*_d$  بار کل جریان نسبت به تاج سرریز در پایین‌دست در حالت استغراق، P ارتفاع سرریز،  $v^2/2g$  بار سرعت و  $\Delta H$  اختلاف بار آبی در بالادست و پایین‌دست سرریز می‌باشد.



**Fig. 2** General view of geometric and hydraulic parameters: (a) free flow and (b) submerged flow

شکل ۲ فراسنجه‌های هندسی و هیدرولیکی در: (a) جریان آزاد و (b) جریان مستغرق

مشخصه‌های هندسی آبستگي شامل عمق حفره آبستگي  $d_s$  ارتفاع تپه رسوبي در پایین‌دست حفره آبستگي  $h_s$  فاصله محل عمق بیشینه آبستگي از پنجهی سرریز در راستای جریان  $L_x$  طول حفره آبستگي  $X_0$  عمق آبستگي در مجاورت پنجهی سرریز  $Z_f$  و فاصله از پنجهی سرریز در راستای جریان  $X$  می‌باشد.

سرریزهای کلیدپیانویی دوزنقه‌ای و مثلثی شکل در جریان آزاد پرداختند. نتایج تحقیقات آنان نشان داد که به‌طور کلی میانگین میزان‌های بیشینه عمق آبستگي پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی مثلثی در مقایسه با سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای بیشتر است. (Bodaghi et al. (2021) به بررسی آزمایشگاهی اثر گذاری جریان ورودی و عمق پایاب بر آبستگي پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی در شرایط جریان آزاد پرداختند. نتایج تحقیقات آنان نشان داد که افزایش ۶۲/۵ و ۱۲۵ درصدی عمق پایاب، به ترتیب کاهش ۳۰/۵ و ۴۷/۳۲ درصدی عمق آبستگي را نشان داد. Abdi (2022a) به بررسی تغییرپذیری‌های زمانی آبستگي پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای در شرایط جریان آزاد پرداختند. آنان معادله‌هایی برای پیش‌بینی تغییرپذیری‌های زمانی ابعاد هندسی حفره آبستگي پایین‌دست سرریز ارائه دادند. همچنین (Abdi Abdi Chooplou et al. (2022b) بررسی آزمایشگاهی آبستگي پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی نوع A در شرایط جریان آزاد پرداختند. نتایج تحقیقات آنان نشان داد که در اعداد فرود ذره بیشتر، شاخص آبستگي با افزایش عمق پایاب، سیر نزولی بیشتری می‌گیرد. بیشترین شاخص عدم تقارن (برابر ۲/۱۲) مربوط به عدد فرود ذره ۰/۳۶ و کمترین شاخص عدم تقارن (برابر ۰/۲۲) مربوط به عدد فرود ۰/۲۷ است.

با مرور نتایج پژوهش‌های انجام شده در گذشته، مشاهده می‌شود عمده‌ی بررسی و ارزیابی‌ها در زمینه‌ی هیدرولیک سرریزهای کلیدپیانویی بوده و پژوهش‌های کمتری در زمینه‌ی آبستگي در پایین‌دست این سرریزها انجام شده است. افزون‌براین همه‌ی بررسی‌های انجام شده در مورد آبستگي پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی، در شرایط جریان آزاد بوده است. با توجه به برتری‌های سرریز کلیدپیانویی و نبود بررسی جامع در زمینه آبستگي در جریان مستغرق، ضروری است که آزمایش‌هایی در این مورد انجام شود. لذا در این تحقیق آزمایشگاهی، تغییرپذیری‌های زمانی عمق آبستگي، تغییرپذیری‌های بیشینه عمق آبستگي و موقعیت آن، نیمرخ‌های عرضی و طولی بستر پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای شکل



$$\Psi = f(H_d^*, \rho, \rho_s, q, g, d_{50}, H_d, H) \quad (5)$$

با استفاده از روش باکینگهام متغیرهای بی بعد مؤثر بر آبهستگی پایین دست سرریز کلیدپیانویی در جریان مستغرق به صورت رابطه (۶) به دست آمد.

$$\frac{\Psi}{H} = f\left(\frac{d_{50}}{H}, \frac{q}{\sqrt{gH_d^3}}, \frac{\rho_s - \rho}{\rho}, \frac{H_d}{H}, \frac{H_d^*}{H}\right) \quad (6)$$

با ترکیب متغیر مستقل  $\frac{q}{\sqrt{gH_d^3}}$  و  $\frac{d_{50}}{H_d}$ ، متغیر بی بعد  $Fr_d = \frac{q}{H_d \sqrt{gd_{50}(s-1)}}$  به دست می آید. بنابراین:

$$\frac{\Psi}{H} = f_3\left(Fr_d, S, \frac{H_d}{H}\right) \quad (7)$$

در اینجا متغیر  $S = \frac{H_d^*}{H}$  نسبت استغراق است. بر مبنای انجام نتایج Kabiri Samani and Javaheri (2012) در صورتی که  $S \geq 0.16$  باشد استغراق سرریز رخ خواهد داد. (2012) Dabbling and Tullis این میزان را ۰/۴۸ ارائه کردند.

## ۲-۲- تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایشها در آبراههای مستطیلی به طول ۱۰ متر، عرض ۰/۷۵ متر و ارتفاع ۰/۸ متر با دیوارههایی از جنس شیشه و شیب کف صفر درجه، در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس انجام شد. مدل مورد نظر در فاصله ۱ متری از ابتدای آبراه نصب شد. شکل (۳) سرریز کلیدپیانویی در آبراه و بستر پایین دست آن را نشان می دهد.

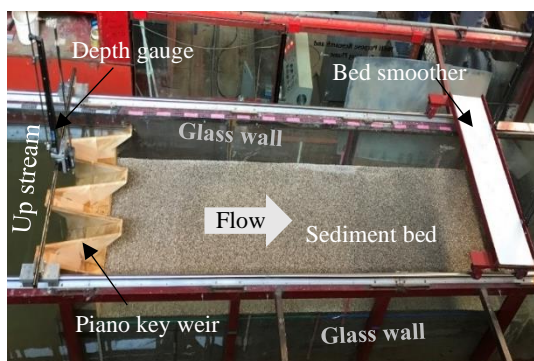


Fig. 3 Layout of the flume and experimental equipment's  
شکل ۳ ویژگی های فلوم و تجهیزات آزمایشگاهی

آب مورد نیاز از طریق مخزن زیرزمینی تأمین می شد. در این تحقیق سرریز کلیدپیانویی دوزنقه ای شکل از نوع A، از جنس ترموپلاستیک با ضخامت ۰/۰۱۲ متر، شیب کلید ورودی و خروجی ۰/۵۳ و ارتفاع ۰/۲ متر استفاده شد. ابعاد

با در نظر گرفتن مشخصه های هندسی حفره آبهستگی با  $\Psi$ ، برای جریان آزاد می توان نوشت:

$$\Psi = f(H_d, \rho, \rho_s, q, g, d_{50}, H, L, W, W_i, W_o, B, B_o, B_i, P, T_s, \sigma, \mu, S_e, t, t_e) \quad (1)$$

در اینجا  $\rho$  جرم مخصوص سیال،  $\rho_s$  جرم مخصوص ذرات رسوب،  $q$  دبی جریان در واحد عرض سرریز،  $g$  شتاب ثقل،  $d_{50}$  قطر میانگین ذرات رسوب،  $\sigma$  کشش سطحی سیال،  $\mu$  لزجت پویایی،  $t$  زمان و  $t_e$  زمان تعادل می باشد. با استفاده از فرضیه (تئوری) باکینگهام رابطه (۲) به دست می آید:

$$\frac{\Psi}{H} = f\left(\frac{d_{50}}{H}, \frac{q}{\sqrt{gH_d^3}}, \frac{\rho_s - \rho}{\rho}, \frac{H_d}{H}, \frac{L}{W}, \frac{W_i}{W_o}, \frac{B_i}{B_o}, \frac{t}{t_e}, \frac{B}{T_s}, \frac{P}{H}, \frac{\mu}{\rho q}, \frac{\sigma t}{\mu P}\right) \quad (2)$$

با توجه به اینکه هدف از این پژوهش بررسی فراسنجه (پارامتر)های آبهستگی در حالت تعادل است، عامل زمان تعادل و فراسنجه های ثابت ( $L/W, W_i/W_o, B_i/B_o, B/T_s$ ) حذف می شوند. با توجه به دبی های انتخابی برای آزمایش و بیشتر بودن بار آب روی سرریز از ۳ سانتی متر، می توان از اثر کشش سطحی هم صرف نظر کرد (Pfister et al. 2013). در ضمن بدلیل زیاد بودن عدد رینولدز و وجود جریان آشفته از اثر گذاری لزجت نیز صرف نظر می شود.

با صرف نظر کردن از متغیرهای بی بعد ثابت، رابطه (۳) به دست می آید.

$$\frac{\Psi}{H} = f\left(\frac{d_{50}}{H}, \frac{q}{\sqrt{gH_d^3}}, \frac{\rho_s - \rho}{\rho}, \frac{H_d}{H}\right) \quad (3)$$

با ترکیب متغیر مستقل  $\frac{q}{\sqrt{gH_d^3}}$  و  $\frac{d_{50}}{H_d}$ ، متغیر بی بعد

$Fr_d = \frac{q}{H_d \sqrt{gd_{50}(s-1)}}$  به دست می آید که عدد فرود ذره است و  $S$  چگالی نسبی ذرات رسوب می باشد. بنابراین برای جریان آزاد رابطه (۳) را به صورت زیر می توان نوشت.

$$\frac{\Psi}{H} = f_3\left(Fr_d, \frac{H_d}{H}\right) \quad (4)$$

هنگامی که تراز جریان در پایین دست، بالاتر از تاج سرریز قرار گرفته و باعث تغییر در عمق در بالادست سرریز شود، جریان مستغرق است. در این حالت داریم:

برای اندازه‌گیری دبی جریان، از دبی‌سنج فراصوت (آلتراسونیک) مدل TFM3100-F1 استفاده شد که میزان دبی را با دقت ۰/۱ لیتر بر ثانیه اندازه‌گیری و از طریق کابل رابط به صفحه نمایشگر دبی‌سنج منتقل می‌کند. با توجه به دبی‌های انتخابی، عمق جریان در بالادست سرریز بیشتر از ۰/۳ متر در نظر گرفته شد تا تأثیر کشش سطحی مهم نباشد (Pfister et al., 2013). پس از نصب سرریز و آب‌بندی آن، مصالح در کف فلوم ریخته و سطح آن با صاف کننده بستر تراز شد. برای جلوگیری از خروج مصالح به مخزن زیرزمینی، توری فلزی در انتهای فلوم قرار داده شد. ابتدا ورق فلزی نازکی روی مصالح بستر قرار داده می‌شد، سپس دبی جریان به وسیله دستگاه دبی سنج فراصوت و عمق پایاب به وسیله دریچه تعبیه‌شده در انتهای فلوم، تنظیم می‌شد. پس از گذشت مدت‌زمانی برای ایجاد جریان دائمی، عمق جریان در بالادست به وسیله عمق‌سنج دیجیتال اندازه‌گیری و با برداشت ورق فلزی آزمایش آغاز می‌شد. هنگامی که عمق آبشستگی پس از گذشت ۳ ساعت، کمتر از ۱ میلی‌متر تغییر کند، پایداری ایستایی (استاتیکی) در هندسه حفره رخ داده و آبشستگی به تعادل رسیده است (Kummar et al., 1999). برای تعیین زمان تعادل، در آغاز با انجام آزمایش شاهد ۱۲ ساعته مشاهده شد که با گذشت ۳۰۰ دقیقه از آغاز آزمایش، اثرگذاری ویژگی‌های هیدرولیکی جریان بر ابعاد حفره آبشستگی ناچیز می‌شود. بنابراین زمان انجام آزمایش‌های بعدی ۵ ساعت در نظر گرفته شد. پس از پایان آزمایش، پمپ را خاموش کرده و پس از تخلیه آب به مخزن زیرزمینی و زهکشی کامل فلوم، عوارض یا ناهمواری بستر به وسیله ترازسنج لیزری اندازه‌گیری شد. برای ایجاد جریان مستغرق، با تنظیم دریچه تعبیه شده در پایین دست فلوم، عمق پایاب طوری تنظیم شد که تراز سطح جریان در پایین دست، بالاتر از تاج سرریز قرار گرفته و بر روی جریان بالادست تأثیرگذار باشد. پس از تنظیم عمق پایاب، عمق جریان در بالادست اندازه‌گیری شد و برابر مرحله‌های بالا همه‌ی آزمایش‌ها انجام شد. تغییرپذیری‌های زمانی عمق آبشستگی و نیمرخ بستر در دیواره سمت راست آبراهه، به وسیله دوربین عکس‌برداری و با استفاده از نرم‌افزار دیجی‌تایزر اندازه‌گیری و ثبت شد.

هندسی سرریز کلیدپیانویی مورد استفاده در جدول (۱) و شکل (۴) ارائه شده است. سرریز دارای ۶ کلید (۳ کلید ورودی و ۳ کلید خروجی) با شیب یکسان در کلید ورودی و کلید خروجی می‌باشد. مصالح بستر یکنواخت و با قطر میانگین ۲/۲ میلی‌متر استفاده شد. طول بستر قابل فرسایش در پایین دست سرریز ۲ متر و عرض و عمق لایه رسوب‌ها به ترتیب ۰/۷۵ و ۰/۴۲۵ متر می‌باشد. برای اندازه‌گیری عمق جریان در بالادست سرریز از عمق‌سنج دیجیتال با دقت ۰/۱ میلی‌متر استفاده شد.

جدول ۱ ویژگی‌های سرریز کلیدپیانویی

Table 1 Piano key weir configurations

Parameters	Values
Total width of weir, (W)	0.75 m
Width of inlet key, ( $w_i$ )	0.175 m
Width of outlet key, ( $w_o$ )	0.051 m
Sidewall thickness, ( $T_s$ )	0.012 m
Lateral length of weir, (B)	0.50 m
Upstream overhang length, ( $B_o$ )	0.125 m
Downstream overhang length, ( $B_i$ )	0.125 m
Height of weir (P)	0.20 m
Number of cycles (N)	3
Slope of inlet key ( $S_i$ )	0.53
Slope of outlet key ( $S_o$ )	0.53
B/W	0.667
$W_i/W_o$	3.4
B/P	2.5
B <sub>i</sub> /P	0.625
B <sub>o</sub> /P	0.625

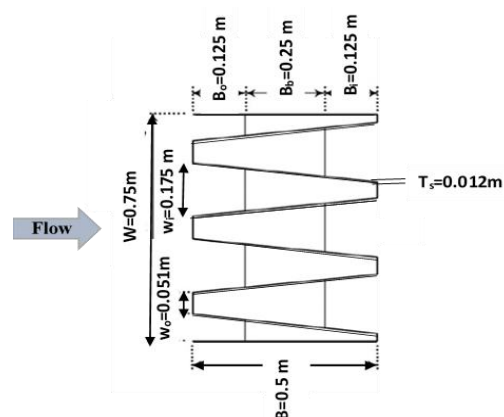


Fig. 4 Geometric specifications of trapezoidal piano key weir

شکل ۴ ویژگی‌های هندسی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای

آزمایش‌ها نشان داد، پس از برخورد جریان خروجی از کلیدهای ورودی به سطح پایاب، با توجه به میزان عمق پایاب، چرخش‌های سطحی (در عمق پایاب کم) و اغتشاش سطحی (در عمق پایاب زیاد) مشاهده می‌شود. بخشی از جریان به سمت پایین حرکت کرده و پس از برخورد به سطح بستر، ناحیه چرخشی ضعیفی در محدوده کلیدهای ورودی به وجود می‌آید. جریان پس از کلیدهای خروجی به صورت جت مستغرق وارد پایین دست شده و به واسطه اعمال مومنتوم به سیال بالایی، باعث ایجاد ناحیه چرخشی شدید در محدوده کلیدهای خروجی می‌شود. در جریان آزاد نیز در محدوده کلیدهای خروجی به علت برخورد جریان عبوری به دیواره‌ی جانبی سرریز و جریان ریزشی از تاج‌های بالادست و پایین دست، آشفتگی بیشتری مشاهده می‌شود.



(a)



(b)

**Fig. 5** Flow pattern in piano key weirs: a) free flow and b) submerged flow

شکل ۵ الگوی جریان در سرریزهای کلیدپیانویی: (a) جریان آزاد و (b) جریان مستغرق

آزمایش‌ها با پنج دبی ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ لیتر بر ثانیه انجام شد. برای هر دبی، دو درصد استغراق مختلف و یک حالت شرایط جریان آزاد با عمق پایاب ۰/۱۳ متر در نظر گرفته شد. ویژگی آزمایش‌های انجام شده در جدول‌های (۲) و (۳) ارائه شده است.

جدول ۲ جزئیات آزمایش‌ها در جریان مستغرق

**Table 1** Details of experiments under submerged flow

$F_{rd}$	$\Delta H$ (m)	S	H (m)	$H_d$ (m)	Q (L/s)
0.9	0.006	0.84	0.036	0.23	30
0.7	0.001	0.99	0.091	0.29	30
1.23	0.014	0.68	0.044	0.23	40
0.97	0.002	0.98	0.092	0.29	40
1.5	0.023	0.57	0.053	0.23	50
1.2	0.003	0.97	0.093	0.29	50
1.85	0.032	0.48	0.062	0.23	60
1.5	0.006	0.94	0.096	0.29	60
2.2	0.037	0.45	0.067	0.23	70
1.71	0.012	0.88	0.102	0.29	70

جدول ۳ جزئیات آزمایش‌ها در جریان آزاد

**Table 2** Details of experiments under free flow

$F_{rd}$	$\Delta H$ (m)	$H_d$ (m)	Q (L/s)
1.6	0.103	0.13	30
2.2	0.109	0.13	40
2.7	0.121	0.13	50
3.3	0.13	0.13	60
3.8	0.139	0.13	70

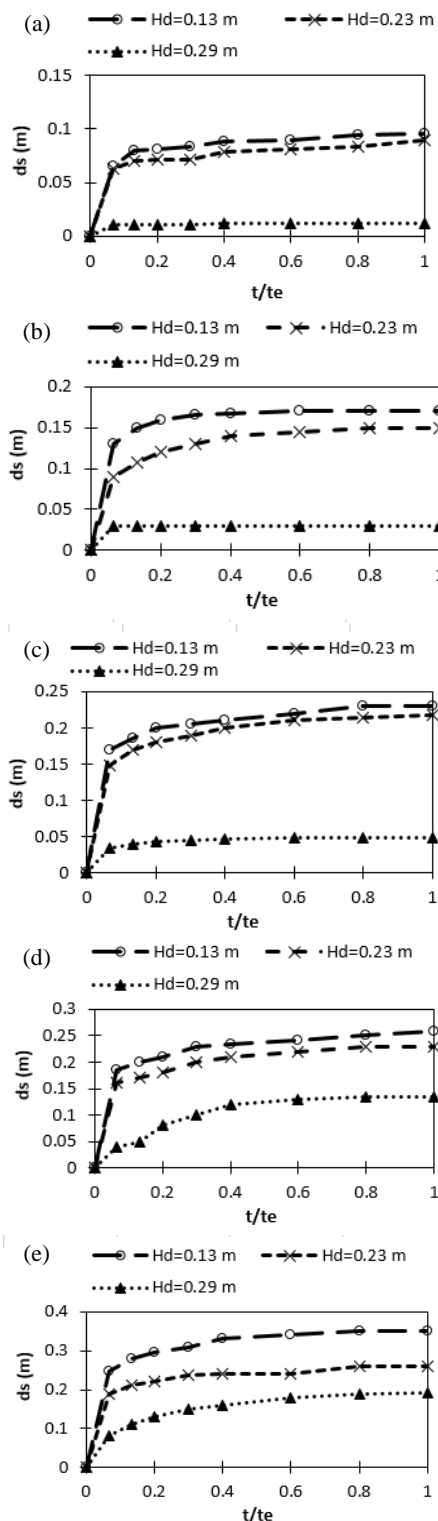
### ۳- نتایج و بحث

در شکل (۵) جریان در پایین دست سرریز و در شکل (۶) نمونه‌ای از ناهماری (توپوگرافی) بستر در شرایط آزاد و مستغرق نشان داده شده است.

همان طور که مشاهده شد با توجه به آشفتگی بیشتر جریان در محدوده کلیدهای خروجی، آبشستگی در محدوده این کلیدها در هر دو حالت بیشتر از کلیدهای ورودی است.

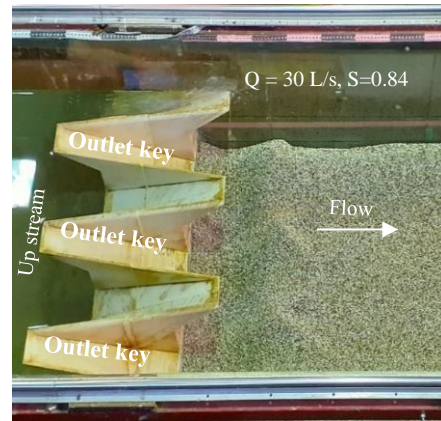


عمق آبشستگی کاهش می‌یابد.

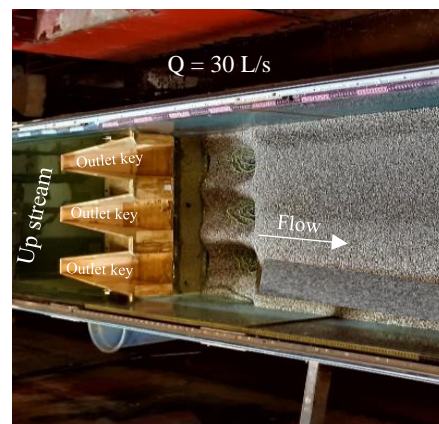


**Fig. 7** Temporal variations of the scour depth under free flow and submerged flow with  $Q$ : (a) 30, (b) 40, (c) 50, (d) 60 and (e) 70 L/s

شکل ۷ تغییرپذیری‌های زمانی عمق آبشستگی در جریان آزاد و مستغرق با دبی: (a) ۳۰، (b) ۴۰، (c) ۵۰، (d) ۶۰ و (e) ۷۰ لیتر بر ثانیه



(a)



(b)

**Fig. 6** Bed topography in (a) submerged flow and (b) free flow

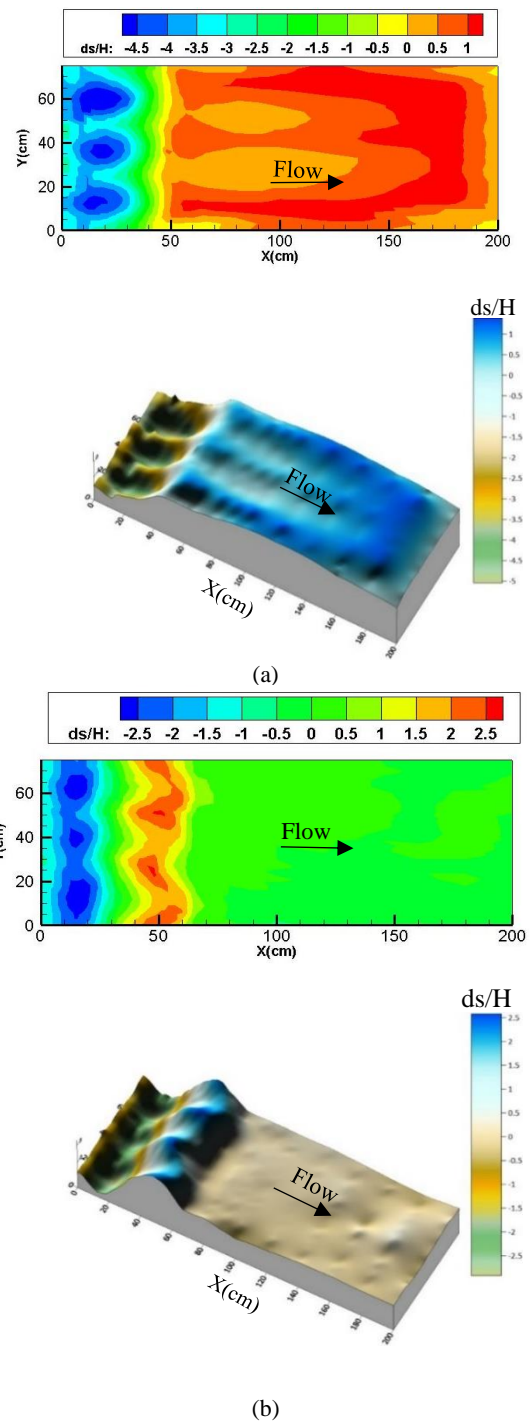
شکل ۶ ناهمواری بستر در: (a) جریان مستغرق و (b) جریان آزاد

منحنی تغییرپذیری زمانی عمق آبشستگی برای جریان آزاد و مستغرق در نزدیکی دیواره‌ی فلوم در شکل (۷) ارائه شده است.

در این شکل محور افقی متغیر زمان ( $t$ ) نسبت به زمان تعادل ( $t_e$ ) و محور عمودی عمق آبشستگی ( $d_s$ ) است. در شکل (۷) مشاهده می‌شود عمده‌ی تغییرپذیری‌های در زمان‌های اولیه رخ داده و پس از آن، نرخ رشد تغییرپذیری‌های جزئی است. عمده‌ی این تغییرپذیری‌ها در حدود ۲۰ درصد اولیه زمان آزمایش انجام می‌گیرد. همچنین مشاهده می‌شود در جریان مستغرق ( $H_d = 0.23$  و  $0.29$  m)، با افزایش عمق پایاب که منجر به افزایش نسبت استغراق می‌شود، عمق آبشستگی روند کاهشی دارد. زیرا با افزایش نسبت استغراق، کاهش ارتفاع ریزش جریان رخ دهد و در نتیجه به سبب کاهش سرعت برخورد جریان به بستر،

از دیواره‌ی سمت راست آبراهه می‌باشد. روند تغییرات بستر در جریان آزاد و مستغرق تا حدودی همانند هم بوده با این تفاوت شدت تغییرپذیری‌های آبخستگی در جریان آزاد بیشتر از جریان مستغرق می‌باشد. در جریان آزاد ارتفاع ریزش بیشتر و عمق پایاب کمتر، انرژی جریان برخوردی به بستر بیشتر بوده و باعث افزایش عمق آبخستگی و در پی آن افزایش طول حفره آبخستگی می‌شود و همین موضوع باعث افزایش حجم آبخستگی شده است. عمق پایاب کمتر در جریان آزاد، رشد و توسعه عمقی تپه رسوبی در پایین دست حفره آبخستگی را محدود کرده و رسوب گذاری با طول بیشتر و ارتفاع کمتر رخ می‌دهد. ولی در جریان مستغرق به سبب عمق پایاب بیشتر و ارتفاع ریزش کمتر، قدرت جریان، بیشتر مستهلک شده و جریان با انرژی کمتری به بستر برخورد می‌کند و در نتیجه آبخستگی کمتر شده است. در این حالت، جریان قدرت انتقال همه رسوبها به سمت پایین دست را نداشته و بیشتر رسوبها بر روی هم انباشته شده و تپه‌ی رسوبی به صورت نوک تیز ایجاد می‌شود. در نتیجه تپه‌ی رسوبی با ارتفاع بیشتر و طول کمتر در جریان مستغرق نسبت به جریان آزاد قابل مشاهده است. بنابراین در جریان آزاد نسبت به جریان مستغرق، طول و عمق حفره‌ی آبخستگی بیشتر، و رسوب گذاری با ارتفاع کمتر و طول بیشتر رخ می‌دهد. در جریان مستغرق، قسمت بیشتری از بستر رسوبی بدون تغییر باقی می‌ماند در صورتی که در جریان آزاد بخش اعظمی از بستر رسوبی تحت تأثیر آبخستگی و رسوب گذاری قرار می‌گیرد. البته با توجه به شرایط هیدرولیکی، تغییرپذیری‌های بستر متفاوت می‌باشد.

در شکل (۹) نمونه‌ای از نیمرخ‌های طولی در مقطع با بیشینه عمق آبخستگی، در جریان آزاد و جریان مستغرق ( $S = 0.84$ ) و در زمان‌های مختلف ارائه شده است. در زمان‌های اولیه در هر دو حالت جریان آزاد و مستغرق، آبخستگی با شدت بیشتری رخ می‌دهد ولی با گذشت زمان از شدت آن کاسته شده و آبخستگی به حالت پایدار می‌رسد. در این حالت رسوبها به ندرت به سمت پایین دست منتقل می‌شوند. برابر شکل (۹)، سطح تپه‌ی رسوبی در پایین دست حفره آبخستگی در جریان آزاد تا حدودی صاف و در جریان



**Fig. 8** Bed changes and three-dimensional view of the scouring pattern: a) free flow with  $F_{rd} = 1.6$  and b) submerged flow with  $F_{rd} = 0.9$  and  $S = 0.84$

شکل ۸ تغییرپذیری‌های بستر و نمای سه بعدی الگوی آبخستگی: (a) جریان آزاد در عدد فرود ذره  $1/6$  و (b) جریان مستغرق در عدد فرود ذره  $0/9$  و نسبت استغراق  $0/84$

در شکل (۸) نمونه‌ای از تغییرپذیری‌های ناهمواری بستر و نمای سه بعدی الگوی آبخستگی ارائه شده است. در این شکل X فاصله از دیوار پایین دست سرریز و Y فاصله عرضی

نمونه‌ای از نیم‌رخ‌های طولی بستر در مقطع با بیشینه عمق آبشستگی و در پایان آزمایش در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است. در این جا محور افقی فاصله‌ی طولی بی‌بعد شده و محور عمودی عمق آبشستگی بی‌بعد شده با بار کل جریان روی سرریز را نشان می‌دهد. شکل (۱۰) تأثیر عدد فرود ذره و شکل (۱۱) تأثیر نسبت استغراق بر نیم‌رخ طولی بستر را نشان می‌دهد.

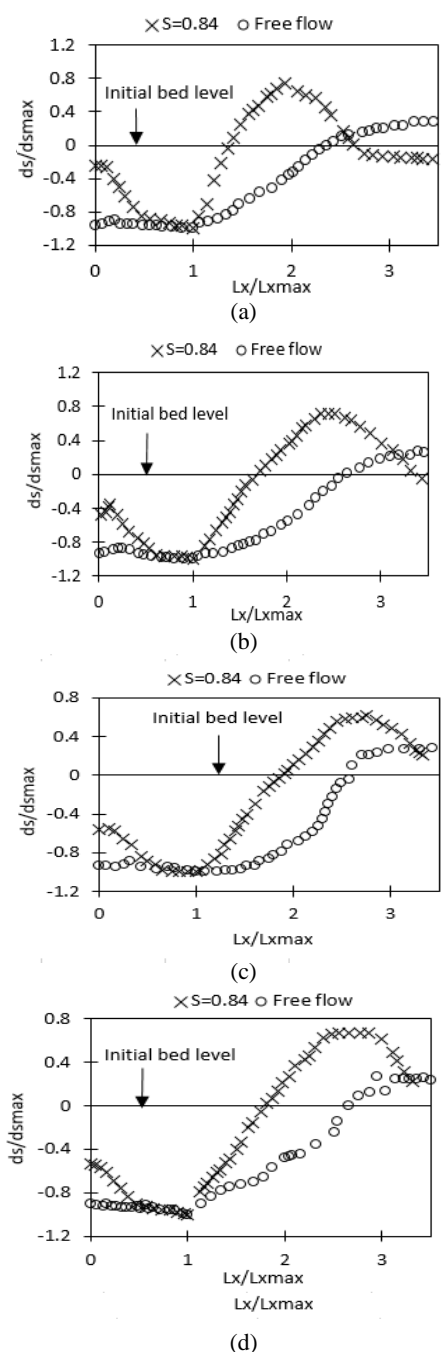
شکل (۱۰) نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود ذره عمق آبشستگی، فاصله رخداد آن از پنجه‌ی سرریز و طول حفره‌ی آبشستگی افزایش یافته است. به طوری که با افزایش ۱۳۸، ۱۴۵ و ۱۴۴ درصدی عدد فرود ذره در عمق‌های پایاب ۰/۱۳، ۰/۲۳ و ۰/۲۹ متر، فاصله رخداد بیشینه عمق آبشستگی از پنجه‌ی سرریز به ترتیب ۱/۶۵، ۲ و ۱۰ برابر افزایش می‌یابد. به طور کلی افزایش عدد فرود ذره، افزایش ظرفیت فرسایش‌پذیری جریان را به همراه دارد و در نتیجه ابعاد حفره آبشستگی افزایش می‌یابد. در عدد فرود ذره برابر ۰/۷، با عمق پایاب ۰/۲۹ متر، تا حدودی آبشستگی رخ نداده است. بنابراین در عدد فرود ذره کمتر، عمق آبشستگی کمتر و با افزایش عدد فرود ذره تغییرپذیری‌های عمق آبشستگی بیشتر است. تغییرپذیری‌های اشاره شده در بالا، در عمق‌های پایاب مختلف مشاهده می‌شود.

شکل (۱۱) نشان می‌دهد که تغییرپذیری‌های طولی بستر در جریان آزاد نسبت به جریان مستغرق بیشتر می‌باشد. در جریان آزاد انرژی بیشتر جریان برخوردی به بستر، سبب آبشستگی بیشتری می‌شود. با افزایش نسبت استغراق تغییرات عمق و طول حفره آبشستگی کاهش یافته و به طوری که در عدد فرود ذره برابر ۰/۷، با نسبت استغراق ۰/۹۹، تا حدودی آبشستگی رخ نداده است.

نمونه‌ای از نیم‌رخ‌های عرضی بستر در مقطع با بیشینه عمق آبشستگی در پایان آزمایش برای جریان آزاد و مستغرق، در شکل (۱۲) و در مجاورت پاشنه‌ی سرریز در شکل (۱۳) ارائه شده است.

مشاهده می‌شود با تغییر شرایط جریان از آزاد به مستغرق و با افزایش درصد استغراق، آبشستگی کمتری رخ داده است. در شکل (۱۲-ا) با نسبت استغراق ۰/۹۹، گستردگی

مستغرق نوک‌تیز می‌باشد. همچنین در جریان آزاد طول حفره‌ی آبشستگی بزرگ‌تر است. طول حفره‌ی آبشستگی در زمان تعادل، در جریان آزاد ۱/۶۷ برابر طول حفره‌ی آبشستگی در جریان مستغرق است. افزون‌براین، میزان آبشستگی و کاهش تراز بستر در مجاورت پنجه‌ی سرریز،



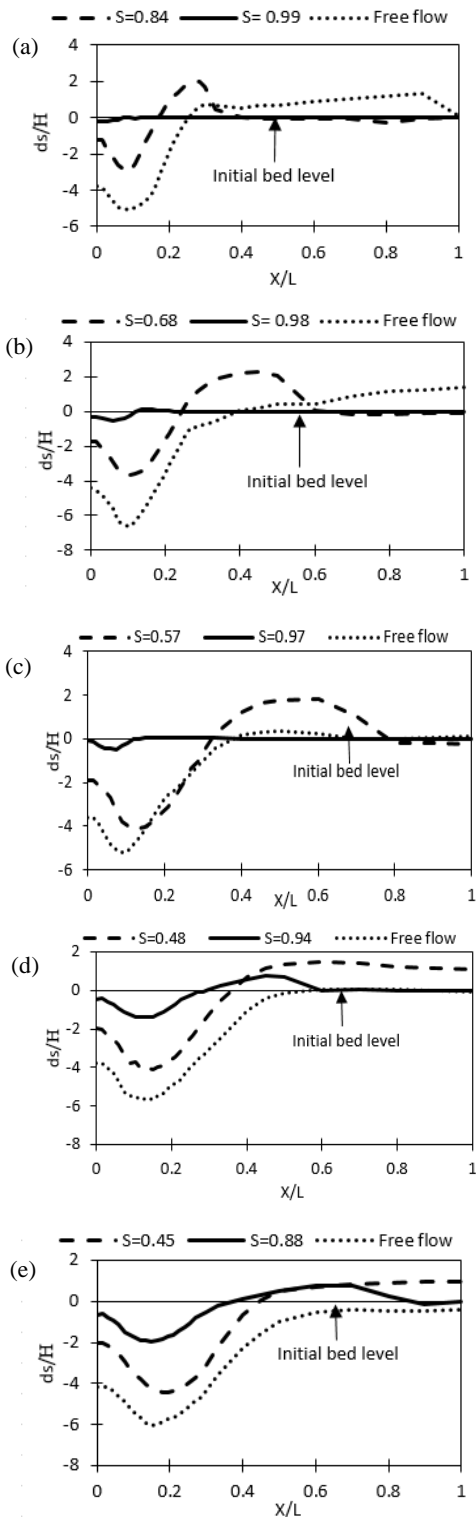
**Fig. 9** Longitudinal profiles of scouring hole with a  $Q = 30 \text{ L/s}$ : (a)  $t/t_e=0.067$ , (b)  $t/t_e=0.3$ , (c)  $t/t_e=0.6$  and (d)  $t/t_e=1$

شکل ۹ نیم‌رخ‌های طولی حفره آبشستگی برای دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه:

(a)  $t/t_e=0.067$  (b)  $t/t_e=0.3$  (c)  $t/t_e=0.6$  (d)  $t/t_e=1$

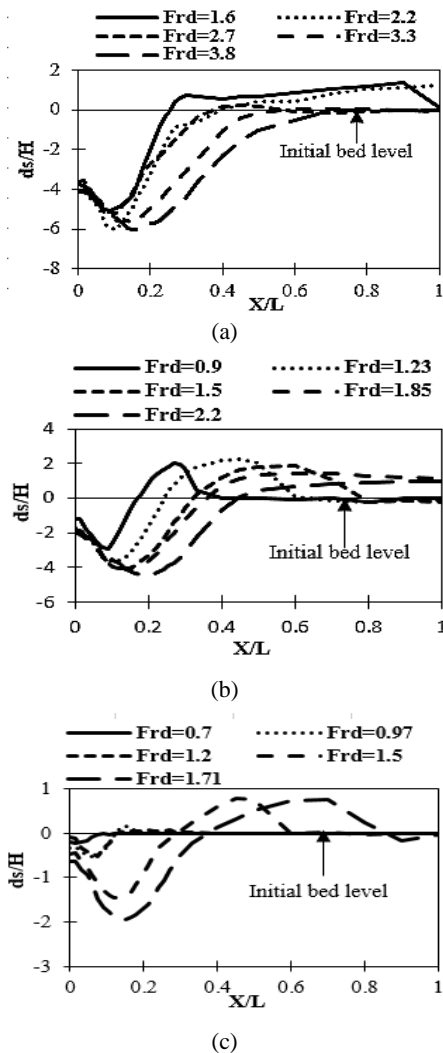
در جریان آزاد بیشتر از جریان مستغرق می‌باشد.

محور افقی معرف فاصله قرارگیری آن از پنجه سرریز می باشد.



**Fig. 11** Effect of relative submersion on the longitudinal bed profile with a Q: (a) 30, (b) 40, (c) 50, (d) 60 and (e) 70 L/s

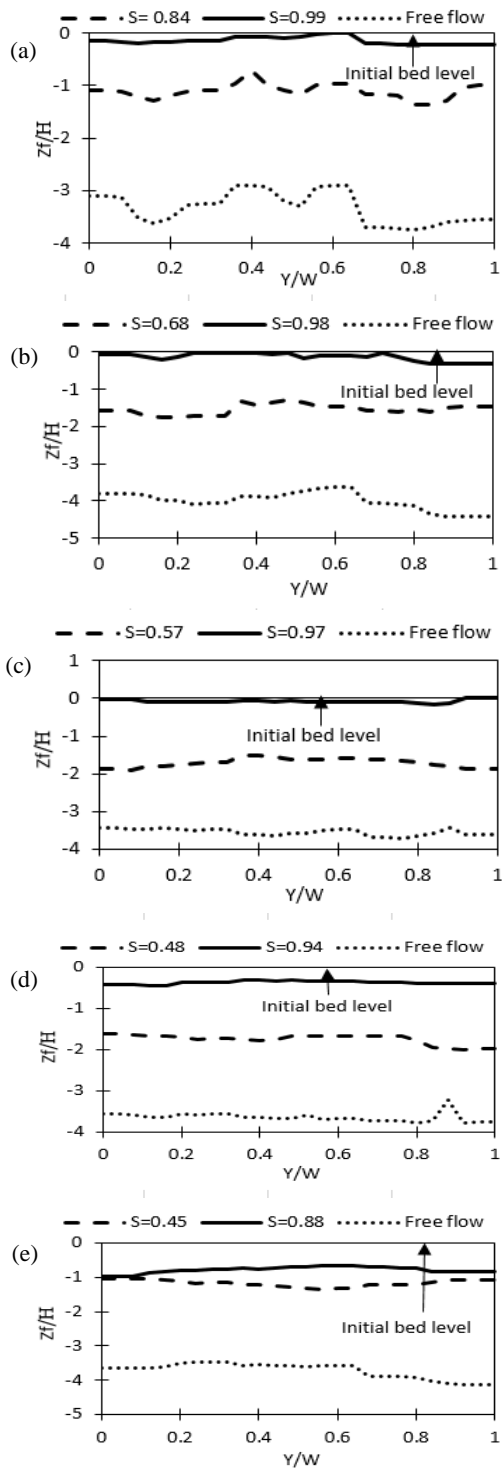
شکل ۱۱ اثرگذاری استغراق نسبی بر نیمرخ طولی بستر در دبی: (a) ۳۰، (b) ۴۰، (c) ۵۰، (d) ۶۰ و (e) ۷۰ لیتر بر ثانیه



**Fig. 10** Effect of densimetric Froude on longitudinal bed profile at tailwater depth: (a) 0.13, (b) 0.23 and (c) 0.29 m

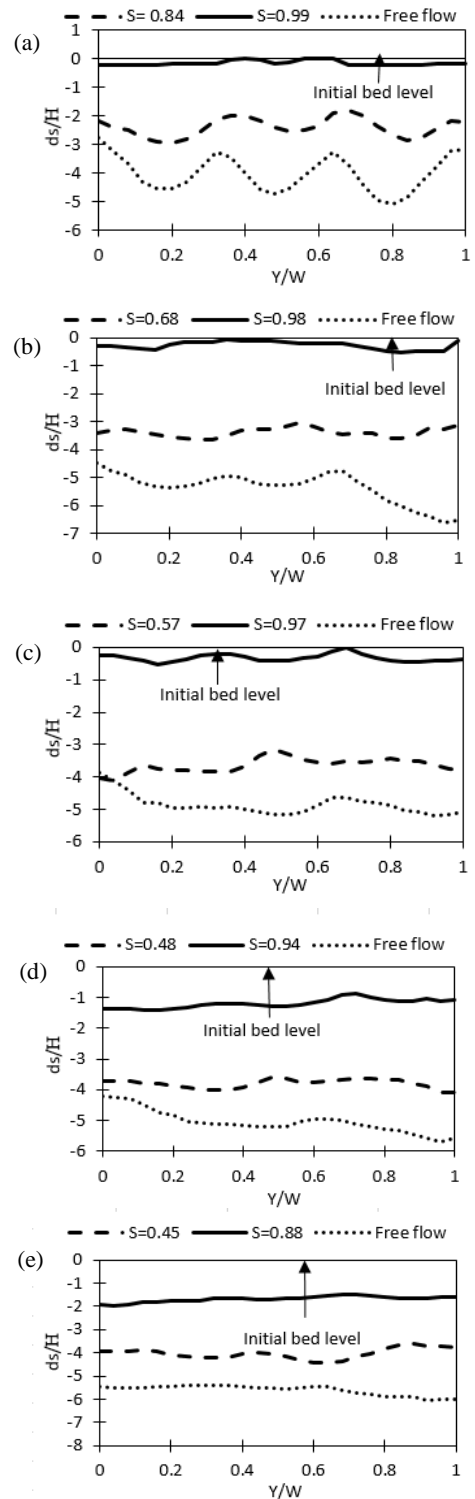
شکل ۱۰ تأثیر عدد فرود ذره بر نیمرخ طولی بستر در عمق پایاب: (a) ۰/۱۳، (b) ۰/۲۳ و (c) ۰/۲۹ متر

حفره‌ی آبشستگی در عرض آبراهه نسبت به دیگر آزمایش‌ها کمتر است و در نتیجه حجم مواد شسته شده کاهش یافته است. شکل (۱۳) نیز نشان می‌دهد، بیشترین کاهش تراز بستر در پنجه سرریز در جریان آزاد رخ داده است. زیرا در جریان آزاد، اختلاف انرژی بالادست و پایین دست سرریز بیشتر بوده و جریان با سرعت بیشتری به بستر برخورد کرده در نتیجه در این حالت، کاهش میزان آبشستگی بیشتر است. همچنین با توجه به آشفتگی بیشتر جریان در حالت آزاد، تغییرپذیری‌های بستر در این حالت بیشتر است. در شکل (۱۴) بیشینه عمق نسبی آبشستگی نسبت به محل رخداد آن نشان داده شده است. محور عمودی معرف بیشینه عمق آبشستگی نسبت به بار کل جریان در بالادست سرریز و



**Fig. 13** Typical lateral bed profiles in the vicinity of the weir toe with a Q: (a) 30, (b) 40, (c) 50, (d) 60 and (e) 70 L/s

شکل ۱۳ نمونه‌ای از نیمرخ عرضی بستر در مجاورت پاشنه‌ی سرریز در دبی: (a) ۳۰، (b) ۴۰، (c) ۵۰، (d) ۶۰ و (e) ۷۰ لیتر بر ثانیه



**Fig. 12** Typical lateral bed profiles with a Q: (a) 30, (b) 40, (c) 50, (d) 60 and (e) 70 L/s

شکل ۱۲ نمونه‌ای از نیمرخ‌های عرضی بستر در مقطع با بیشینه عمق آبستگي در دبی: (a) ۳۰، (b) ۴۰، (c) ۵۰، (d) ۶۰ و (e) ۷۰ لیتر بر ثانیه

آبستگي در جریان آزاد بین ۵/۰۶ الی ۶/۶ و در جریان مستغرق، بین ۲/۹ الی ۴/۴ در عمق پایاب ۰/۲۳ متر، و بین

بیشینه عمق آبستگي به میزان عدد فرود ذره و عمق نسبی پایاب بستگی دارد. تغییرات بیشینه عمق نسبی



لیتر بر ثانیه، بیشینه عمق نسبی آبشستگی به ترتیب ۹۲ و ۵۶ درصد کاهش می‌یابد. با توجه به شکل (۱۴) مشخص است که محل رخداد آبشستگی بیشینه نیز تابع عدد فرود ذره و عمق نسبی پایاب است. محل رخداد آبشستگی بیشینه در عمق پایاب ۰/۱۳ متر در فاصله‌ی ۰/۱۸ الی ۰/۳۰ متری از پاشنه‌ی سرریز، در عمق پایاب ۰/۲۳ متر در فاصله‌ی ۰/۱۸ الی ۰/۳۶ متری و در عمق پایاب ۰/۲۹ متر در فاصله‌ی ۰/۰۳ الی ۰/۳۰ متری از پنجه‌ی سرریز ایجاد شده است.

تأثیر عدد فرود ذره بر محل رخداد بیشینه عمق آبشستگی در عمق‌های پایاب مختلف در شکل (۱۵) ارائه شده است. همان‌طور که در شکل (۱۵) مشاهده می‌شود در عمق‌های پایاب ۰/۱۳، ۰/۲۳ و ۰/۲۹ متر، نسبت محل رخداد بیشینه عمق آبشستگی به هد جریان در بالادست سرریز بین ۳/۵۳-۵/۴۵، ۴/۷۷-۵/۳۷ و ۰/۳۳-۲/۹۴ متغیر است.

در شکل (۱۶) تأثیر عدد فرود ذره بر طول نسبی حفره‌ی آبشستگی در عمق‌های پایاب مختلف ارائه شده است. روشن است که با افزایش عدد فرود ذره، طول نسبی حفره‌ی آبشستگی افزایش یافته است. زیرا با افزایش عدد فرود ذره حجم مصالح شسته شده بیشتر است و طول حفره‌ی آبشستگی افزایشی است. در عمق پایاب ۰/۱۳ متر با افزایش ۱۳۳ درصدی عدد فرود ذره، طول نسبی حفره‌ی آبشستگی،

۰/۲۳ الی ۱/۹۵ در عمق پایاب ۰/۲۹ متر اندازه‌گیری شد. عمق پایاب یکی از فراسنجه‌های تأثیرگذار بر عمق آبشستگی می‌باشد. با افزایش عمق پایاب، میزان آبشستگی کاهش می‌یابد. در حقیقت عمق پایاب مانند یک بالشتک کشسانی عمل کرده که نقش زیادی در مستهلک کردن انرژی جت‌هایی که از کلیدهای خروجی بیرون می‌شوند دارند. لذا با افزایش عمق پایاب، عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. با افزایش عمق پایاب، نسبت استغراق در جریان مستغرق افزایش یافته به همین علت هر چقدر نسبت استغراق بیشتر شود، تغییرپذیری‌های عمق نسبی آبشستگی کاهش خواهد یافت. از سویی افزایش عمق پایاب سبب کاهش ارتفاع ریزش جریان شده و جریان با سرعت کمتری به بستر برخورد می‌کند. برآیند این موضوع و اثرگذاری کاهنده مومنوم ایجاد شده، سبب کاهش تغییرپذیری‌های بیشینه عمق نسبی آبشستگی با افزایش عمق پایاب می‌شود.

عمق نسبی آبشستگی با افزایش ۷۷ درصدی عمق پایاب برای دبی‌های ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ لیتر بر ثانیه به ترتیب ۴۲، ۴۵، ۲۱، ۲۸ و ۲۷ درصد و با افزایش ۱۲۳ درصدی عمق پایاب، به ترتیب ۹۵، ۹۲، ۹۰، ۷۵ و ۶۸ درصد کاهش می‌یابد. با افزایش ۱۸ درصدی نسبت استغراق در دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه و افزایش ۹۶ درصد نسبت استغراق در دبی ۷۰

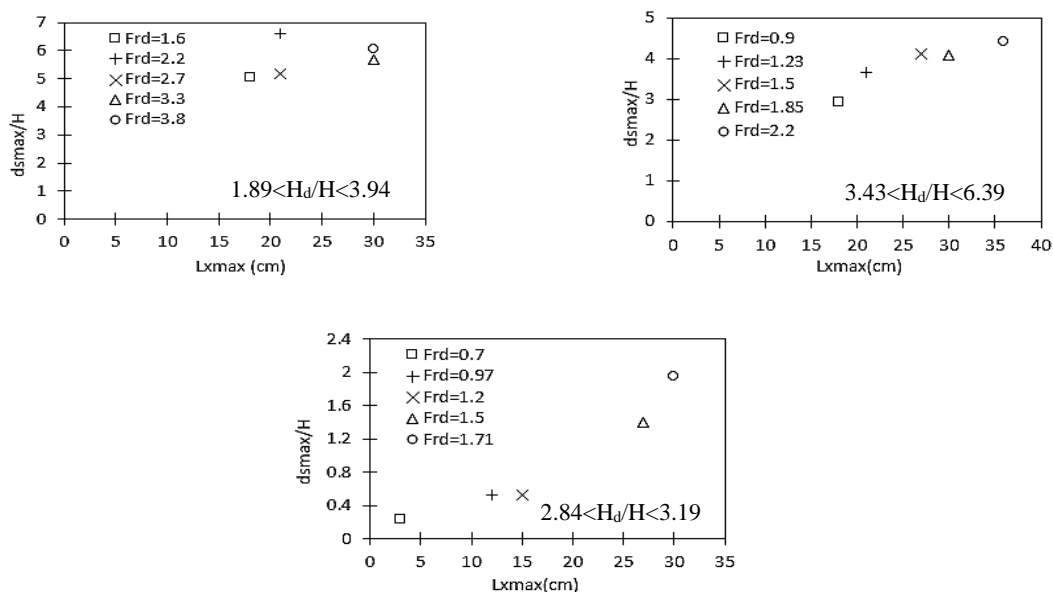


Fig. 14 Maximum scour depth and its location  
شکل ۱۴ بیشینه عمق آبشستگی نسبی و محل رخداد آن

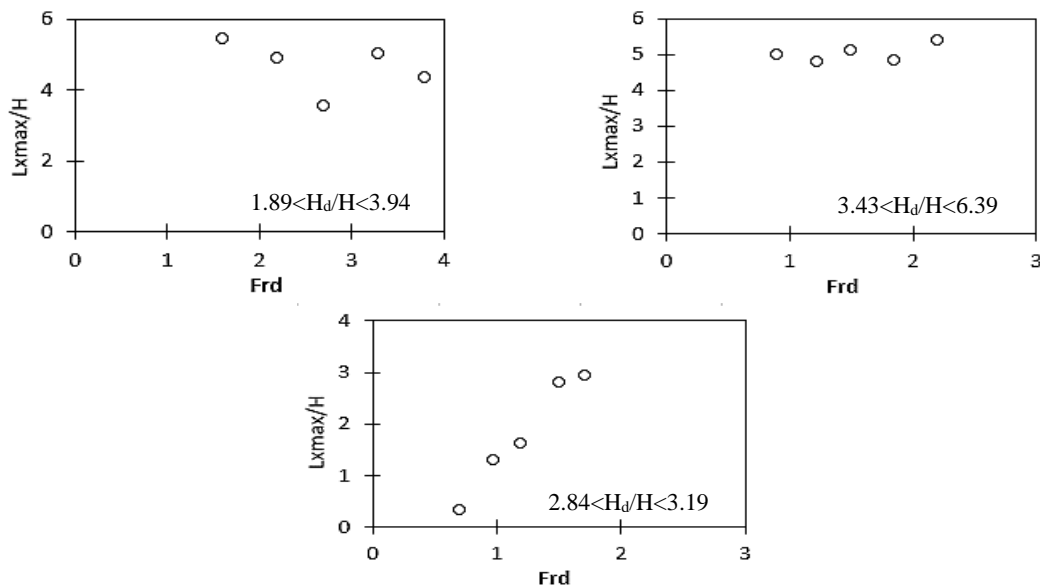


Fig. 15 Effect of densimetric Froude number on the location of maximum scour depth

شکل ۱۵ تاثیر عدد فرود ذره بر محل وقوع بیشینه عمق آبستگي

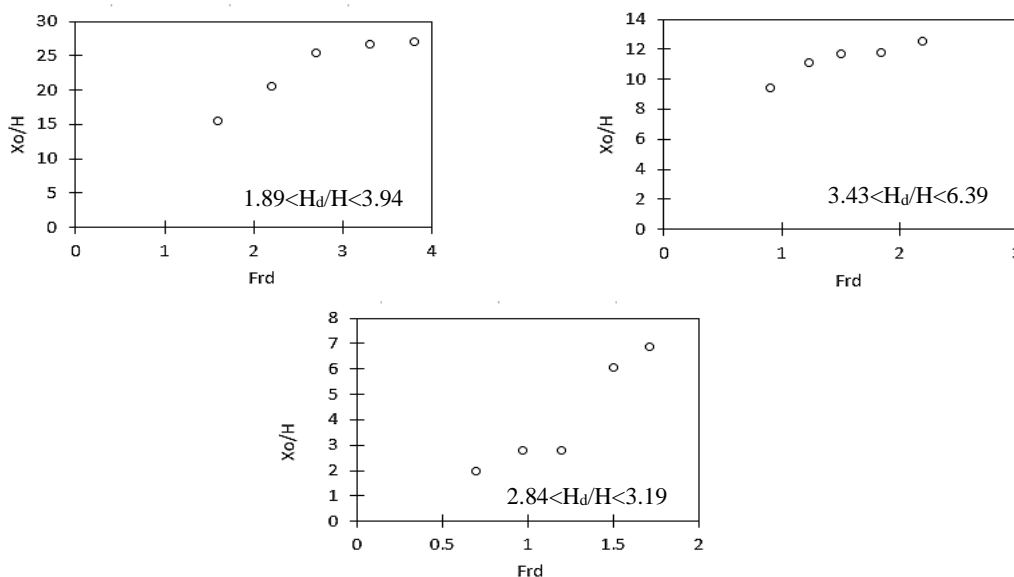


Fig. 16 Effect of densimetric Froude number on relative length of scour hole

شکل ۱۶ تأثیر عدد فرود ذره بر طول نسبی حفره‌ی آبستگي

کلیدپيانيوی در جریان آزاد و مستغرق بررسی شد. خلاصه‌ای از نتایج بدست آمده به شرح زیر است:

- آبستگي در جریان مستغرق و آزاد، از پنجه‌ی سرریز آغاز می‌شود.
- عمده‌ی تغییرپذیری‌های حفره‌ی آبستگي در جریان آزاد و مستغرق در ۲۰ درصد زمان اولیه آزمایش رخ می‌دهد.
- ابعاد حفره‌ی آبستگي در جریان آزاد بزرگ‌تر از ابعاد

۷۴/۴ درصد افزایش و در عمق‌های پایاب ۰/۲۳ و ۰/۲۹ متر به ترتیب ۳۲/۷ و ۲۴/۷ درصد افزایش یافته است. با افزایش ۷۷ و ۱۲۳ درصدی عمق پایاب، در دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه، طول نسبی حفره‌ی آبستگي ۳۹ و ۸۷ درصد کاهش یافته است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش آزمایشگاهی، آبستگي پایین دست سرریز

$d_{smax}$	بیشینه عمق حفره‌ی آبشستگی (m)	حفره‌ی آبشستگی در جریان مستغرق است.
$F_{rd}$	عدد فرود ذره (-)	• روند تغییرات بستر در جریان آزاد و مستغرق
$g$	شتاب ثقل ( $ms^{-2}$ )	تأحدودی همانند هم بوده، با این تفاوت که شدت
$H$	بار کل جریان روی سرریز در بالادست (m)	تغییرپذیری‌های آبشستگی در جریان آزاد بیشتر از
$H^*_d$	بار کل جریان روی سرریز در پایین دست پس از ایجاد استغراق (m)	جریان مستغرق می‌باشد.
$H_d$	بار کل جریان در پایین دست (m)	• با افزایش عدد فرود ذره، طول حفره‌ی آبشستگی
$h$	عمق جریان روی سرریز در بالادست (m)	افزایش یافته است.
$h_d$	عمق جریان در پایین دست در جریان آزاد (m)	• عمق نسبی آبشستگی با افزایش ۷۷ درصدی عمق
$h_s$	ارتفاع تپه‌ی رسوبی در پایین دست حفره آبشستگی (m)	پایاب برای دبی‌های ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ لیتر بر
$L$	طول بستر رسوبی پایین دست فلوم (m)	ثانیه، به ترتیب ۴۲، ۴۵، ۲۱، ۲۸ و ۲۷ درصد و با
$L_x$	فاصله محل عمق آبشستگی از پنجه‌ی سرریز در راستای جریان (m)	افزایش ۱۲۳ درصدی عمق پایاب، به ترتیب ۹۵، ۹۲، ۹۰
$L_{xmax}$	فاصله محل بیشینه عمق آبشستگی از پنجه‌ی سرریز در راستای جریان (m)	و ۶۸ درصد کاهش می‌یابد.
$N$	شمار سیکل‌های سرریز (-)	• با افزایش ۱۸ درصدی نسبت استغراق در عدد فرود
$P$	ارتفاع سرریز (m)	ذره ۰/۷ و افزایش ۹۶ درصد نسبت استغراق در عدد
$Q$	دبی جریان ( $m^3s^{-1}$ )	فرود ذره ۲/۲، بیشینه عمق آبشستگی نسبی به
$q$	دبی بر واحد عرض ( $m^2s^{-1}$ )	ترتیب ۹۲ و ۵۶ درصد کاهش می‌یابد.
$S$	نسبت استغراق (-)	• محل رخداد بیشینه آبشستگی نسبی نیز تابع عدد
$t$	زمان از آغاز آبشستگی (min)	فرود ذره و عمق پایاب است. در عمق پایاب ۰/۱۳
$t_e$	زمان تعادل آبشستگی (min)	متر، در فاصله‌ی بین ۰/۱۸ الی ۰/۳۰ متری از
$T_s$	ضخامت سرریز (m)	پاشنه‌ی سرریز، در عمق پایاب ۰/۲۳ متر در فاصله‌ی
$W$	عرض کل سرریز (m)	بین ۰/۱۸ الی ۰/۳۶ متری و در عمق پایاب ۰/۲۹ متر
$W_i$	عرض کلید ورودی (m)	در فاصله‌ی ۰/۰۳ الی ۰/۳۰ متری از پنجه‌ی سرریز
$W_o$	عرض کلید خروجی (m)	ایجاد شده است.
$X$	فاصله از پنجه‌ی سرریز در راستای جریان (m)	• نیم‌رخ عرضی بستر در میانه‌ی بستر دارای آبشستگی
$X_o$	طول حفره‌ی آبشستگی (m)	کمتری است.
$Y$	فاصله‌ی عرضی از دیواره‌ی فلوم (m)	• با افزایش نسبت استغراق، بیشینه عمق آبشستگی
$Z_f$	عمق آبشستگی در مجاورت پنجه‌ی سرریز (m)	کاهش می‌یابد.
$\rho$	جرم مخصوص سیال ( $kgm^{-3}$ )	• با افزایش عدد فرود ذره، طول حفره‌ی آبشستگی
$\rho_s$	جرم مخصوص ذرات رسوب ( $kgm^{-3}$ )	افزایش می‌یابد.
$\Delta H$	اختلاف بار آبی در بالادست و پایین دست سرریز (m)	

## ۵- فهرست نشانه‌ها

B	طول دیوار جانبی سرریز (m)
$B_i$	طول پیشانی کلیدهای ورودی سرریز (m)
$B_o$	طول پیشانی کلیدهای خروجی سرریز (m)
$d_{50}$	قطر میانگین ذرات رسوب (mm)
$d_s$	عمق حفره‌ی آبشستگی (m)

## ۶- منبع‌ها

Abhash, A. and Pandey, K.K. (2021). Numerical study of discharge-head relationship of piano key

- Karimi, M.J., Attari, M. and Saneie, M.R.J. (2019). Ghazizadeh, Side weir flow characteristics: Comparison of piano key, labyrinth, and linear types, *J. Hydraul. Eng.*, 144(12), 04018075.
- Kumar, V., Ranga Raju, K.G. and Vittal, N. (1999). Reduction of local scour around bridge piers using slot and collar. *Journal of Hydraulic Eng.*, ASCE, 125(12), 1302–1305
- Kumar, B. and Ahmad, Z. (2020). Experimental Study on Scour Downstream of a Piano Key Weir with Nose. 8th IAHR ISHS, Santiago, Chile.
- Laugier, F. (2007). Design and construction of the first piano key weir (PKW) spillway at the Goulours dam. *International Journal of Hydropower and Dams*, 14(5), 94-101.
- 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.
- Lempérière, F., Vigny, J.P. and Ouamane, A. (2011). General comments on Labyrinth and Piano Key Weirs: The past and present. *Proc. Int. Conf. Labyrinth and Piano Key Weirs Liège B*, 17-24.
- Machiels, O. (2012). Experimental study of the hydraulic behavior of piano key weirs, PhD Dissertation, Faculty of Applied Science, University of Liège.
- Machiels, O., Erpicum, S., Archambeau, P., Dewals, B.J. and Pirotton, M. (2012). Piano Key weir preliminary design method: Application to a new dam project. *Proc. Int. conf. Labyrinth and Piano Key Weirs Liege B*, 199-206.
- Machiels, O., Erpicum, S., Dewals, B., Archambeau, P. and Pirotton, M. (2011). Experimental observation of flow characteristics over a Piano Key Weir. *Journal of hydraulic research*, 49(3), 359-366.
- Moradi, S., Shahsavari, H. and Esmaili, K. (2020). Investigate Foundation Local Scour Type-A Piano Key Weirs with Zigzag Sidewall, *Journal of Hydraulics*, 15(4), 81-94. (In Persian)
- 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.
- Pfister, M., Battisacco, E., De Cesare, G. and Schleiss, A.J. (2013). Scale effects related to the rating curve of cylindrically crested piano key weirs. *Labyrinth and piano key weirs II*, CRC/Balkema, Leiden, Netherlands, 73–82.
- weirs for low heads. *Water Resources*, 48(2), 235-244.
- Abdi Chooplou, Ch, Bodaghi, E. Ghodsian, M. and Vaghefi, M. (2022a). Temporal evolution of scouring downstream of a trapezoidal piano key weir. *International Journal of River Basin Management*, 1-14.
- Abdi Chooplou, Ch. Kazerooni, S. Ghodsian, M. and Vaghefi, M. (2022b). Experimental study of scouring downstream of type-A piano key weirs. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(23), 1-14.
- Ahmadi Dehrashid, F. and Gohari, S. (2019). Experimental Study of Downstream Scour of Piano Keys Weirs, *J. of Water and Soil Conservation*, 26(1), 91-109. (In Persian)
- 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*.
- Bodaghi, E. Ghodsian, M. and Abdi Chooplou, Ch. (2021). Experimental study on the effect of discharge and tailwater depth on scour downstream of a type-A piano key weir. 20th Iran Hydraulic Conference, Gorgan University, Iran. (In Persian)
- Dabling, M.R. and Tullis, B.P. (2012). Piano key weir submergence in channel application. *J. Hydraulic Eng.*, 138(7), 661-666.
- Erpicum, S., Nagel, V., Laugier, F. (2011). Piano Key Weir design of Raviege dam. *Labyrinth and piano key weirs-PKW 2011*, CRC press, London, 43-50.
- Ghodsian, M., Abdi Chooplou, Ch. and Ghafouri, A. (2021). Scouring downstream of Triangular and Trapezoidal Pianos Key Weir, *Journal of Hydraulics*, 16(2), 43-58. (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 scours downstream of a piano key weir. *J. Hydraulic Eng.*, 142(11), 04016043.
- Kabiri-Samani, A. and Javaheri, A. (2012). Discharge coefficients for free and submerged flow over Piano Key weirs. *J. Hydraulic Res.*, 50(1), 114-120.

Safarzadeh, A. and Noroozi, B. (2015). 3D hydrodynamics of trapezoidal Piano Key Spillways. *J. Hydraulic Eng.*, 15(1), 89-101.

Yazdi, A.R., Hoseini, S.A., Nazari, S. and Amanian, N. (2020). Comparison of Downstream Scour of the Rectangular and Trapezoidal Piano Key Weirs, *Journal of Hydraulics*, 15(2), 95-102. (In Persian)