

Experimental Investigation of Local Scour Downstream of a Type B Piano Key Weir on Sand and Gravel Bed Materials

Leyla Babakhah¹, Ali Khoshfetrat^{2*}  and Ehsan Delavari¹

(Received: December 27-2024; Revised: January 22-2025; Accepted: February 24-2025)

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

*: Corresponding author Email: khoshfetrat@khuisf.ac.ir

Abstract

Piano key weirs are a new form of labyrinth weirs and exhibit nonlinear characteristics. Due to their high efficiency regarding flow capacity, it is crucial to investigate local scour and identify solutions to mitigate it. Local scour was examined downstream of a trapezoidal piano key weir type B for the first time in this study. The weir was installed 5.50 m from the start of the channel and has a height of 0.20 m, featuring three cycles (three outlet keys, two inlet keys, and two inlet half keys). Three tailwater depths and three different flow rates were also utilized. The maximum scour depth increases with a higher densimetric Froude number and flow rate while decreasing with tailwater depth. The range of the dimensionless parameter for the densimetric Froude number in this study varies between 1 and 2. Additionally, sand and gravel were employed as two types of bed materials. As the diameter of the bed material increases, the maximum scour depth decreases. The scour index for gravel bed material is significantly lower than that for sand material, indicating that the risk of weir overturning is much lower in gravel bed material.

Keywords: Experimental investigation, Piano key weir (PKW), Trapezoidal, Type B, Scour index

How to cite this article: Babakhah, L., Khoshfetrat, A. and Delavari, E. 2025. Experimental Investigation of Local Scour Downstream of a Type B Piano Key Weir on Sand and Gravel Bed Materials. *J. Water and Soil Sci.* 29(1):183-193. DOI: [10.47176/jwss.29.1.60372](https://doi.org/10.47176/jwss.29.1.60372)

Copyright © 2025 Babakhah et al. Published by Isfahan University of Technology.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

بررسی آزمایشگاهی آبشستگی موضعی پایین دست سرریز کلیدپیانویی نوع B در مصالح بستر شن و ماسه

لیلا باباخواه^۱، علی خوش فطرت^{۲*}  و احسان دلاوری^۱

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۶)

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.
 ۲. گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.
- *: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: khoshfetrat@khuisf.ac.ir

چکیده

سرریزهای کلیدپیانویی شکل جدیدی از سرریزهای منقاری و به صورت غیرخطی هستند. به دلیل راندمان زیاد این سرریزها در ظرفیت عبور جریان، بررسی آبشستگی موضعی و راهکار برای کاهش آن دارای اهمیت فراوانی است. در پژوهش حاضر، برای اولین بار به بررسی آبشستگی موضعی در پایین دست سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع B پرداخته شد. سرریز در فاصله ۵/۵۰ متری از ابتدای کانال نصب شد و دارای ارتفاع ۰/۲۰ متر و سه سیکل (سه کلید خروجی، دو کلید ورودی و دو نیم کلید ورودی) است. از سه عمق پایاب و سه دبی جریان مختلف نیز استفاده شد. با افزایش عدد فرود ذرات و دبی جریان و کاهش عمق پایاب، بیشینه عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. محدوده پارامتر بدون بعد عدد فرود ذرات در پژوهش حاضر بین ۱ تا ۲ متغیر است. همچنین از دو مصالح بستر شن و ماسه استفاده شد. با افزایش قطر مصالح بستر، بیشینه عمق آبشستگی کاهش خواهد یافت. شاخص آبشستگی در مصالح بستر شن به مراتب کمتر از مقدار شاخص آبشستگی در مصالح ماسه بوده و به این معنا است که خطر واژگونی سرریز در مصالح بستر شن بسیار کمتر است.

واژه‌های کلیدی: بررسی آزمایشگاهی، سرریز کلیدپیانویی، دوزنقه‌ای، نوع B، شاخص آبشستگی

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. ۱۴۰۴ ©.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط به استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است: (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



مقدمه

سرریزهای کلیدپیانویی شکل جدیدی از سرریزهای غیرخطی هستند که ظرفیت عبور جریان بیشتری نسبت به دیگر سرریزهای مشابه دارند. این سرریزها دارای شکل‌های مستطیلی، مثلثی و دوزنقه‌ای در پلان و دارای چهار مدل A، B، C و D هستند. نوع A دارای لبه‌های آویزان در بالادست و پایین دست سرریز، نوع B دارای لبه‌های آویزان در بالادست، نوع C دارای لبه‌های آویزان در پایین دست و نوع D فاقد لبه‌های آویزان است. سرریزهای کلیدپیانویی دارای فونداسیون سبکی هستند و علاوه بر سدها، در کانال‌ها و رودخانه‌ها نیز جای می‌گیرند (۸ و ۱۹). به دلیل راندمان زیاد این سرریزها، بررسی آبشستگی موضعی و راهکار برای کاهش آن و همچنین افزایش اتلاف انرژی در آن‌ها دارای اهمیت فراوانی است. در ادامه و به صورت مختصر به تعدادی از مطالعات موجود برای آبشستگی موضعی در پایین دست سرریزهای کلیدپیانویی پرداخته می‌شود. بسیاری از پژوهشگران تأثیر جریان و قطر مصالح بستر را بر آبشستگی موضعی در پایین دست سرریزهای کلیدپیانویی بررسی کردند. جاستریچ و همکاران (۲۰۱۶)، غفوری و همکاران (۲۰۲۰)، دهرشید و همکاران (۲۰۲۲)، عبدی چوپلو و همکاران (۲۰۲۳)، بدای و همکاران (۲۰۲۳ و ۲۰۲۴)، دهقان و کرمی (۲۰۲۴) و عبدی چوپلو و همکاران (۲۰۲۴)، روی آبشستگی موضعی پایین دست سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی و دوزنقه‌ای نوع A و D تأثیر دبی جریان، عمق پایاب، فاصله ریزش جریان، دانه‌بندی مصالح بستر، حالت جریان آزاد و مستغرق را به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی کردند (۱۴، ۱۰، ۷، ۳، ۴، ۵، ۶ و ۱). آن‌ها دریافتند که با افزایش دبی جریان، سرعت جریان و تنش برشی افزایش یافته و در نهایت باعث افزایش سرعت جت‌های خروجی از سرریز شده و بیشینه عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. با افزایش عمق پایاب سرعت جریان کاهش یافته و در نهایت بیشینه عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. با افزایش فاصله ریزش، جریان با قدرت بیشتری تحت ثقل به بستر پایین دست ریخته و قدرت گردابه‌های پایین دست سرریز را افزایش می‌دهد. با افزایش قطر

متوسط مصالح بستر، سرعت جریان به راحتی نمی‌تواند مصالح را جابه‌جا کند و همین امر باعث کاهش بیشینه عمق آبشستگی می‌شود. در حالت جریان مستغرق نیز اغتشاش جریان و قدرت گردابه‌ها به مراتب کاهش می‌یابند و همین امر باعث کاهش بیشینه عمق آبشستگی می‌شود. در پژوهش حاضر و با توجه به مطالعات یادشده، از دبی جریان، عمق پایاب و مصالح بستر متفاوت در حالت جریان آزاد استفاده شد. بسیاری دیگر از پژوهشگران نیز تأثیر هندسه سرریزهای کلیدپیانویی را بر بیشینه عمق آبشستگی بررسی کردند. گوهری و احمدی (۲۰۱۹)، یزدی و همکاران (۲۰۲۰ و ۲۰۲۲)، قدسیان و همکاران (۲۰۲۱) و جمال و همکاران (۲۰۲۲)، آبشستگی موضعی پایین دست سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی، دوزنقه‌ای و مثلثی را مطالعه کردند (۱۲، ۲۲، ۲۳، ۱۱ و ۱۳). آن‌ها دریافتند که بیشینه عمق آبشستگی در سرریزهای کلیدپیانویی دوزنقه‌ای به مراتب کمتر از مستطیلی و مثلثی است. همچنین دریافتند که فاصله بیشینه عمق آبشستگی در سرریزهای کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نیز به مراتب بیشتر است و خطر واژگونی سرریز را می‌تواند کاهش دهد. همچنین تعداد کلیدهای سرریز، ارتفاع سرریز و نسبت عرض کلیدهای ورودی به خروجی را بررسی کردند و دریافتند که با افزایش تعداد کلیدهای سرریز، ارتفاع آن و افزایش نسبت عرض کلیدهای ورودی به خروجی، بیشینه عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. در پژوهش حاضر نیز از سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای با ارتفاع ۰/۲۰ متر و با نسبت عرض کلیدهای ورودی به خروجی ۲/۸۷ استفاده شد. بسیاری دیگر از پژوهشگران نیز تأثیر سازه‌های اضافی روی تاج، کلیدهای خروجی و پایین دست سرریزهای کلیدپیانویی را بر بیشینه عمق آبشستگی بررسی کردند. کومار و احمد (۲۰۲۰)، لتز و همکاران (۲۰۲۱)، رضیوی و همکاران (۲۰۲۳)، فتحی و همکاران (۲۰۲۴)، عبدی چوپلو و همکاران (۲۰۲۴) و مشالی و همکاران (۲۰۲۴)، از کف‌بند، پله، بافل و جامپ اسکی در سرریزهای کلیدپیانویی استفاده کردند (۱۵، ۱۶، ۲۰، ۸ و ۱۷). آن‌ها دریافتند که وجود کف‌بند باعث کاهش بیشینه عمق

بالادست سرریز، V_2 سرعت جریان در پایین دست سرریز، h عمق جریان در بالادست نسبت به تاج سرریز، y عمق پایین دست سرریز (عمق پایاب)، P ارتفاع سرریز، P_d ارتفاع مصالح بستر نسبت به کف کانال، E_1 انرژی مخصوص جریان در بالادست سرریز و E_2 انرژی مخصوص جریان در پایین دست سرریز هستند. همچنین معرفی پارامترهای مؤثر بر آبشستگی موضعی پایین دست سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای مطابق آنالیز ابعادی پژوهش فتحی و همکاران (۲۰۲۴) در نظر گرفته شده است (۸).

$$X, Z = f(q, H, Y, g, \sigma, \mu, \rho, \Delta\rho, d_{50}) \quad (1)$$

با در نظر گرفتن سه پارامتر تکراری q ، H و ρ و با استفاده از تئوری π باکینگهام، پارامترهای مؤثر بر آبشستگی موضعی پایین دست سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع B ، مطابق معادله (۲) خواهد شد.

$$\frac{X}{H}, \frac{Z}{H} = f\left(\frac{Y}{H}, Fr, Re, We, \frac{\Delta\rho}{\rho}, \frac{d_{50}}{H}\right) \quad (2)$$

در معادله (۲)، $(Fr = q / (gH^3)^{0.5})$ عدد فرود جریان است. با توجه به عدد رینولدز $(Re = q\rho / \mu)$ بزرگ‌تر از ۴۰۰۰ و وجود جریان کاملاً آشفته و همچنین به دلیل عمق کافی جریان روی تاج سرریز (بیشتر از ۰/۳ متر)، از عدد وبر $(We = q^2\rho / H\sigma)$ و عدد رینولدز صرف نظر خواهد شد (۱۸ و ۲۱). با ترکیب Fr ، d_{50} / H و $\Delta\rho / \rho$ پارامتر $F^* = q / (H(g(\Delta\rho / \rho)d_{50})^{0.5})$ به دست می‌آید که به آن عدد فرود ذرات می‌گویند. با این حال، پارامترهای مؤثر بر آبشستگی موضعی پایین دست سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع B مطابق معادله (۳) خواهد شد. همچنین به دلیل ثابت بودن پارامتر $\Delta\rho / \rho$ به دلیل طبیعی بودن مصالح شن و ماسه و حضور آن در پارامتر F^* از آن صرف نظر شد.

$$\frac{X}{H}, \frac{Z}{H} = f\left(\frac{Y}{H}, F^*\right) \quad (3)$$

مواد و روش‌ها

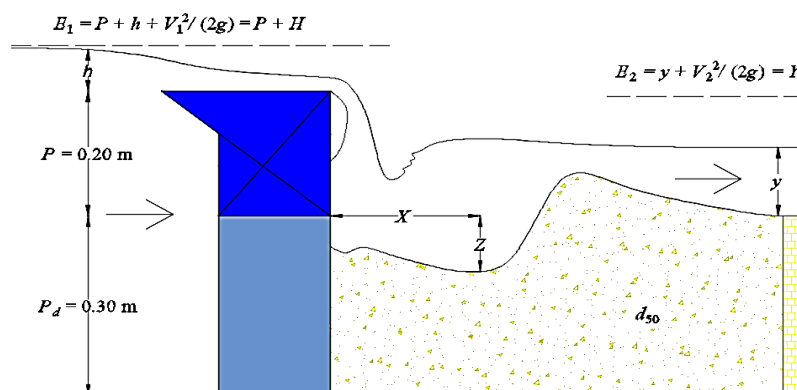
آزمایش‌ها در یک کانال به طول ۱۰ متر، ارتفاع ۱/۲ متر و عرض ۰/۸ متر انجام شد. جریان توسط یک مخزن زیرزمینی تأمین می‌شد.

آبشستگی می‌شود. پله و بافل در کلیدهای خروجی سرریز نیز باعث کاهش سرعت جریان داخل کلیدهای خروجی می‌شود و بیشینه عمق آبشستگی را کاهش می‌دهد. وجود پله و بافل مانند مانع و زبری در کلیدهای خروجی عمل کرده و باعث کاهش قدرت گردابه‌های موجود در کلیدهای خروجی می‌شوند. وجود جامپ نیز باعث افزایش ریزش جریان به فاصله دورتری از پنجه سرریز شده و بیشینه عمق آبشستگی را کاهش داده و از پنجه سرریز دورتر می‌کند.

با توجه به مطالعات موجود روی آبشستگی موضعی پایین دست سرریزهای کلیدپیانویی همچنان به بررسی آبشستگی موضعی در این سرریزها نیاز است. در مطالعه حاضر و برای اولین بار از سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع B استفاده شد. همچنین از سه دبی مختلف جریان، سه عمق پایاب مختلف و دو قطر مصالح بستر شن و ماسه استفاده شد. در ادامه از آنالیز ابعادی برای بسط نتایج پژوهش حاضر به طبیعت نیز استفاده شد. با کمک گرفتن از آنالیز ابعادی در پژوهش حاضر می‌توان نتایج را به سرریزهای موجود در کانال‌ها و رودخانه‌ها و دیگر انواع سرریزهای کلیدپیانویی (نوع A ، C و D) تعمیم داد.

آنالیز ابعادی

معادله (۱)، پارامترهای مؤثر بر آبشستگی موضعی پایین دست سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع B را نشان می‌دهد. در این معادله، X فاصله بیشینه عمق آبشستگی نسبت به پنجه سرریز، Z بیشینه عمق آبشستگی، q دبی در واحد عرض جریان در بالادست سرریز، H عمق جریان در بالادست نسبت به تاج سرریز به علاوه ارتفاع نظیر انرژی جنبشی، Y عمق جریان در پایین دست نسبت به پنجه سرریز به علاوه ارتفاع نظیر انرژی جنبشی، g نیروی گرانش، σ ضریب کشش سطحی، μ لزجت دینامیکی، ρ چگالی جریان، $\Delta\rho$ اختلاف چگالی مصالح بستر با چگالی جریان و d_{50} قطر متوسط مصالح بستر هستند. شکل ۱ نیز آبشستگی موضعی پایین دست سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع B را نشان می‌دهد. در این شکل، V_1 سرعت جریان در



شکل ۱. پارامترهای مؤثر بر آبستگي موضعی در پایین دست سرریز کلیدپیانویی ذوزنقه‌ای نوع B

شکل ۳، سرریز کلیدپیانویی ذوزنقه‌ای نوع B استفاده شده در پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.

از دو مصالح بستر شن و ماسه نیز استفاده شد. قطر متوسط مصالح بستر شن برابر ۰/۰۷۵ متر و قطر متوسط مصالح بستر ماسه برابر ۰/۰۳۵ متر است. در پژوهش جاستریچ و همکاران (۲۰۱۶) مقدار d_{50}/P بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۴ متغیر است. در پژوهش حاضر نیز مقدار d_{50}/P برای مصالح شن و ماسه به ترتیب برابر ۰/۰۳۷۵ و ۰/۰۱۷۵ است (۱۴). مصالح بستر غیر چسبنده و دارای چگالی ۲۶۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب هستند. در بیشترین دبی و کمترین عمق پایاب، تغییرات آبستگي در مصالح بستر شن و ماسه در زمان‌های ۱۵۰ و ۲۷۰ دقیقه کمتر از ۱ میلی‌متر شد و این زمان‌ها به عنوان زمان تعادل در نظر گرفته شدند (۸). ضریب یکنواختی مصالح بستر $\left(\sigma_g = (dg_4/d_{16})^{0.5}\right)$ نیز کمتر از ۱/۵ است؛ پس مصالح بستر به صورت یکنواخت هستند (۸). از یک صفحه فلزی برای پوشاندن بستر استفاده شد. پس از تنظیم دبی جریان و عمق پایاب، صفحه فلزی به آرامی از روی بستر جدا شد و پس از گذشت زمان تعادل، پمپ خاموش شد. پس از زهکشی کامل مصالح بستر، توپوگرافی بستر توسط متر لیزی در ابعاد ۰/۰۳ در ۰/۰۳ متر برداشت شد. جدول ۱ مشخصات تست‌های آزمایشگاهی انجام شده را نشان می‌دهد. ۹ تست برای مصالح بستر شن و ۹ تست برای مصالح بستر ماسه انجام شد.

توسط یک پمپ با خطای ۰/۰۱ درصد و دستگاه PLC وارد آرام‌کننده‌های جریان شده و پس از طی ۵/۵۰ متر وارد سرریز می‌شد. شیب کانال برابر صفر است. دمای آب درون کانال بین ۸ تا ۱۳ درجه متغیر است. عمق جریان در بالادست و پایین دست سرریز به ترتیب در فاصله‌های دو و هشت برابر ارتفاع سرریز نسبت به مرکز آن، توسط سنسورهای آلتراسونیک اندازه‌گیری شدند. شکل ۲-الف کانال آزمایشگاهی و شکل ۲-ب سنسورهای آلتراسونیک را نشان می‌دهد. سنسور اول عمق بالادست سرریز، سنسور دوم عمق پایاب و سنسور سوم، عمق روی تاج سرریز را روی مانیتور موجود در دستگاه PLC نمایش می‌دهد. سنسورها عمق جریان را با خطای ۰/۰۰۱ متر نمایش می‌دهند. عمق پایاب توسط دریچه انتهایی و به میزان ۰/۰۵، ۰/۱۰ و ۰/۱۵ متری تنظیم شد. عمق پایاب به نحوی انتخاب شد که سرریز مستغرق نشود و جریان به صورت آزاد باشد (۸). از سه دبی ۰/۰۳۰، ۰/۰۳۵ و ۰/۰۴۰ مترمکعب بر ثانیه نیز استفاده شد.

از یک سرریز کلیدپیانویی ذوزنقه‌ای نوع B با ارتفاع ۰/۲۰ متر استفاده شد. جنس سرریز از ورق فلزی بسیار مقاوم است. عرض کلیدهای ورودی و خروجی سرریز به ترتیب برابر ۰/۲۱۵ و ۰/۰۷۵ متر، طول دیوارهای جانبی آن ۰/۴۰ متر، طول لبه‌های آویزان ورودی آن ۰/۱۵ متر، ضخامت آن ۰/۰۱ متر و طول تاج آن برابر ۳/۲۷ متر است.

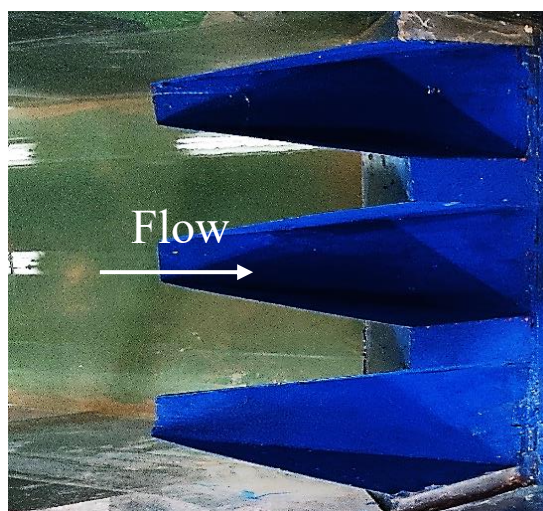


(ب)



(الف)

شکل ۲. الف) کانال آزمایشگاهی، ب) سنسورهای آلتراسونیک



شکل ۳. سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع B

جدول ۱. مشخصات هیدرولیکی آزمایش‌های انجام‌شده در پژوهش حاضر

Q (m ³ /s)	H (m)	Y (m)	d ₅₀ (m)	H/Y	F* (sand)	F* (gravel)
۰/۰۳۰	۰/۰۴۷	۰/۱۰۱	۰/۰۰۷۵ - ۰/۰۰۳۵	۰/۴۶۷	۰/۸۰۴	۰/۵۴۹
۰/۰۳۵	۰/۰۵۴	۰/۱۱۹	۰/۰۰۷۵ - ۰/۰۰۳۵	۰/۴۵۰	۰/۷۶۰	۰/۵۱۹
۰/۰۴۰	۰/۰۶۱	۰/۱۴۱	۰/۰۰۷۵ - ۰/۰۰۳۵	۰/۴۳۷	۰/۷۱۰	۰/۴۸۵
۰/۰۳۰	۰/۰۴۷	۰/۱۱۳	۰/۰۰۷۵ - ۰/۰۰۳۵	۰/۴۱۸	۰/۶۸۲	۰/۴۶۶
۰/۰۳۵	۰/۰۵۴	۰/۱۱۷	۰/۰۰۷۵ - ۰/۰۰۳۵	۰/۴۵۸	۰/۷۷۹	۰/۵۳۲
۰/۰۴۰	۰/۰۶۱	۰/۱۲۳	۰/۰۰۷۵ - ۰/۰۰۳۵	۰/۵۰۱	۰/۸۷۱	۰/۵۹۵
۰/۰۳۰	۰/۰۴۷	۰/۱۵۶	۰/۰۰۷۵ - ۰/۰۰۳۵	۰/۳۰۳	۰/۴۲۱	۰/۲۸۷
۰/۰۳۵	۰/۰۵۴	۰/۱۵۸	۰/۰۰۷۵ - ۰/۰۰۳۵	۰/۳۴۱	۰/۵۰۰	۰/۳۴۲
۰/۰۴۰	۰/۰۶۱	۰/۱۶۰	۰/۰۰۷۵ - ۰/۰۰۳۵	۰/۳۸۴	۰/۵۸۵	۰/۳۹۹

نتایج و بحث

جریان به صورت جت آزاد از روی کلیدهای ورودی به پایین دست و داخل کلیدهای خروجی سرریز می ریخت. همچنین جریان از طریق کلیدهای خروجی به صورت جت مایل و شیب دار به پایین دست منتقل می شد. در ابتدای کلیدهای خروجی، ناحیه استغراق موضعی شکل می گرفت که پس از آن به صورت یک جت پر قدرت وارد بستر پایین دست می شد. جریان خروجی از کلیدهای ورودی با جریان داخل کلیدهای خروجی در کنار دیواره کلیدها مخلوط شده و گردابه هایی به صورت ساعتگرد و پادساعتگرد تشکیل می دادند. این گردابه ها به صورت سطحی وارد بستر پایین دست شده و جریان وارده به بستر پایین دست بسیار پر قدرت بوده و باعث ایجاد گردابه هایی می شدند. این گردابه ها و چرخش جریان باعث شسته شدن مصالح بستر شده و مصالح را به پایین دست منتقل می کردند. جت پر قدرت وسط کلیدهای خروجی به سرعت بسیار زیادی وارد بستر شده و مانند چنگک مصالح را با خود به پایین دست منتقل می کند. شکل ۴، حفره آبستنگی و گردابه های موجود در پایین دست سرریز کلیدپیانویی دوزنقه ای نوع B را در دبی ۰/۳۰ مترمکعب بر ثانیه و عمق پایاب ۰/۱۰ متر نشان می دهد.

شکل ۵، تأثیر دبی جریان، عمق پایاب و قطر متوسط مصالح بستر را بر بیشینه عمق آبستنگی نشان می دهد. با توجه به شکل ۵-الف، با افزایش دبی جریان، سرعت جریان نیز افزایش یافته و قدرت جت ها و گردابه ها نیز افزایش می یابند (۹). با افزایش قدرت سرعت جریان نیز تنش برشی روی مصالح بستر افزایش می یابد. افزایش قدرت جت ها و تنش برشی باعث افزایش بیشینه عمق آبستنگی می شود و مصالح به راحتی به پایین دست منتقل می شوند. همچنین با افزایش دبی جریان، عدد فروود جریان و عدد فروود ذرات نیز افزایش می یابند. با توجه به شکل ۵-ب، با افزایش عمق پایاب، بیشینه عمق آبستنگی کاهش می یابد و دلیل آن مانند مانع عمل کردن عمق پایاب و کاهش فاصله انتقال جت ها به پایین دست است. شکل ۵-ج نیز تأثیر قطر متوسط ذرات بستر را بر بیشینه عمق آبستنگی نشان می دهد. با افزایش قطر متوسط

ذرات بستر (مصالح شن)، بیشینه عمق آبستنگی کاهش می یابد. دلیل آن افزایش وزن ذرات بستر و کاهش تنش برشی موجود در روی مصالح بستر است. با افزایش وزن ذرات، جریان نمی تواند به راحتی آن ها را به پایین دست منتقل کند.

شکل ۶-الف، تأثیر دبی جریان را بر فاصله بیشینه عمق آبستنگی نسبت به پنجه سرریز نشان می دهد. با افزایش دبی جریان، قدرت جت ها و گردابه ها افزایش یافته و به فاصله ای دورتر نسبت به پنجه سرریز ریخته و به همین دلیل فاصله بیشینه عمق آبستنگی نسبت به پنجه سرریز بیشتر می شود. شکل ۶-ب، تأثیر عمق پایاب را بر فاصله بیشینه عمق آبستنگی نسبت به پنجه سرریز نشان می دهد. با افزایش عمق پایاب، قدرت جت ها در پایین دست سرریز کاهش یافته و فاصله بیشینه عمق آبستنگی نسبت به پنجه سرریز کاهش می یابد. شکل ۶-ج، تأثیر قطر متوسط مصالح بستر را بر فاصله بیشینه عمق آبستنگی نسبت به پنجه سرریز نشان می دهد. با افزایش قطر متوسط مصالح بستر و عدم وجود لبه های آویزان در پایین دست سرریز، گردابه ها مصالح را به سمت پنجه سرریز سوق می دهند و به دلیل سنگین تر بودن مصالح شن نسبت به مصالح ماسه، مقدار فاصله بیشینه عمق آبستنگی نسبت به پنجه سرریز دورتر خواهد بود و همین امر باعث کاهش خطر احتمالی واژگون شدن سرریز می شود.

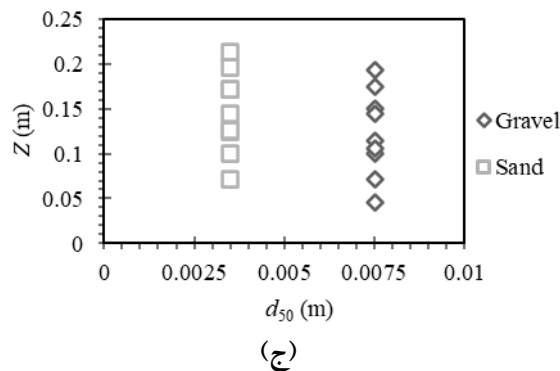
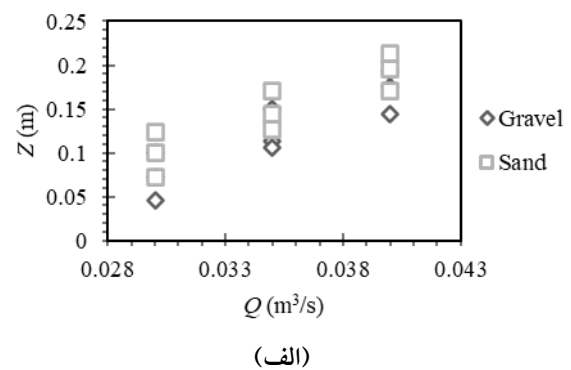
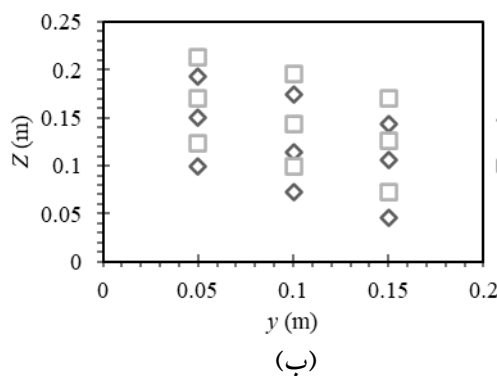
معادله (۴) برای محاسبه بیشینه عمق آبستنگی ارائه شده است. شکل ۷ نیز مقادیر مشاهده شده و محاسبه شده بیشینه عمق آبستنگی را نشان می دهد. این معادله با حاشیه خطای ۲۰ درصدی برای ۶۶/۷ درصد داده ها و با حاشیه خطای ۳۰ درصدی برای ۸۸/۹ درصد داده ها مناسب است. همچنین ضریب همبستگی در این معادله برای ۹۶/۵ درصد است.

$$\frac{Z}{H} = 3.87 \left(\left(\frac{Y}{H} \right)^{0.8} F^{*0.005} \right) \quad (4)$$

همچنین با افزایش ۱۶/۵ و ۳۳ درصدی سرعت جریان، بیشینه عمق آبستنگی در مصالح بستر شن به ترتیب ۴۱/۱ و ۵۷/۴ درصد و در مصالح بستر ماسه به ترتیب ۳۲/۹ و ۴۹ درصد افزایش می یابد. با افزایش ۲۰۰ و ۳۰۰ درصدی عمق پایاب،



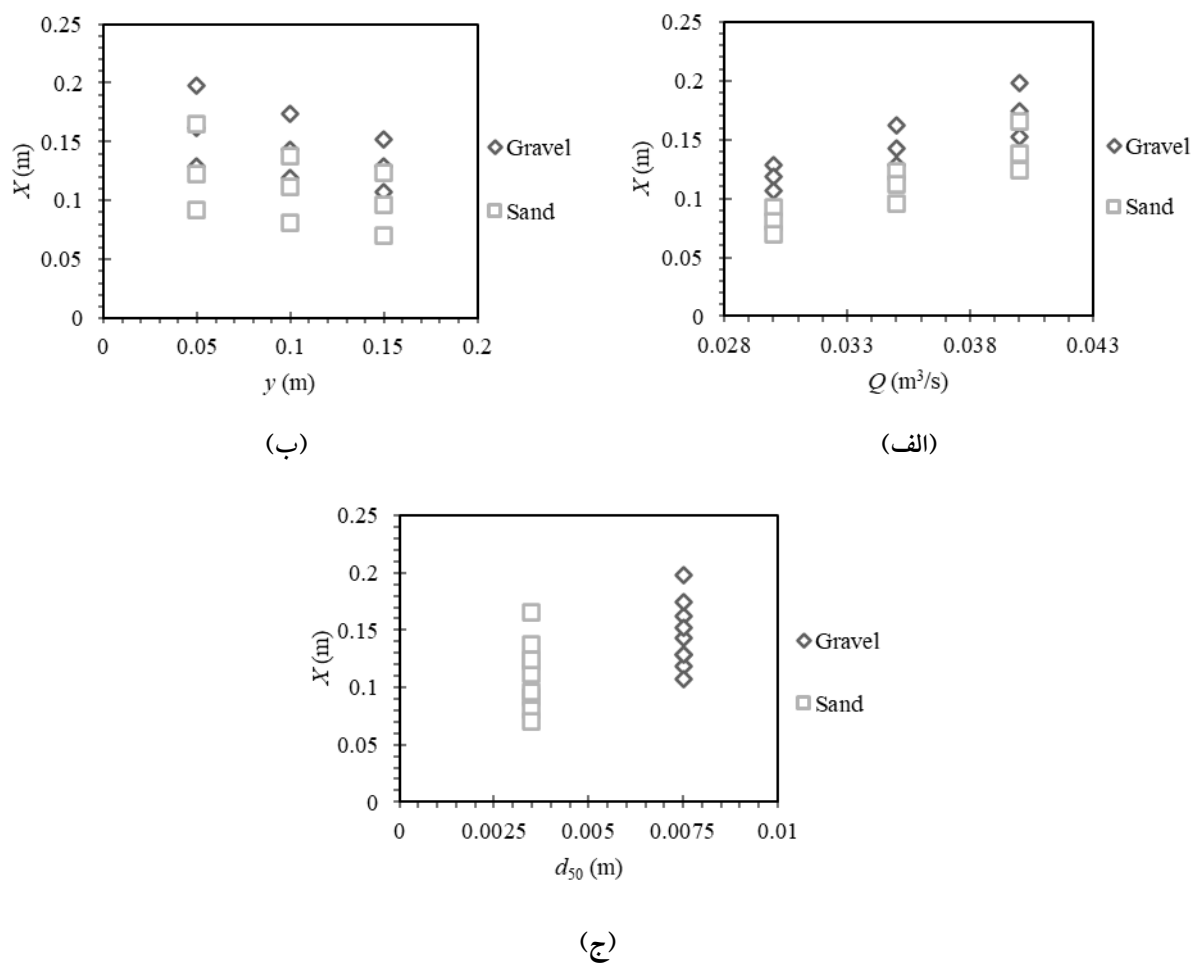
شکل ۴. حفرة آبستگى و گردابه‌هاى موجود در پایین دست سرریز



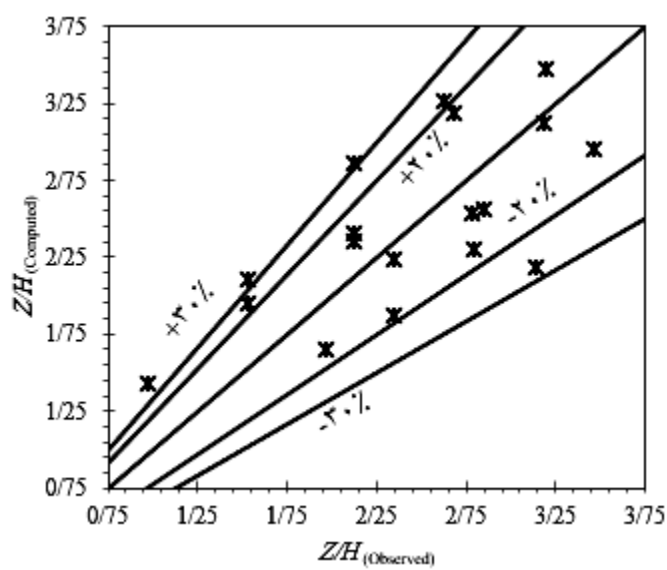
شکل ۵. تأثیر دبی جریان، عمق پایاب و قطر متوسط ذرات بستر بر بیشینه عمق آبستگى

شاخص آبستگى پارامتر بسیارى مهمى است که از معادله $Si = 2Z/X$ محاسبه مى شود. شاخص آبستگى کمتر، خطر احتمالى واژگونى سرریز را کاهش مى دهد (۸). کاهش مقدار شاخص آبستگى مى تواند ناشى از کمتر بودن بیشینه عمق آبستگى و یا دورتر بودن فاصله بیشینه عمق آبستگى نسبت به پنجه سرریز باشد. میانگین شاخص آبستگى در مصالح بستر شنى برابر $1/62$ در میانگین شاخص آبستگى

بیشینه عمق آبستگى در مواد بستر شن به ترتیب $18/8$ و $33/2$ درصد کاهش مى یابد. در مصالح بستر ماسه، بیشینه عمق آبستگى به ترتیب $13/4$ و $27/3$ درصد کاهش مى یابد. از این رو، با افزایش $53/3$ درصدی قطر متوسط مصالح بستر، بیشینه عمق آبستگى حدود $16/5$ درصد کاهش مى یابد. به طور میانگین فاصله بیشینه عمق آبستگى نسبت به پنجه سرریز در مصالح بستر شنى حدود $23/8$ درصد بیشتر از مصالح بستر ماسه است.



شکل ۶. تأثیر دبی جریان، عمق پایاب و قطر متوسط مصالح بستر بر فاصله بیشینه عمق آبستگي نسبت به پنجه سرریز



شکل ۷. مقادیر مشاهده شده و محاسبه شده بیشینه عمق آبستگي

نسبت به پژوهش حاضر، شرایط هندسی و هیدرولیکی مختلف سرریزها و آزمایش‌هاست.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در پژوهش حاضر، آبشستگی موضعی پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع B بررسی شد. همچنین از آنالیز ابعادی استفاده شد تا بتوان نتایج را به دیگر سرریزها و دیگر تیپ‌های سرریز کلیدپیانویی بسط داد. پیشنهاد می‌شود که از بافل و پله در کلیدهای خروجی سرریز کلیدپیانویی نوع B برای بررسی آبشستگی استفاده شود. همچنین پیشنهاد می‌شود تپه‌های شنی ایجادشده در پایین‌دست سرریز بررسی شوند و تناسب آن‌ها با طول حفره آبشستگی مشخص شود. باین حال، نتایج حاصل از پژوهش حاضر به صورت زیر خواهد بود:

- با افزایش دبی جریان، مقدار بیشینه عمق آبشستگی و فاصله آن نسبت به پنجه سرریز افزایش می‌یابد.
- با افزایش عمق پایاب، مقدار بیشینه عمق آبشستگی و فاصله آن نسبت به پنجه سرریز کاهش می‌یابد.
- با افزایش قطر متوسط مصالح بستر، بیشینه عمق آبشستگی کاهش می‌یابد.
- با افزایش قطر متوسط مصالح بستر، فاصله بیشینه عمق آبشستگی نسبت به پنجه سرریز افزایش می‌یابد.
- مقدار شاخص آبشستگی در مصالح بستر شنی به مراتب کمتر از مصالح بستر ماسه‌ای است.

در مصالح بستر ماسه‌ای برابر $2/60$ است. همان‌طور که پیداست، مقدار شاخص آبشستگی در مصالح بستر شنی $37/7$ درصد کمتر از مقدار شاخص آبشستگی در مصالح بستر ماسه‌ای است. به همین دلیل می‌توان نتیجه گرفت که خطر احتمالی واژگونی سرریز در مصالح بستر شنی کمتر است. جاستریج و همکاران (۲۰۱۶)، سرریز با ارتفاع $0/15$ متر را در نظر گرفته و تعداد ۶ آزمایش روی آن با مواد بستر شن انجام دادند (۱۴). میانگین شاخص آبشستگی در مطالعه ایشان $1/49$ است. در مطالعه حاضر میانگین شاخص آبشستگی در بستر شن $1/62$ است که ۸ درصد با میانگین شاخص آبشستگی در مطالعه جاستریج و همکاران (۲۰۱۶) تفاوت دارد که دلیل آن ارتفاع بیشتر و تفاوت نوع سرریز در پژوهش حاضر است (۱۴). لنتز و همکاران (۲۰۲۱)، به بررسی آبشستگی سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی نوع A و با قطرهای متوسط مصالح بستر به ترتیب $0/13$ متر و $0/065$ متر پرداختند و به ترتیب به این نتیجه رسیدند که میانگین شاخص آبشستگی $1/43$ و $1/708$ بوده است. دلیل افزایش شاخص آبشستگی در دانه‌بندی کوچک‌تر در کار ایشان می‌تواند ارتفاع سرریز $0/42$ متری باشد (۱۶). سرریز مورد مطالعه در کار ایشان $2/1$ برابر ارتفاع سرریز در مطالعه حاضر است. میانگین شاخص آبشستگی در مطالعه رضیوی و همکاران (۲۰۲۳)، در مصالح بستر شن با سرریز با حوض ثابت USBR نوع I (کف‌بند)، $1/78$ و بدون آن $0/784$ است (۲۰). دلیل افزایش شاخص آبشستگی در سرریز بدون کف‌بند و با مصالح شن

منابع مورد استفاده

References

1. Abdi Chooplou, C., E. Kahrizi, A. Fathi, M. Ghodsian and M. Latifi. 2024a. Baffle-Enhanced Scour Mitigation in Rectangular and Trapezoidal Piano Key Weirs: An Experimental and Machine Learning Investigation. *Water* 16(15): 2133. DOI: 10.3390/w16152133
2. Abdi Chooplou, Ch., M. Ghodsian and A. Ghafouri. 2024b. Local scour downstream of various shapes of PKWs. *Innovative Infrastructure Solutions* 9(4): 117. DOI: 10.1007/s41062-024-01411-x
3. Abdi Chooplou, Ch., M. Ghodsian, D. Abediakbar and A. Ghafouri. 2023. An experimental and numerical study on the flow field and scour downstream of rectangular PKWs with crest indentations. *Innovative Infrastructure Solutions* 8(5): 140. DOI: 10.1007/s41062-023-01108-7
4. Bodaghi, E., Ch. Abdi Chooplou and M. Ghodsian. 2024. Experimental investigation of scour downstream of a type A trapezoidal PKW under free and submerged flow conditions. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 72(1): 34-48. DOI: 10.2478/johh-2023-0041

5. Bodaghi, E., M. Ghodsian and Ch. Abdi Chooplou. 2023. The experimental study of downstream scouring of trapezoidal PKW type A under free and submerged flow. *Journal of Hydraulics* 18(1): 1-18. DOI: 10.30482/JHYD.2022.330389.1590
6. Dehghan, M. and H. Karami. 2024. Numerical investigation of scour downstream of piano key overflows using Flow-3D software. *Amirkabir Journal of Civil Engineering* 56(2): 203-228. DOI: 10.22060/CEEJ.2024.22659.8019
7. Dehrashid, F.A., S. Gohari, T. Asim, R. Mishra, A. Khoshkonesh, F. Bahamanpouri and B. Nsom. 2022. Experimental and numerical study of local scouring downstream of D-type PKW. *International Journal of COMADEM* 25(1): 51-62.
8. Fathi, A., Ch. Abdi Chooplou and M. Ghodsian. 2024. Local scour downstream of type-A trapezoidal stepped PKW in sand and gravel sediments. *ISH Journal of Hydraulic Engineering* 30(4): 417-429. DOI: 10.1080/09715010.2024.2353612
9. Fathi, A., Ch. Abdi Chooplou and M. Ghodsian. 2023. An Experimental Study of Flow Energy Loss in Trapezoidal Stepped PKWs (PKWs). *Modares Civil Engineering Journal* 23(4): 163-174. DOI: 10.22034/23.4.163
10. Ghafouri, A., M. Ghodsian and Ch. Abdi Chooplou. 2020. Experimental study on the effect of discharge and tailwater depth on bed topography downstream of a PKW. *Journal of Hydraulics* 15(3): 107-122. DOI: 10.30482/JHYD.2020.236770.1465
11. Ghodsian, M., Ch. Abdi Chooplou and A. Ghafouri. 2021. Scouring of triangular and trapezoidal pianos key weir. *Journal of Hydraulics* 16(2): 43-58. DOI: 10.30482/JHYD.2021.261439.1497
12. Gohari, S. and F. Ahmadi. 2019. Experimental study of downstream scour of piano keys weirs. *Journal of Water and Soil Conservation* 26(1): 91-109. DOI: 10.22069/JWSC.2019.14680.2961
13. Jamal, A.A.R., K.Y. Tahaa and G.A.A.M. Hayawi. 2022. Experimental Study of Scour Downstream PKW Type C with Changing Height of Weir Width of Keys and Apron Solid. *Al-Rafidain Engineering Journal (AREJ)* 27(1): 193-204. DOI: 10.33899/rengj.2021.130402.1101
14. Jüstrich, S., M. Pfister and A.J. Schleiss. 2016. Mobile riverbed scouring downstream of a PKW. *Journal of Hydraulic Engineering* 142(11): 04016043. DOI: 10.1061/ASCE HY.1943-7900.0001189
15. Kumar, B. and Z. Ahmad. 2022. Scour downstream of a PKW with and without a solid apron. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 148(1): 04021066. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001647
16. Lantz, W., B.M. Crookston and M. Palermo. 2021. Apron and cutoff wall scour protection for PKWs. *Water* 13(17): 2332. DOI: 10.3390/w13172332
17. Mshali, K.C., A. Khoshfetrat and A. Fathi. 2024. Experimental study of the effect of jump on the Downstream Scouring of type-C trapezoidal piano key weir. *Amirkabir Journal of Civil Engineering* 56(11): 1353-1368 .
18. Novák, P. and J. Čabelka. 1981. Models in hydraulic engineering: Physical principles and design applications. Pitman Publishing, London.
19. Rdhaiwi, A.Q., A. Khoshfetrat and A. Fathi. 2024. Experimental comparison of flow energy loss in type-B and-C trapezoidal PKWs. *Journal of Engineering and Sustainable Development* 28(1): 55-64. DOI: 10.31272/jeasd.28.1.4
20. Rdhaiwi, A.Q., A. Khoshfetrat and A. Fathi. 2023. Experimental investigation of scour downstream of a C-Type trapezoidal PKW with stilling basin. *Journal of Engineering and Sustainable Development* 27(6): 688-697. DOI: 10.31272/jeasd.27.6.2
21. Sumer, B.M. and J. Fredsoe. 1991. August. Onset of scour below a pipeline exposed to waves. In The First International Offshore and Polar Engineering Conference, Edinburgh, The United Kingdom. DOI: 10.1115/OMAE2010-20719
22. Yazdi, A.M., S. Hoseini, S. Nazari and M. Fazeli. 2022. Numerical and experimental analysis of scour downstream of PKWs. *Sādhanā* 47(4): 189. DOI: 10.1007/s12046-022-01960-w
23. Yazdi, A., S.A. Hosseini, S. Nazari and N. Amanian. 2020. Comparison of downstream scour of the rectangular and trapezoidal PKWs. *Journal of Hydraulics* 15(2): 95-112. DOI: 10.30482/JHYD.2020.227522.1453