

بررسی آزمایشگاهی تأثیر وجود مانع در انتهای کلیدهای خروجی سرریز کلیدپیانویی نوع C بر آبشستگی پایین دست آن

یاسر نعمه عبدالحسن و علی خوش فطرت^{*۱}

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۳/۳۰)

چکیده

سرریزهای کلیدپیانویی جزء جدیدترین سرریزهای غیرخطی هستند که ضریب آبگذری بیشتری نسبت به سرریزهای مشابه دارند. این سازه‌های هیدرولیکی دارای فونداسیون سبک و ساده‌ای هستند که روی سدها و کانال‌های زهکشی طراحی و نصب می‌شوند. به دلیل راندمان زیاد این سرریزها، بررسی آبشستگی پایین دست آنها و راهکار برای کاهش مقدار آن در سال‌های اخیر، مورد توجه مهندسان قرار گرفته است. در این پژوهش سعی شده از یک سرریز کلیدپیانویی ذوزنقه‌ای نوع C، سه دبی و سه عمق پایاب استفاده شود. همچنین از دو مانع با ارتفاع‌های ۰/۰۲ و ۰/۰۴ متر در انتهای کلیدهای خروجی سرریز استفاده شد. نتایج نشان داد که وجود مانع، باعث کاهش آبشستگی در پنجه سرریز می‌شود. مقدار کاهش آبشستگی در پنجه سرریز و با ارتفاع مانع بزرگ‌تر، بیشتر از سرریز با ارتفاع مانع کوچک‌تر و در هر دو بیشتر از سرریز بدون مانع است. وجود مانع باعث کاهش بیشینه عمق آبشستگی و دورتر شدن فاصله بیشینه عمق آبشستگی از پنجه سرریز می‌شود. در سرریز با ارتفاع مانع ۰/۰۲ و ۰/۰۴ متر نسبت به سرریز بدون مانع، مقدار بیشینه عمق آبشستگی حدود ۱۶/۴ و ۲۶/۹ درصد کمتر و فاصله بیشینه عمق آبشستگی در آنها نسبت به سرریز بدون مانع، حدود ۸/۷ و ۱۹/۱ درصد بیشتر است. شاخص آبشستگی در سرریزهای دارای مانع کمتر از سرریزهای بدون مانع است که می‌تواند خطر واژگونی سرریز را کاهش دهد. کمترین مقدار شاخص آبشستگی در سرریز با ارتفاع مانع ۰/۰۴ متر دیده شد که تقریباً ۴۱/۲ درصد کمتر از سرریز بدون مانع است.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی، پنجه سرریز، سرریز کلیدپیانویی، شاخص آبشستگی، مانع

۱. گروه مهندسی عمران، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: khoshfetrat@khuif.ac.ir

مقدمه

غیرخطی بودن تاج سرریزهای کلیدپیانویی باعث افزایش ضریب آبگذری آنها تا حدود سه الی چهار برابر می‌شود (۲۲). پژوهشگرانی مانند سجادی (۲۰۱۷)، الشکور و الخفاجی (۲۰۱۸)، نقیب‌زاده و همکاران (۲۰۲۰)، اسلینگر و کروکستون (۲۰۲۰)، سینگ و کومار (۲۰۲۲)، فتحی و همکاران (۲۰۲۳) و رضیوی و همکاران (۲۰۲۴)، روی راهکارهایی برای افزایش میزان اتلاف انرژی در سرریزهای کلیدپیانویی، پژوهش‌های ارزشمندی انجام دادند. همچنین افرادی روی آبشستگی سرریزهای کلیدپیانویی، مطالعه‌های مفیدی انجام دادند که به آنها پرداخته می‌شود (۳، ۷، ۹، ۱۸، ۲۰ و ۲۳). جاستریچ و همکاران (۲۰۱۶) با بررسی آزمایشگاهی روی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع A، به نتیجه رسیدند که با افزایش عمق پایاب، کاهش دبی جریان، افزایش قطر مصالح بستر و کاهش ارتفاع ریزش جریان، میزان آبشستگی کاهش می‌یابد (۱۶). گوهری و احمدی (۲۰۱۹) با بررسی آزمایشگاهی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع A، به این نتیجه رسیدند که با افزایش تعداد کلیدهای سرریز، آبشستگی افزایش می‌یابد. همچنین مقدار آبشستگی در سرریز دارای نه کلید به مراتب بیشتر از سرریز دارای پنج کلید است (۱۲). غفوری و همکاران (۲۰۲۰) با بررسی آزمایشگاهی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع A، به این نتیجه رسیدند که عمق پایاب و دبی جریان، به ترتیب روی میزان آبشستگی تأثیر غیر مستقیم و مستقیم دارند و با افزایش عمق پایاب و کاهش دبی جریان، مقدار آبشستگی کاهش می‌یابد (۱۰). کومار و احمد (۲۰۲۰) با بررسی آزمایشگاهی روی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع A دارای کفبند، به این نتیجه رسیدند که وجود کفبند (Apron) در پایین دست سرریز، باعث کاهش میزان آبشستگی می‌شود (۱۵). یزدی و همکاران (۲۰۲۰) با بررسی آزمایشگاهی روی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای و مستطیلی نوع A، به این نتیجه رسیدند که میزان آبشستگی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای به مراتب کمتر از میزان آبشستگی در سرریز کلیدپیانویی

مستطیلی است و فاصله‌ی آن نسبت به پنجه سرریز به مراتب دورتر از سرریز کلیدپیانویی مستطیلی است (۱۷). قدسیان و همکاران (۲۰۲۱) با بررسی آزمایشگاهی سرریزهای کلیدپیانویی دوزنقه‌ای و مثلثی نوع A، به این نتیجه رسیدند که میزان آبشستگی در سرریز دوزنقه‌ای به مراتب کمتر از میزان آبشستگی در سرریز مثلثی شکل است و فاصله‌ی آن نسبت به پنجه سرریز به مراتب دورتر از سرریز کلیدپیانویی مثلثی است (۱۱). جمال و همکاران (۲۰۲۱) با بررسی آزمایشگاهی روی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع C، به این نتیجه رسیدند که با افزایش ارتفاع سرریز و افزایش نسبت عرض کلیدهای ورودی به عرض کلیدهای خروجی، ارتفاع بیشینه عمق آبشستگی افزایش می‌یابد (۱۳). لنتز و همکاران (۲۰۲۱) با ایجاد کفبند در پایین دست سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع A، به این نتیجه رسیدند که با وجود کفبند، میزان آبشستگی کاهش می‌یابد. همچنین ایشان طول کفبند بهینه را ۱/۵ برابر ارتفاع سرریز معرفی کردند (۱۶). عبدی چوپلو و همکاران (۲۰۲۲) با بررسی آزمایشگاهی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع A، به این نتیجه رسیدند که با کاهش عدد فرود ذرات، آبشستگی نیز کاهش می‌یابد (۱). همچنین در پژوهشی جداگانه و با بررسی آزمایشگاهی روی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع A، به این نتیجه رسیدند که با کاهش عمق پایاب، طول حفره آبشستگی افزایش می‌یابد (۲). بدایعی و همکاران (۲۰۲۲) با بررسی آزمایشگاهی روی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع A، به این نتیجه رسیدند که میزان آبشستگی در حالت جریان مستغرق بسیار کمتر از میزان آبشستگی در حالت جریان آزاد است (۵). رضیوی و همکاران (۲۰۲۳) به این نتیجه رسیدند که وجود حوضچه آرامش نوع اول (USBRI) در سرریز دوزنقه‌ای نوع C، میزان آبشستگی را کاهش می‌دهد (۲۰). بدایعی و همکاران (۲۰۲۴) به این نتیجه رسیدند که در سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع A، با افزایش عدد فرود ذرات و کاهش حالت استغرق جریان، میزان آبشستگی بیشتر می‌شود (۴).

$$\frac{\xi}{H_u} = f\left(\frac{H_d}{H_u}, Fr, Re, We, \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_s}, \frac{d_{50}}{H_u}, \frac{h}{H_u}\right) \quad (2)$$

به دلیل آشفتگی زیاد جریان و رینولدز بیشتر از ۴۰۰۰، از عدد

رینولدز $\left(Re = \frac{q}{g}\right)$ صرف نظر شد (۲۵) و همچنین به دلیل

عمق بیشتر از ۰/۰۳ متر روی تاج سرریز، از عدد وبر

صرف نظر خواهد شد (۱۹). با ترکیب عدد

فرود $\left(Fr = \frac{q}{H_u \sqrt{gH_u}}\right)$ ، پارامتر $\frac{d_{50}}{H_u}$ و پارامتر

$Frd = \frac{q}{H_u \sqrt{gd_{50}(S-1)}}$ ، عدد بدون بعد $\left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_s} = S-1\right)$

حاصل می شود. همچنین با ترکیب دو پارامتر $\frac{H_d}{H_u}$ و

$\frac{h}{H_u}$ پارامتر $\frac{h}{H_d}$ حاصل می شود. جدول ۱ مشخصات داده های

هیدرولیکی جریان در آزمایش ها را نشان می دهد که در تمامی

آزمایش ها یکسان هستند و در آن Q دبی جریان است.

$$\frac{\xi}{H_u} = f\left(Frd, \frac{h}{H_d}\right) \quad (3)$$

مواد و روش ها

آزمایش ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه اشرافی اصفهانی و در یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۱۰، عرض ۰/۶ و ارتفاع ۰/۸ متر انجام شد. جریان توسط دو مخزن سطحی وارد آرام کننده های جریان شده و سپس وارد فلوم آزمایشگاهی می شود و پس از طی ۵/۵ متر به سرریز می رسد (شکل ۲). مطابق شکل ۳، سرریز دارای عرض $W=0/6m$ ، ارتفاع $P=0/2m$ ، عرض کلید ورودی $W_i=0/215m$ ، عرض کلید خروجی $W_o=0/075m$ ، طول لبه آویزان در پایین دست سرریز $B_o=0/13m$ ، طول دیواره های جانبی $B=0/5m$ ، طول تاج $L=2/6m$ و ضخامت تاج $Ts=0/01m$ است. شیب کانال برابر صفر و دمای آب بین ۷ تا ۱۳ درجه سانتی گراد متغیر بود. از سه دبی ۳۰، ۳۵ و ۴۰ لیتر بر ثانیه

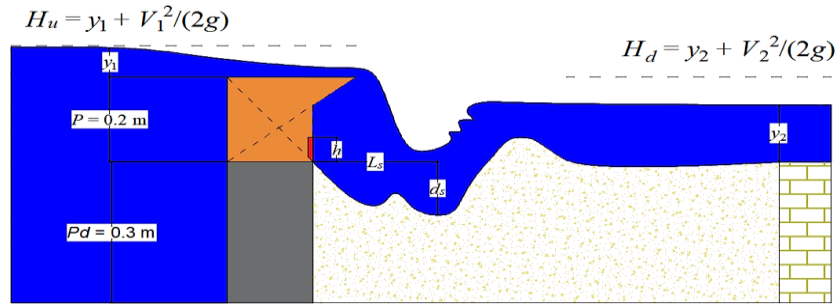
باتوجه به ضریب آبگذری بیشتر و پی سبک تر سرریزهای کلیدپیانویی، بررسی آبستگي در این سرریزها حائز اهمیت است. باتوجه به پژوهش های ارزشمند یادشده، کمبود پژوهش روی سرریزهای کلیدپیانویی ذوزنقه ای نوع C به چشم می خورد و همچنین وجود مانع در انتهای کلیدهای خروجی و تأثیر آن بر آبستگي بررسی نشده است. در این پژوهش سعی شده است از سرریز کلیدپیانویی ذوزنقه ای نوع C و مانع در انتهای کلیدهای خروجی سرریز کلیدپیانویی استفاده شود تا تأثیر این موانع بر میزان آبستگي مورد بررسی قرار گیرد. همچنین از سه عمق پایاب، سه دبی جریان و دو مانع استفاده شده است. دبی های مورد بررسی برابر ۰/۰۳، ۰/۰۳۵ و ۰/۰۴ مترمکعب بر ثانیه، عمق پایاب ها برابر ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۱۵ متر و ارتفاع موانع برابر ۰/۰۲ و ۰/۰۴ متر هستند.

آنالیز ابعادی

معادله (۱) و شکل ۱، پارامترهای مؤثر بر آبستگي پایین دست سرریز کلیدپیانویی ذوزنقه ای را همراه با مانع در انتهای کلیدهای خروجی نشان می دهد:

$$L_s, d_s = f(q, H_u, H_d, g, \mu, \sigma, \rho_w, \rho_s, d_{50}, h) \quad (1)$$

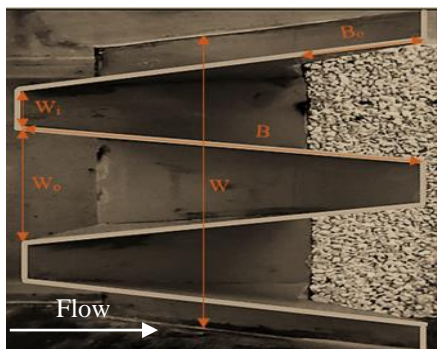
در معادله (۱)، L_s فاصله بیشینه عمق آبستگي از پنجه سرریز و d_s ارتفاع بیشینه عمق آبستگي هستند که در روابط به صورت ξ نشان داده شده اند. همچنین q دبی در واحد عرض، H_u عمق جریان به علاوه ارتفاع معادل انرژی جنبشی در بالادست سرریز، H_d عمق جریان به علاوه ارتفاع معادل انرژی جنبشی در پایاب، g شتاب گرانش، μ لزجت دینامیکی، σ ضریب کشش سطحی، ρ_w چگالی آب، ρ_s چگالی مصالح بستر، d_{50} قطر متوسط ذرات و h ارتفاع موانع هستند. با استفاده از تئوری π باکینگهام و در نظر گرفتن سه متغیر تکراری دبی در واحد عرض، چگالی آب و عمق جریان به علاوه ارتفاع معادل انرژی جنبشی در بالادست سرریز، معادله بدون بعد (۲) حاصل می شود:



شکل ۱. پارامترهای مؤثر بر آبشستگی پایین دست سرریز کلیدپیانویی نوع C

جدول ۱. مشخصات هیدرولیکی جریان مورد بررسی در پژوهش

ردیف	Q (m ³ /s)	H _u (m)	H _d (m)	h (m)	Re	Frd
۱	۰/۰۳۰	۰/۰۳۵	۰/۱۰۱	۰ - ۰/۰۲ - ۰/۰۴	۷۰۸۱	۰/۱۱۱
۲	۰/۰۳۰	۰/۰۳۵	۰/۱۱۳	۰ - ۰/۰۲ - ۰/۰۴	۷۰۸۱	۰/۱۰۸
۳	۰/۰۳۰	۰/۰۳۵	۰/۱۵۶	۰ - ۰/۰۲ - ۰/۰۴	۷۰۸۱	۰/۰۹۹
۴	۰/۰۳۵	۰/۰۴۰	۰/۱۱۹	۰ - ۰/۰۲ - ۰/۰۴	۹۱۰۷	۰/۱۲۵
۵	۰/۰۳۵	۰/۰۴۰	۰/۱۱۷	۰ - ۰/۰۲ - ۰/۰۴	۹۱۰۷	۰/۱۲۵
۶	۰/۰۳۵	۰/۰۴۰	۰/۱۵۸	۰ - ۰/۰۲ - ۰/۰۴	۹۱۰۷	۰/۱۱۵
۷	۰/۰۴۰	۰/۰۴۵	۰/۱۴۱	۰ - ۰/۰۲ - ۰/۰۴	۱۱۳۴۱	۰/۱۳۶
۸	۰/۰۴۰	۰/۰۴۵	۰/۱۲۳	۰ - ۰/۰۲ - ۰/۰۴	۱۱۳۴۱	۰/۱۴۲
۹	۰/۰۴۰	۰/۰۴۵	۰/۱۶۰	۰ - ۰/۰۲ - ۰/۰۴	۱۱۳۴۱	۰/۱۳۱



شکل ۳. سرریز کلیدپیانویی مورد بررسی در پژوهش



شکل ۲: کانال آزمایشگاهی

سه عمق پایاب ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۱۵ متر تنظیم شدند. قبل از روشن کردن پمپ، از یک ورق فلزی با جنس گالوانیزه روی بستر استفاده شد و پس از تنظیم دبی و عمق پایاب، این

استفاده شد. دبی جریان توسط یک شیر و یک مانیتور (برای نشان دادن مقدار آن) و یک پمپ با خطای ± 0.01 درصد صورت گرفت. با استفاده از دریچه انتهایی کانال آزمایشگاهی،

بشت موانع جمع شده و باعث کاهش سرعت آن می‌شود. پس از کاهش سرعت و بالا آمدن سطح جریان در روی موانع، جریان به آرامی و دورتر از پنجه سرریز، وارد پایین دست می‌شود. شکل ۶، جریان عبوری از روی سرریز با و بدون مانع را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. در این شکل، علامت‌های قرمز نشانگر موانع هستند که مانع بزرگ‌تر به ارتفاع ۰/۰۴ متر و مانع کوچک‌تر به ارتفاع ۰/۰۲ متر است. افزایش ارتفاع مانع باعث ریزش جریان به دورتر از پنجه می‌شود. مشاهدات حاکی از آن است که مقدار بیشینه عمق آبشستگی در سرریز با مانع بزرگ‌تر، در فاصله‌ای دورتر از پنجه سرریز رخ می‌دهد. همچنین با افزایش ارتفاع موانع، ناحیه استغراق به وجود آمده در کلیدهای خروجی (برآمدگی جریان) بزرگ‌تر می‌شود و این جت به وجود آمده از افزایش و سپس کاهش جریان (شبه نمودار زنگوله‌ای شکل)، به پشت موانع برخورد کرده و از سرعت آن‌ها کاسته می‌شود.

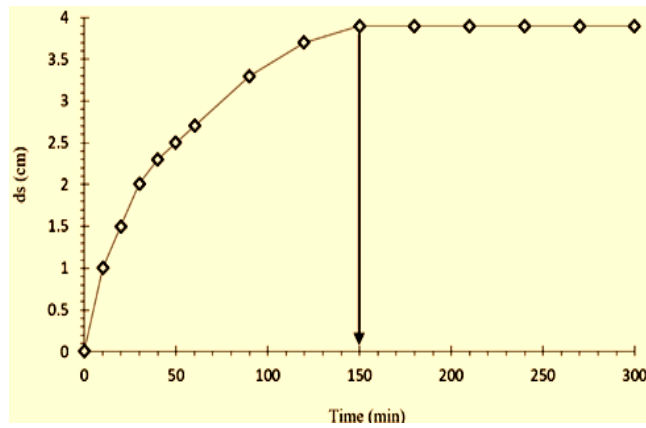
ریزش جریان از کلیدهای ورودی به پایین دست، موجب این می‌شود که مصالح بستر به کمی عقب‌تر و به سمت پنجه سرریز نزدیک شوند. دلیل آن نیز می‌تواند وجود لبه آویزان در پایین دست سرریز و یا بزرگ‌تر بودن دانه‌های بستر (شن) باشد (شکل ۷). با افزایش دبی جریان و عمق جریان در بالادست سرریز، بیشینه عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. در این حالت تنش برشی بیشتر از حالت بحرانی خود شده و مقدار آبشستگی افزایشی می‌شود. همچنین با افزایش عمق پایاب، مقدار بیشینه عمق آبشستگی و طول آن کاهش می‌یابد. دلیل آن طول انتشار بیشتر و تضعیف و سطحی‌تر شدن گردابه‌ها و جت‌های خروجی از سرریز است.

شکل ۸، تأثیر عدد فرود ذرات را بر بیشینه عمق آبشستگی نشان می‌دهد. همان‌طور که پیدا است، با افزایش عدد فرود ذرات، بیشینه عمق آبشستگی نیز افزایش یافته که دلیل آن بیشتر شدن دبی در واحد عرض و یا ارتفاع جریان است. با افزایش دبی در واحد عرض جریان، تنش برشی نیز افزایش یافته و به راحتی مصالح بستر را با خود حمل کرده و به پایین دست منتقل می‌کند. همچنین مقادیر بیشینه عمق

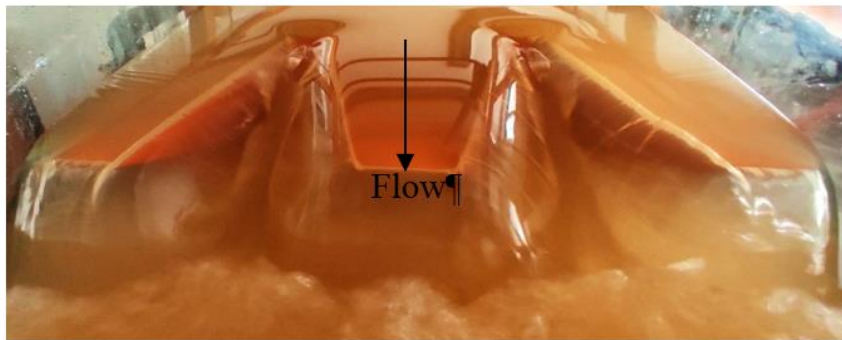
بستر فلزی از روی بستر به آرامی برداشته شد تا از آبشستگی اولیه جلوگیری شود. مصالح شن مورد استفاده در بستر پایین دست سرریز، دارای دانه‌بندی یکنواخت و غیرچسبنده و با قطر متوسط ذرات برابر ۷/۵ میلی‌متر و با چگالی ویژه برابر ۲/۶۵ تن بر مترمکعب است. ضریب یکنواختی مصالح بستر کمتر از ۱/۵ است و به همین دلیل مصالح استفاده شده در تمامی آزمایش‌ها، یکنواخت هستند (۸). همچنین عمق بالادست و پایین دست سرریز با استفاده از عمق سنج سوزنی (با خطای ± 1 میلی‌متر) اندازه‌گیری شدند. از دو ارتفاع لبه در انتهای کلیدهای خروجی سرریز نیز استفاده شد. این موانع با ارتفاع‌های ۰/۰۲ و ۰/۰۴ متر و ضخامت ۰/۰۱ متر بودند. پس از گذشت مدت زمان ۱۵۰ دقیقه، پمپ را خاموش کرده و پس از زهکشی بستر توسط لوله‌هایی که در کف کانال و زیر مصالح کار گذاشته شده بود، بستر با استفاده از متر لیزری برداشت شد. یک آزمایش اولیه و به مدت ۱۶ ساعت انجام شد. تغییرات بیشینه آبشستگی (d_s) در زمان ۱۵۰ دقیقه برای مصالح استفاده شده، کمتر از یک میلی‌متر است و برابر با معیار چیبو، این زمان به عنوان زمان تعادل در نظر گرفته شد (۸). شکل ۴، بیشینه عمق آبشستگی در دیواره‌های کانال و در زیر نیم‌کلیدهای ورودی نسبت به زمان و همچنین زمان تعادل مصالح را نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

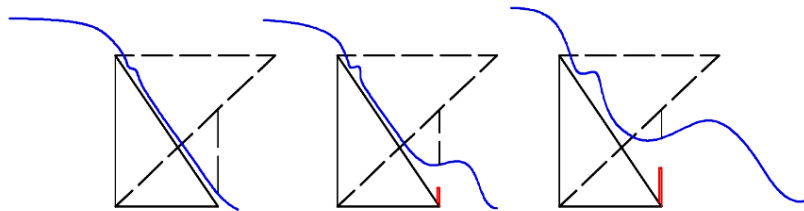
جریان به صورت جت مایل از کلیدهای خروجی به پایین دست و به صورت جت ریزشی از کلیدهای ورودی به پایین دست و داخل کلیدهای خروجی انتقال می‌یابد (شکل ۵). دلیل تغییر رنگ آب در شکل ۵، وجود اندکی رسوب معلق در مخازن است که به دلیل کمبود آب مصرفی، آب داخل آن‌ها تعویض نشدند. همچنین این رسوبات هیچ تأثیری بر روند آبشستگی نمی‌گذارند. مقدار آبشستگی در زیر کلیدهای خروجی به مراتب بیشتر از زیر کلیدهای ورودی است (۸). به همین دلیل وجود مانع در کلیدهای خروجی می‌تواند باعث کاهش سرعت جریان و در نتیجه کاهش آبشستگی شود. جریان خروجی از کلیدها در



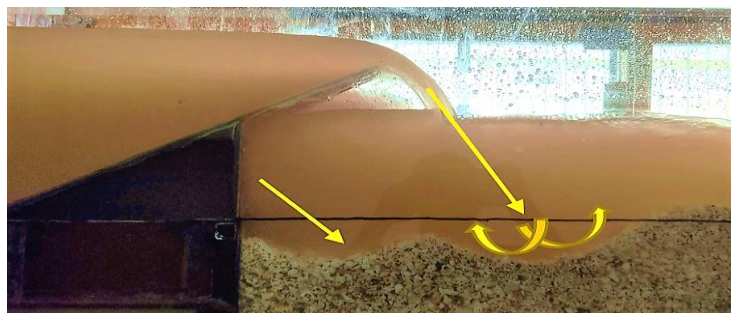
شکل ۴. تعادل زمانی آبستگي در دیواره‌ها و زیر نیم کلیدهای ورودی



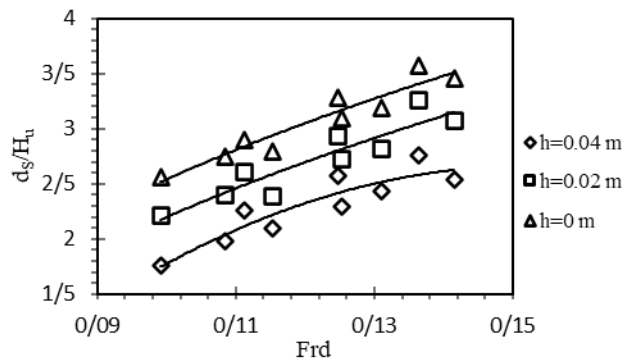
شکل ۵. جریان عبوری از سرریز کلیدپیانویی



شکل ۶. تفاوت عبور جریان در سرریزهای با و بدون مانع



شکل ۷. شکل حفره آبستگي در سرریز کلیدپیانویی ذوزنقه‌ای نوع c



شکل ۸. تأثیر عدد فرود ذرات بر بیشینه عمق آبستگي

مربعات خطای بسیار کمی ارائه شده است. فتحي و همکاران (۲۰۲۴) نیز معادله‌ای شبیه به این معادله ارائه کردند (۸). همچنین ضرایب K_1 و K_2 از جدول ۲ محاسبه می‌شوند. شکل ۱۰ نیز مقادیر محاسبه‌شده و مشاهده‌شده بیشینه عمق آبستگي را نشان می‌دهد که با خطای اندکی ($\pm 1/8$) قابل قبول است.

$$\frac{d_s}{H_u} = K_1 \left(Frd^{0.7} \left(\frac{hH_u}{H_d^2} + K_2 \right)^{0.1Frd} \right) \quad (4)$$

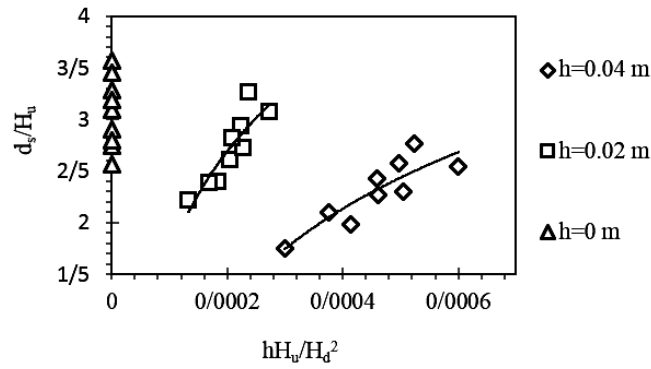
شکل ۱۱-الف و ب تأثیر عدد فرود ذرات و پارامتر بدون بعد شده به دست آمده را نسبت به فاصله بیشینه عمق آبستگي نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، با افزایش عدد فرود ذرات، این فاصله نیز افزایش می‌یابد. دلیل آن افزایش تنش برشی جریان نسبت به تنش برشی بحرانی است. همچنین با افزایش پارامتر ترکیب شده، مقدار فاصله بیشینه عمق آبستگي نسبت به پنجه سرریز زیاد می‌شود که دلیل آن وجود ارتفاع مانع بیشتر و یا افزایش عمق بالادست سرریز و افزایش جت‌ها است. مقدار فاصله بیشینه عمق آبستگي از پنجه سرریز در سرریز با ارتفاع مانع ۰/۰۲ متر و ۰/۰۴ متر حدود ۱۶/۴ و ۲۶/۹ درصد بیشتر از سرریز بدون مانع است.

شاخص آبستگي ($2d_s/L_s$) در سرریزها دارای اهمیت است. هرچه شاخص آبستگي کوچک‌تر باشد، احتمال خطر واژگونی سرریز نیز کمتر است (۸). کمتر بودن شاخص آبستگي می‌تواند باعث کمتر بودن بیشینه عمق آبستگي و یا بیشتر بودن فاصله بیشینه عمق آبستگي نسبت به پنجه سرریز باشد.

آبستگي در سرریزهای دارای مانع با ارتفاع برابر ۰ متر، ۰/۰۲ متر و ۰/۰۴ متر، به ترتیب برابر ۰/۱۱۵ متر، ۰/۱۰۵ متر و ۰/۰۹۳ متر هستند.

برای اینکه بتوان داده‌ها را به بهترین نحو مقایسه کرد، عبارت بدون بعد h/H_u را با پارامتر بدون بعد H_u/H_d ترکیب کرده و پارامتر hH_u/H_d^2 به دست می‌آید. این پارامتر تابع ارتفاع موانع، عمق بالادست و پایین دست سرریز به علاوه ارتفاع نظیر انرژی جنبشی است. مطابق شکل ۹ و با افزایش پارامتر بدون بعد جدید، در دبی جریان و ارتفاع مانع ثابت و عمق پایاب متغیر، مقدار بیشینه عمق آبستگي افزایش می‌یابد که دلیل آن کاهش مخرج کسر و یا همان کاهش عمق پایاب است. با کاهش عمق پایاب، بیشینه عمق آبستگي بدون بعد شده افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش ارتفاع موانع، پارامتر ترکیب شده افزایش کمی دارد؛ اما بیشینه عمق آبستگي بدون بعد شده، کاهش می‌یابد.

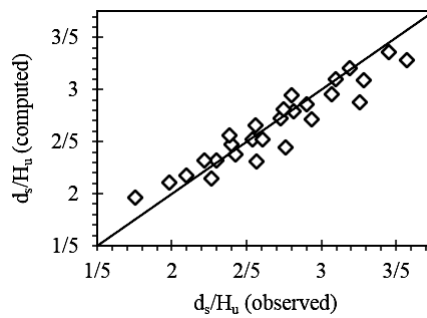
در سرریز با ارتفاع مانع برابر ۰/۰۴ متر نسبت به سرریز ساده، مقدار بیشینه عمق آبستگي حدود ۱۹/۱ درصد کاهش یافته است. در سرریز با ارتفاع مانع برابر ۰/۰۲ متر نسبت به سرریز ساده نیز مقدار بیشینه عمق آبستگي حدود ۸/۷ درصد کاهش یافته است. با افزایش ۵۰ درصدی ارتفاع موانع در انتهای کلیدهای خروجی (از ۰/۰۲ متر به ۰/۰۴ متر)، مقدار بیشینه عمق آبستگي حدود ۱۱/۴ درصد کاهش می‌یابد. معادله (۴) برای محاسبه بیشینه عمق آبستگي ارائه شده است که ضریب همبستگی در آن برابر ۰/۹۹۶ است. این معادله برای ۲۷ داده و با مجموع



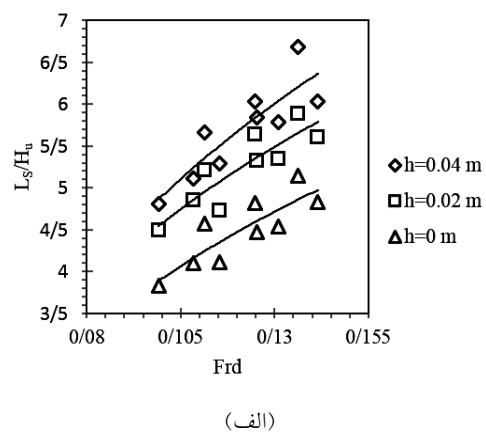
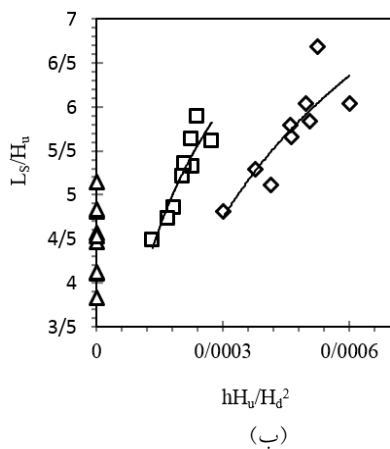
شکل ۹. تأثیر پارامتر بدون بعد شده hH_u/H_d^2 بر بیشینه عمق آبستگي

جدول ۲. محاسبه ضرایب K_1 و K_2

ردیف	h	K_1	K_2
۱	۰	۱۳/۸	$\frac{H_d}{2.8}$
۲	۰/۰۲	۱۲/۱	۰
۳	۰/۰۴	۱۰/۲	۰



شکل ۱۰. مقادیر مشاهده شده و محاسبه شده بیشینه عمق آبستگي



شکل ۱۱. تأثیر عدد فرود ذرات و hH_u/H_d^2 بر فاصله بیشینه عمق آبستگي نسبت به پنجه سرریز

نتیجه گیری

- میانگین شاخص آبهستگی در سرریزهای با ارتفاع مانع برابر ۰، ۰/۰۲ و ۰/۰۴ متر، به ترتیب برابر ۱/۳۶، ۱/۰۳ و ۰/۸۰ است. کمترین مقدار شاخص آبهستگی در سرریز با ارتفاع ۰/۰۴ متر محاسبه شده است که این برای سرریز مفید است. همچنین در سرریز با ارتفاع مانع ۰/۰۲ و ۰/۰۴ متر نسبت به سرریز بدون مانع، مقدار کاهش شاخص آبهستگی حدود ۲۴/۳ و ۴۱/۲ درصد بیشتر است. ارتفاع سرریز در مطالعه جاستریچ و همکاران (۲۰۱۶)، ۰/۱۵ متر است. این پژوهشگر ۶ آزمایش روی مواد بستر شنی انجام دادند. میانگین شاخص آبهستگی در این مطالعه ۱/۴۹ است (۱۴). در مطالعه حاضر میانگین شاخص آبهستگی در مواد شنی ۱/۳۶ است که ۸/۷ درصد با میانگین شاخص آبهستگی در مطالعه جاستریچ و همکاران (۲۰۱۶) تفاوت دارد. لنتز و همکاران (۲۰۲۱) با بررسی آبهستگی سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی نوع A و با قطرهای متوسط مصالح بستر به ترتیب ۰/۰۱۳ متر و ۰/۰۶۵ متر، دریافتند که میانگین شاخص آبهستگی به ترتیب ۱/۴۰۳ و ۱/۷۰۸ بوده است (۱۶). دلیل افزایش شاخص آبهستگی در این مطالعه می تواند ارتفاع سرریز ۰/۴۲ متری باشد. سرریز مورد مطالعه در این پژوهش، ۲/۱ برابر ارتفاع سرریز در مطالعه حاضر است. میانگین شاخص آبهستگی در مطالعه رضیوی و همکاران (۲۰۲۳)، در مصالح بستر شنی با سرریز با حوض ثابت USBR نوع I، ۱/۷۸ و بدون آن ۰/۷۸۴ است (۲۰).
- وجود مانع در انتهای کلیدهای خروجی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه ای نوع C، باعث کاهش آبهستگی می شود.
- در سرریز با ارتفاع مانع ۰/۰۲ و ۰/۰۴ متر نسبت به سرریز بدون مانع، مقدار بیشینه عمق آبهستگی حدود ۸/۷ و ۱۹/۱ درصد کاهش می یابد.
- با افزایش ۵۰ درصدی ارتفاع موانع (از ۰/۰۲ متر به ۰/۰۴ متر)، بیشینه عمق آبهستگی حدود ۱۱/۴ کاهش می یابد.
- وجود مانع باعث کاهش مقدار آبهستگی در پنجه سرریز می شود.
- وجود مانع باعث افزایش فاصله بیشینه عمق آبهستگی از پنجه سرریز می شود. در سرریز با ارتفاع مانع ۰/۰۲ متر و ۰/۰۴ متر نسبت به سرریز بدون مانع، مقدار فاصله بیشینه عمق آبهستگی از پنجه سرریز حدود ۱۶/۴ و ۲۶/۹ درصد بیشتر می شود.
- شاخص آبهستگی در سرریز با ارتفاع ۰/۰۴ متر، کمترین مقدار را دارد که نسبت به سرریز بدون مانع حدود ۴۱/۲ درصد کمتر است.
- برای محاسبه بیشینه عمق آبهستگی سرریز با و بدون مانع، معادله ای با ضریب همبستگی ۹۹/۶ درصد ارائه شد.

منابع مورد استفاده

1. Abdi Chooplou, Ch., E. Bodaghi, M. Ghodsian and M Vaghefi. 2022a. Temporal evolution of scouring downstream of a trapezoidal PKW. *International Journal of River Basin Management*, 22(3): 1-14. <https://doi.org/10.1080/15715124.2022.2143513>
2. Abdi Chooplou, Ch., S. Kazerooni, M. Ghodsian and M. Vaghefi. 2022b. Experimental study of scouring downstream of type-A piano key weirs. *Arabian Journal of Geosciences* 15(23): 1702. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-11001-9>
3. Al-Shukur, A.H.K. and G.H. Al-Khafaji. 2018. Experimental study of the hydraulic performance of piano key weir. *International Journal of Energy and Environment* 9(1): 63-70.
4. Bodaghi, E., C. Abdi-Chooplou and M. Ghodsian. 2024. Experimental investigation of scour downstream of a type A trapezoidal piano key weir under free and submerged flow conditions. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 72(1): 34-48.
5. Bodaghi, E., M. Ghodsian and C. Abdi. 2023. The experimental study of downstream scouring of trapezoidal Piano key weir type A under free and submerged flow. *Journal of Hydraulics* 18(1): 1-18. <https://doi.org/10.30482/JHYD.2022.330389.1590>
6. Chiew, Y.M. 1992. Scour protection at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering* 118(9): 1260-1269. <https://doi.org/10.1061/ASCE0733-94291992118:91260>

7. Eslinger, K.R. and B.M. Crookston. 2020. Energy dissipation of type a piano key weir. *Water* 12(5): 1253.
8. Fathi, A., C. Abdi Chooplou and M. Ghodsian. 2024. Local scour downstream of type-A trapezoidal stepped piano key weir in sand and gravel sediments. *ISH Journal of Hydraulic Engineering* 30(4): 1–13. DOI: 10.1080/09715010.2024.2353612
9. Fathi A, C. Abdi Chooplou, M. Ghodsian. 2023. An Experimental Study of Flow Energy Loss in Trapezoidal Stepped Piano Key Weirs (PKWs). *Modares Civil Engineering Journal* 23(4) :163-174. <https://doi.org/10.22034/23.4.163>
10. Ghafouri, A., M. Ghodsian and Ch. Abdi. 2020. Experimental study on the effect of discharge and tailwater depth on bed topography downstream of a piano key weir. *Journal of Hydraulics* 15(3): 107-122. <https://doi.org/10.30482/JHYD.2020.236770.1465>
11. Ghodsian, M., Ch. Abdi and A. Ghafouri. 2021. Scouring of triangular and trapezoidal pianos key weir. *Journal of Hydraulics* 16(2): 43-58. <https://doi.org/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. <https://doi.org/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 Piano Key Weir Type C with Changing Height of Weir Width of Keys and Apron solid. *Al-Rafidain Engineering Journal* 27(1): 193-204. <https://doi.org/10.33899/rengj.2021.130402.1101>
14. Jüstrich, S., M. Pfister and A.J. Schleiss. 2016. Mobile riverbed scouring downstream of a piano key weir. *Journal of Hydraulic Engineering* 142(11): 04016043. <https://doi.org/10.1061/ASCE HY.1943-7900.0001189>
15. Kumar, B. and Z. Ahmad. 2022. Scour downstream of a piano key weir with and without a solid apron. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 148(1): 04021066. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001647](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001647)
16. Lantz, W., B.M. Crookston and M. Palermo. 2021. Apron and cutoff wall scour protection for piano key weirs. *Water* 13(17): 2332. <https://doi.org/10.3390/w13172332>
17. Mosalman Yazdi, A., S.A. Hosseini, S. Nazari and N. Amanian. 2020. Comparison of downstream scour of the rectangular and trapezoidal piano key weirs. *Journal of Hydraulics* 15(2): 95-112. <https://doi.org/10.30482/JHYD.2020.227522.1453>
18. Naghibzadeh, S.M., M. Heidarneshad, A. Masjedi and A. Bordbar. 2020. Experimental and Numerical Analysis of Energy Dissipation in Piano Key Weirs with Stepped and Baffled Barriers at Downstream Slop. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 51(10): 2431-2442.
19. Novák, P. and J. Čabelka. 1981. Models in hydraulic engineering: Physical principles and design applications. Monographs and amp; surveys in water resources engineering.
20. Rdhaiwi, A.Q., A. Khoshfetrat and A. Fathi. 2024. Experimental Comparison of Flow Energy Loss in Type-B and-C Trapezoidal Piano Key Weirs (PKWS). *Journal of Engineering and Sustainable Development* 28(1): 55-64. <https://doi.org/10.31272/jeasd.28.1.4>
21. Rdhaiwi, A.Q., A. Khoshfetrat and A. Fathi. 2023. Experimental Investigation of Scour Downstream of A C-Type Trapezoidal Piano Key Weir with Stilling Basin. *Journal of Engineering and Sustainable Development* 27(6): 688-697. <https://doi.org/10.31272/jeasd.27.6.2>
22. Safarzadeh, A. and B. Noroozi. 2014. Threedimensional hydrodynamics of arced piano key spillways. *Journal of Hydraulics* 9(3): 61-79. DOI: 10.30482/JHYD.2014.10176
23. Sajadi, S.M. 2017. Effect of baffled outlet keys at Piano Key Weir on dissipating energy. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research* 18(69): 77-92.
24. Singh, D. and M. Kumar. 2022. Gene expression programming for computing energy dissipation over type-B piano key weir. *Renewable Energy Focus* 41: 230-235.
25. 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. OnePetro <https://doi.org/10.1115/OMAE2010-20719>

Experimental Investigation of the Obstacle Presence Effect at the End of the Outlet Keys of C-Type Piano Key Weir on its Downstream Scour

Y. N. Abdulhasan and A. Khoshfetrat^{1*}

(Received: March 7-2024 ; Accepted: June 19-2024)

Abstract

Piano key weirs are a type of non-linear weir that have a higher discharge coefficient than similar linear weirs. These hydraulic structures have a lightweight foundation and a simple structure is designed and installed on dams and drainage channels. Due to the high efficiency of these weirs, the investigation of downstream scour and ways to reduce it has been the focus of engineers in recent years. In the present study, a trapezoidal type C piano key weir, three discharges, and three tailwater depths were used. Two obstacles with heights of 0.02 and 0.04 meters were also used at the end of the weir exit keys. The results showed that the presence of an obstacle reduces scour at the toe of the weir. The amount of reduction in scour at the toe of the weir was greater in the weir with a larger obstacle height than in the weir with a smaller obstacle height, and in both cases was less than in the simple weir. The presence of an obstacle reduces the maximum depth of scour and moves the distance of the maximum depth of scour away from the toe of the weir. In the weir with obstacle heights of 0.02 and 0.04 meters, compared to the weir without an obstacle, the amount of maximum scour depth is approximately 16.4% and 26.9% less, and the distance of the maximum scour depth is approximately 8.7% and 19.1% more than the weir without an obstacle. The scour index in weirs with obstacles is less than in weirs without obstacles, which can reduce the risk of weir overturning. The lowest value of the scour index was observed in the weir with an obstacle height of 0.04 meters, which is approximately 41.2% less than the weir without an obstacle.

Keywords: Scour, Weir toe, Piano key weir (PKW), Scour index, Obstacle

1. Civil Engineering Department, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

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