

## 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<sup>۱\*</sup>

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

### چکیده

سرریزهای کلیدپیانویی جزء جدیدترین سرریزهای غیر خطی هستند که ضریب آبگذری بیشتری نسبت به سرریزهای مشابه دارند. این سازه‌های هیدرولیکی دارای فونداسیون سبک و ساده‌ای هستند که بر روی سدها و کانال‌های زهکشی طراحی و نصب می‌شوند. به دلیل راندمان بالای این سرریزها؛ لذا بررسی آبشستگی پایین دست آن‌ها و راهکار برای کاهش مقدار آن در سال‌های اخیر، مورد توجه مهندسان قرار گرفته است. در این تحقیق 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 مشاهده شد که تقریباً ۴۱/۲ درصد کمتر از سرریز بدون مانع است.

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

۱. آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

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

## مقدمه

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 (Yazdi et al., 2020). 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 (Ghodisian et al., 2021). 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 (Jamal et al., 2021). لتز 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  $1/5$  برابر ارتفاع سرریز معرفی کردند (Lantz et al., 2021). 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 (Abdi Chooplou et al., 2022a). ایشان در تحقیقی 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 (Abdi Chooplou et al., 2022b). بداغی 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 (Bodaghi et al., 2023). رضیوی و همکاران (۲۰۲۳)، به این نتیجه رسیدند که وجود حوضچه آرامش نوع اول (USBR1) در سرریز دوزنقه‌ای نوع C، میزان آبشستگی را کاهش می‌دهد (Rdhaiwi et al., 2023). بداغی و همکاران (۲۰۲۴)، به این

غیر خطی بودن تاج سرریزهای کلیدپیانویی، باعث افزایش ضریب آبگذری آن‌ها تا حدود سه الی چهار برابر می‌شود (Safarzadeh and Noroozi, 2014). محققانی 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، تحقیقات ارزشمندی انجام دادند. همچنین افرادی نیز روی آبشستگی سرریزهای کلیدپیانویی، مطالعات مفیدی انجام دادند که به آن‌ها پرداخته می‌شود. 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 (Jüstrich et al., 2016). 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. ایشان مقدار آبشستگی در سرریز دارای نه کلید را به مراتب بیشتر از سرریز دارای پنج کلید مشاهده کردند (Gohari and Ahmadi., 2019). 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 (Ghafouri et al., 2020). 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 (Kumar and Ahmad., 2020). یزدی و همکاران (۲۰۲۰)، با بررسی آزمایشگاهی روی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای و مستطیلی نوع A، به این نتیجه رسیدند که میزان آبشستگی

انرژی جنبشی در بالادست سرریز، معادله بدون بعد زیر حاصل می‌شود.

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

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

عدد رینولدز  $\left(Re = \frac{q}{g}\right)$  صرف نظر شد

(Sumer and Fredsoe., 1991) و همچنین به دلیل عمق بیشتر از

۰/۰۳ متر روی تاج سرریز، از عدد وبر  $\left(We = \frac{\rho_w q^2}{H_u \sigma}\right)$  صرف

نظر خواهد شد (Novák and Čabelka., 1981). با ترکیب عدد

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

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

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

$\frac{h}{H_u}$  پارامتر  $\frac{h}{H_d}$  حاصل می‌شود. جدول ۱ مشخصات

داده‌های هیدرولیکی جریان در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد که در

تمامی آزمایش‌ها 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 روش‌ها

آزمایش‌ها 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 آرام‌کننده‌های

جریان شده و سپس وارد فلوم آزمایشگاهی می‌شود و پس از طی

۵/۵ متر به سرریز می‌رسد (شکل ۲). مطابق شکل ۳، سرریز

دارای عرض W=0/6 m، ارتفاع P=0/2 m، عرض کلید ورودی

W<sub>i</sub>=0/215 m، عرض کلید خروجی W<sub>o</sub>=0/075 m، طول لبه

آویزان در پایین دست سرریز B<sub>o</sub>=0/13 m، طول دیواره‌های جانبی

B=0/5 m، طول تاج L=2/6 m و ضخامت تاج T<sub>s</sub>=0/01 m

است. شیب کانال برابر صفر و دمای آب بین ۷ تا ۱۳ درجه

سانتی‌گراد متغیر بود. از سه دبی ۳۰، ۳۵ و ۴۰ لیتر بر ثانیه

نتیجه رسیدند که در سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع A، با

افزایش عدد فرود ذرات و کاهش حالت استغراق جریان، میزان

آبشستگی بیشتر می‌شود (Bodaghi et al., 2024).

با توجه به ضریب آبگذری بیشتر و پی سبک‌تر سرریزهای

کلیدپیانویی؛ لذا بررسی آبشستگی در این سرریزها حائز اهمیت

است. با توجه به تحقیقات ارزشمند بالا، کمبود تحقیق روی

سرریزهای کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع C به چشم می‌خورد و

همچنین وجود مانع در انتهای کلیدهای خروجی و تأثیر آن بر

آبشستگی بررسی نشده است. در این تحقیق سعی شد از سرریز

کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع C و مانع در انتهای کلیدهای

خروجی سرریز کلیدپیانویی استفاده شود تا تأثیر این موانع بر

میزان آبشستگی مورد بررسی قرار گیرد. همچنین از سه عمق

پایاب، سه دبی جریان و دو مانع استفاده شد. دبی‌های مورد

بررسی برابر ۰/۰۳، ۰/۰۳۵ و ۰/۰۴ متر مکعب بر ثانیه، عمق

پایاب‌ها 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 آبشستگی پایین دست

سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای را همراه با مانع در انتهای

کلیدهای خروجی، نشان می‌دهد.

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

در معادله بالا، L<sub>s</sub> فاصله بیشینه عمق آبشستگی از پنجه سرریز و

d<sub>s</sub> ارتفاع بیشینه عمق آبشستگی هستند که در روابط به صورت

ξ نشان داده شده‌اند. همچنین q دبی در واحد عرض، H<sub>u</sub> عمق

جریان به علاوه ارتفاع معادل انرژی جنبشی در بالادست

سرریز، H<sub>d</sub> عمق جریان به علاوه ارتفاع معادل انرژی جنبشی

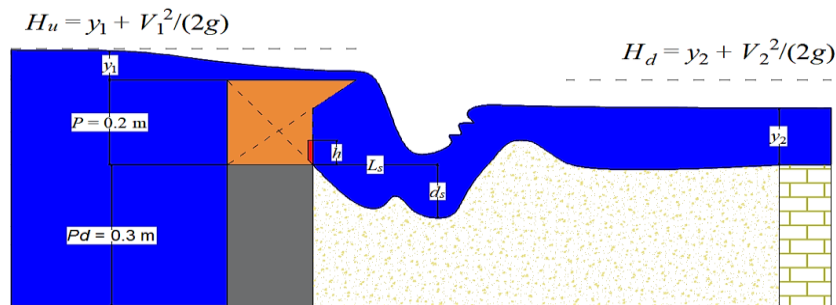
در پایاب، g شتاب گرانش، μ لزجت دینامیکی، σ ضریب

کشش سطحی، ρ<sub>w</sub> چگالی آب، ρ<sub>s</sub> چگالی مصالح بستر،

d<sub>50</sub> قطر متوسط ذرات و h ارتفاع موانع هستند. با استفاده از

تئوری π باکینگهام و در نظر گرفتن سه متغیر تکراری دبی در

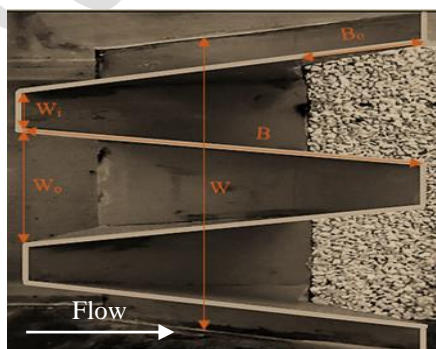
واحد عرض، چگالی آب و عمق جریان به علاوه ارتفاع معادل



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

جدول ۱. مشخصات هیدرولیکی جریان مورد بررسی در تحقیق

ردیف	Q (m <sup>3</sup> /s)	H <sub>u</sub> (m)	H <sub>d</sub> (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 تحقیق



شکل ۲. کانال آزمایشگاهی

روشن کردن پمپ، از یک ورق فلزی با جنس گالوانیزه، روی بستر استفاده شد و پس از تنظیم دبی و عمق پایاب، این بستر فلزی از روی بستر، به آرامی برداشته شد تا از آبشستگی اولیه جلوگیری شود. مصالح شن مورد استفاده در بستر پایین دست

استفاده شد. دبی جریان، توسط یک شیر و یک مانیتور (برای نشان دادن مقدار آن) و یک پمپ، با خطای  $\pm 0.01$  درصد صورت گرفت. با استفاده از دریچه انتهایی کانال آزمایشگاهی، سه عمق پایاب ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۱۵ متر، تنظیم شدند. قبل از

سرعت آن می‌شد. پس از کاهش سرعت و بالا آمدن سطح جریان در روی موانع، جریان به آرامی و دورتر از پنجه سرریز، وارد پایین دست می‌شد. 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  $0.04$  متر و مانع کوچک‌تر به ارتفاع  $0.02$  متر است. افزایش ارتفاع مانع باعث ریزش جریان به دورتر از پنجه می‌شد. مشاهدات حاکی از آن است که مقدار بیشینه عمق آبستگي 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 می‌شد 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 می‌شد.

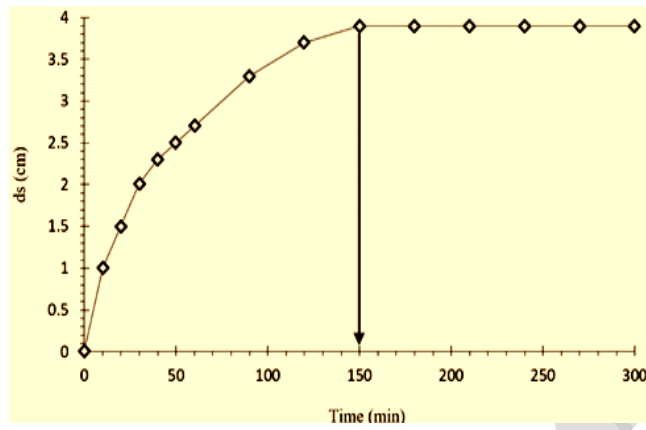
ریزش جریان از کلیدهای ورودی به پایین دست، موجب این می‌شود که مصالح بستر به کمی عقب‌تر و به سمت پنجه سرریز، نزدیک شوند. دلیل آن نیز می‌تواند وجود لبه آویزان در پایین دست سرریز و یا بزرگ‌تر بودن دانه‌های بستر (شن) باشد (شکل ۷). با افزایش دبی جریان و عمق جریان در بالادست سرریز، بیشینه عمق آبستگي افزایش می‌یابد. در این حالت تنش برشی بیشتر از حالت بحرانی خود شده و مقدار آبستگي افزایشی می‌شود. همچنین با افزایش عمق پایاب، مقدار بیشینه عمق آبستگي 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 آبستگي نشان می‌دهد. همان‌طور که پیدا است، با افزایش عدد فرود ذرات، بیشینه عمق آبستگي 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

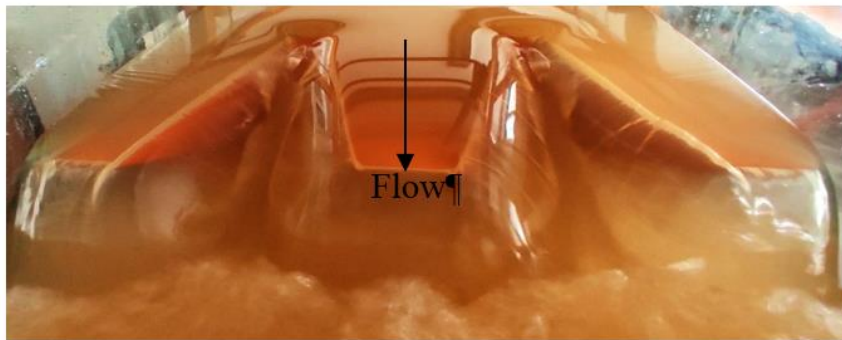
سرریز، دارای دانه‌بندی یکنواخت و غیر چسبنده و با قطر متوسط ذرات برابر  $7/5$  میلی‌متر و با چگالی ویژه برابر  $2/65$  تن بر متر مکعب است. ضریب یکنواختی مصالح بستر کمتر از  $1/5$  است و به همین دلیل مصالح استفاده شده در تمامی آزمایش‌ها، یکنواخت هستند (Fathi et al., 2024). همچنین عمق بالادست و پایین دست سرریز با استفاده از عمق سنج سوزنی (با خطای  $\pm 1$  میلی‌متر) اندازه‌گیری شدند. از دو ارتفاع لبه در انتهای کلیدهای خروجی سرریز نیز استفاده شد. این موانع با ارتفاع‌های  $0.02$  و  $0.04$  متر و ضخامت  $0.01$  متر بودند. پس از گذشت مدت زمان  $150$  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  $16$  ساعت انجام شد. تغییرات بیشینه آبستگي ( $d_s$ ) در زمان  $150$  دقیقه برای مصالح استفاده شده، کمتر از یک میلی‌متر است و برابر با معیار چپو، این زمان به‌عنوان زمان تعادل در نظر گرفته شد (Chiew., 1992). شکل ۴، بیشینه عمق آبستگي در دیواره‌های کانال و در زیر نیم‌کلیدهای ورودی را نسبت به زمان و همچنین زمان تعادل مصالح نشان می‌دهد.

## نتایج و بحث

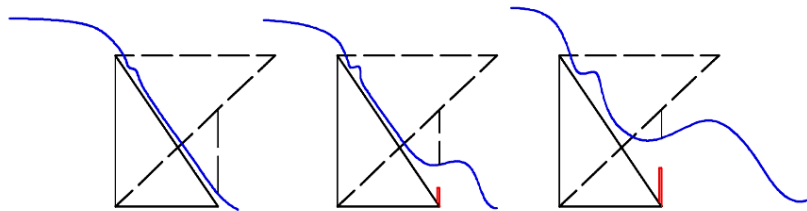
جریان به صورت جت مایل از کلیدهای خروجی به پایین دست و به صورت جت ریزی از کلیدهای ورودی به پایین دست و داخل کلیدهای خروجی انتقال می‌یابد (شکل ۵). دلیل تغییر رنگ آب در شکل ۵، وجود اندکی رسوب معلق در مخازن است که به دلیل کمبود آب مصرفی، آب داخل آن‌ها تعویض نشدند. همچنین این رسوبات، هیچ تأثیری بر روند آبستگي نمی‌گذارند. مقدار آبستگي در زیر کلیدهای خروجی به مراتب بیشتر از زیر کلیدهای ورودی است (Fathi et al., 2024). به همین دلیل وجود مانع در کلیدهای خروجی می‌تواند باعث کاهش سرعت جریان و در نتیجه کاهش آبستگي شود. جریان خروجی از کلیدها در پشت موانع، جمع شده و باعث کاهش



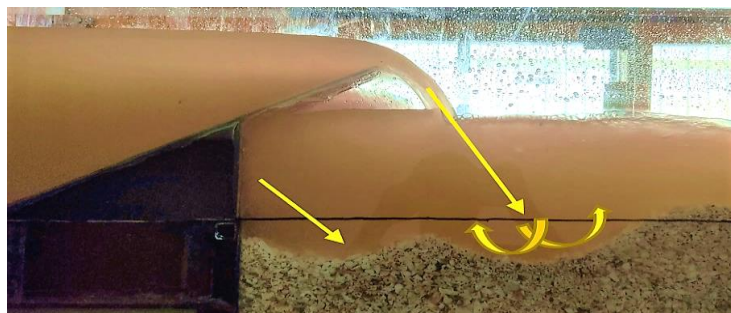
شکل ۴. تعادل زمانی آبستگي در دیواره‌ها و زیر نیم کلیدهای ورودی



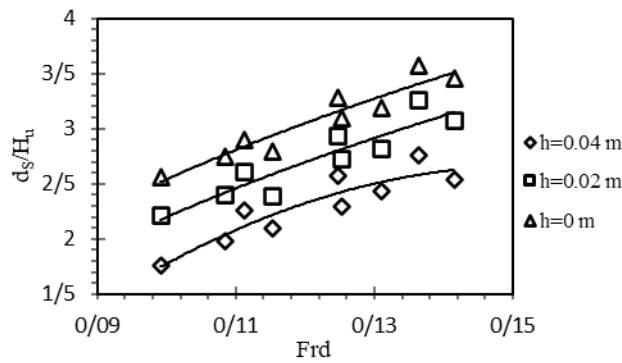
شکل ۵. جریان عبوری از سرریز کلیدپیانویی



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

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

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

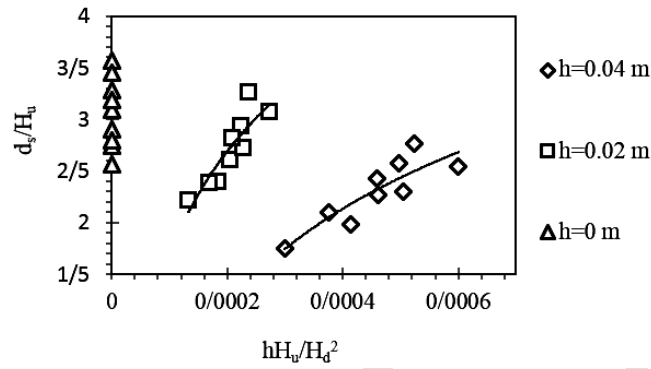
شکل (۱۱-الف) و (۱۱-ب) تأثیر عدد فرود ذرات و پارامتر بدون بعد شده به دست آمده را نسبت به فاصله بیشینه عمق آبستگي نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، با افزایش عدد فرود ذرات، این فاصله نیز افزایش می‌یابد. دلیل آن افزایش تنش برشی جریان نسبت به تنش برشی بحرانی است. همچنین با افزایش پارامتر ترکیب شده، مقدار 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 حائز اهمیت است. هرچه شاخص آبستگي کوچک‌تر باشد، احتمال خطر واژگونی سرریز نیز کمتر است (Fathi et al., 2024). کمتر بودن شاخص آبستگي می‌تواند باعث کمتر بودن بیشینه عمق آبستگي و یا بیشتر بودن فاصله بیشینه عمق آبستگي نسبت به پنجه سرریز

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 بع 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.

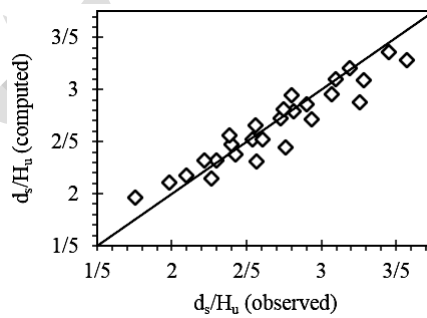
در سرریز با ارتفاع مانع برابر ۰/۰۴ متر نسبت به سرریز ساده، مقدار بیشینه عمق آبستگي حدود ۱۹/۱ درصد کاهش یافته است. در سرریز با ارتفاع مانع برابر ۰/۰۲ متر نسبت به سرریز ساده نیز مقدار بیشینه عمق آبستگي حدود ۸/۷ درصد کاهش یافته است. با افزایش ۵۰ درصدی ارتفاع موانع در انتهای کلیدهای خروجی (از ۰/۰۲ متر به 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



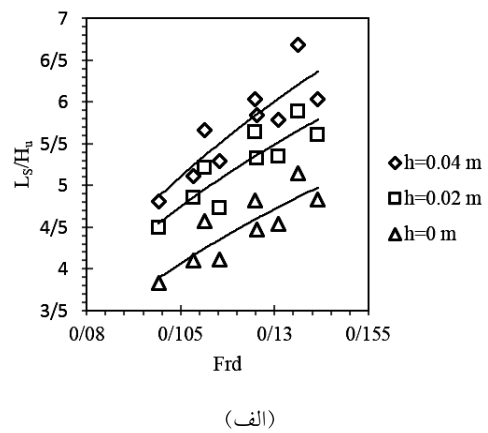
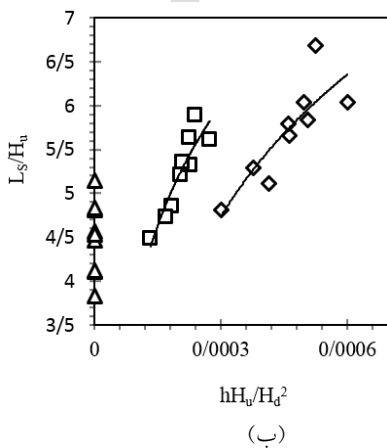
شکل ۹. تأثیر پارامتر بدون بعد شده  $hH_u/H_d^2$  بر بیشینه عمق آبستگي

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  $hH_u/Hd_2$  بر فاصله بیشینه عمق آبستگي نسبت به پنجه سرریز

## نتیجه گیری

باشد. میانگین شاخص آبستگي در سرریزهای با ارتفاع مانع برابر ۰/۰۲، ۰/۰۴ و ۰/۰۳، به ترتیب برابر ۱/۳۶، ۱/۰۳ و ۰/۸۰ است. کمترین مقدار شاخص آبستگي 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 آبستگي حدود ۲۴/۳ و ۴۱/۲ درصد بیشتر است. ارتفاع سرریز در مطالعه جاستریچ و همکاران (۲۰۱۶)، ۰/۱۵ متر است. ایشان ۶ آزمایش بر روی مواد بستر شنی انجام دادند. میانگین شاخص آبستگي در مطالعه ایشان ۱/۴۹ است. در مطالعه حاضر میانگین شاخص آبستگي در مواد شنی ۱/۳۶ است که ۸۷ درصد با میانگین شاخص آبستگي در مطالعه جاستریچ و همکاران (۲۰۱۶) تفاوت دارد. لتز و همکاران (۲۰۲۲)، با بررسی آبستگي سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی نوع A و با قطرهای متوسط مصالح بستر به ترتیب ۰/۰۱۳ متر و ۰/۰۶۵ متر، دریافتند که میانگین شاخص آبستگي در مطالعه ایشان به ترتیب ۱/۴۰۳ و ۱/۷۰۸ بوده است. دلیل افزایش شاخص آبستگي در کار ایشان می تواند ارتفاع سرریز ۰/۴۲ متری در تحقیق ایشان باشد. سرریز مورد مطالعه در کار ایشان ۲/۱ برابر ارتفاع سرریز در مطالعه حاضر است. میانگین شاخص آبستگي 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.

- وجود مانع در انتهای کلیدهای خروجی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه ای نوع C، باعث کاهش آبستگي می شود.

- در سرریز با ارتفاع مانع ۰/۰۲ و ۰/۰۴ متر نسبت به سرریز بدون مانع، مقدار بیشینه عمق آبستگي 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 آبستگي حدود ۱۱/۴ کاهش می یابد.

- وجود مانع باعث کاهش مقدار آبستگي در پنجه سرریز می شود.

- وجود مانع باعث افزایش فاصله بیشینه عمق آبستگي 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 آبستگي از پنجه سرریز حدود ۱۶/۴ و ۲۶/۹ درصد بیشتر می شود.

- شاخص آبستگي 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 آبستگي سرریز با و بدون مانع، معادله ای با ضریب همبستگی ۹۹/۶ درصد ارائه شد.

## منابع مورد استفاده

1. Abdi Chooplou, Ch., Bodaghi, E. Ghodsian, M., & Vaghefi, M. 2022a. Temporal evolution of scouring downstream of a trapezoidal PKW. *International Journal of River Basin Management*, 1-14. <https://doi.org/10.1080/15715124.2022.2143513>
2. Abdi Chooplou, Ch., Kazerooni, S., Ghodsian, M., & Vaghefi, M. 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 Al-Khafaji, G.H., 2018. Experimental study of the hydraulic performance of piano key weir. *International Journal of Energy and Environment*, 9(1), pp.63-70.
4. Bodaghi, E., Abdi-Chooplou, C. and Ghodsian, M., 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), pp.34-48.
5. Bodaghi, E., Ghodsian, M. and Abdi, C., 2023. The experimental study of downstream scouring of trapezoidal Piano key weir type A under free and submerged flow. *Journal of Hydraulics*, 18(1), pp.18-1. <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), pp.1260-1269. <https://doi.org/10.1061/ASCE0733-94291992118:91260>
7. Ghafouri, A., Ghodsian, M. & Abdi, Ch., 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), pp.107-122. <https://doi.org/10.30482/JHYD.2020.236770.1465>
8. Fathi, A., Abdi Chooplou, C. and Ghodsian, M. 2024. Local scour downstream of type-A trapezoidal stepped piano key weir in sand and gravel sediments. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, pp. 1–13. DOI: 10.1080/09715010.2024.2353612
9. Fathi A, Abdi Chooplou C, Ghodsian M. An Experimental Study of Flow Energy Loss in Trapezoidal Stepped Piano Key Weirs (PKWs). *MCEJ* 2023; 23 (4) :163-174. <https://doi.org/10.22034/23.4.163>
10. Ghodsian, M., Abdi, Ch. & Ghafouri, A., 2021. Scouring of triangular and trapezoidal pianos key weir. *Journal of Hydraulics*, 16(2), pp.43-58. <https://doi.org/10.30482/JHYD.2021.261439.1497>
11. Gohari, S. & Ahmadi, F., 2019. Experimental study of downstream scour of piano keys weirs. *Journal of Water and Soil Conservation*, 26(1), pp.91-109. <https://doi.org/10.22069/JWSC.2019.14680.2961>
12. Jamal, A.A.R., Tahaa, K.Y. & Hayawi, G.A.A.M., 2022. Experimental Study of Scour Downstream Piano Key Weir Type C with Changing Height of Weir Width of Keys and Apron. <https://doi.org/10.33899/rengj.2021.130402.1101>
13. Jüstrich, S., Pfister, M. & Schleiss, A.J., 2016. Mobile riverbed scouring downstream of a piano key weir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(11), p.04016043. <https://doi.org/10.1061/ASCE HY.1943-7900.0001189>
14. Kumar, B. & Ahmad, Z., 2022. Scour downstream of a piano key weir with and without a solid apron. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 148(1), p.04021066. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001647](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001647)
15. Lantz, W., Crookston, B.M. & Palermo, M., 2021. Apron and cutoff wall scour protection for piano key weirs. *Water*, 13(17), p.2332. <https://doi.org/10.3390/w13172332>
16. Mosalman Yazdi, A., Hosseini, S.A., Nazari, S. & Amanian, N., 2020. Comparison of downstream scour of the rectangular and trapezoidal piano key weirs. *Journal of Hydraulics*, 15(2), pp.95-112. <https://doi.org/10.30482/JHYD.2020.227522.1453>
17. Naghibzadeh, S.M., Heidarneshad, M., Masjedi, A. and Bordbar, A., 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), pp.2431-2442.
18. Novák, P. & Čabelka, J., 1981. Models in hydraulic engineering: Physical principles and design applications. Monographs & surveys in water resources engineering.
19. Rdhaiwi, A.Q., Khoshfetrat, A. and Fathi, A., 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), pp.55-64. <https://doi.org/10.31272/jeasd.28.1.4>
20. Rdhaiwi, A.Q., Khoshfetrat, A. and Fathi, A., 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), pp.688-697. <https://doi.org/10.31272/jeasd.27.6.2>
21. R. Eslinger, K. and Crookston, B.M., 2020. Energy dissipation of type a piano key weir. *Water*, 12(5), p.1253.
22. Safarzadeh, A. & Noroozi, B., 2014. Threedimensional hydrodynamics of arced piano key spillways. *Journal of Hydraulics*, 9(3), pp.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), pp.77-92.
24. Singh, D. and Kumar, M., 2022. Gene expression programming for computing energy dissipation over type-B piano key weir. *Renewable Energy Focus*, 41, pp.230-235.
25. Sumer, B.M. & Fredsoe, J., 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>