

تأثیر بلوک روی سازه‌ی تونلی موجود در سرریز کلیدپیانویی بر آبشستگی موضعی

پایین دست آن

وادی محمدوادی^۱، علی خوش فطرت^{۱*}، موسی حبیب جاسم^۲، نیلوفر سالمی^۱

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

۲. گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کربلا، کربلا، عراق.

چکیده

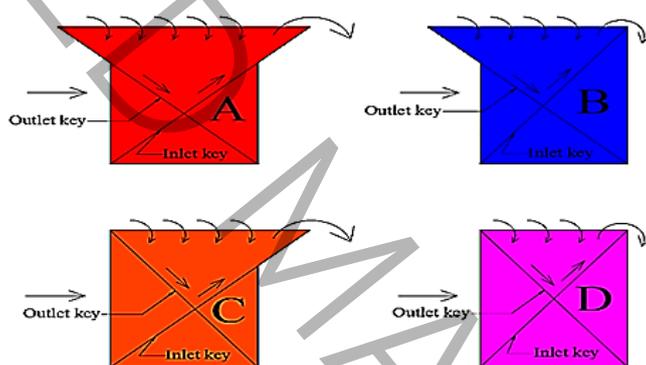
سرریزهای کلیدپیانویی، شکل جدیدی از سرریزهای کنگره‌ای و به صورت غیر خطی هستند. به دلیل رانده‌مان بالای این سرریزها در عبور جریان؛ بررسی آبشستگی موضعی و راهکار برای کاهش آن دارای اهمیت فراوانی است. در تحقیق حاضر از بلوک با هندسه متفاوت در کلیدهای خروجی تونل‌دار سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B استفاده شد. سرریز کلیدپیانویی مورد استفاده با ارتفاع ۰/۲۰ متر و دارای سه سیکل (سه کلید خروجی، دو کلید ورودی و دو نیم‌کلید ورودی) است. بلوک‌ها با هندسه‌های مکعب مستطیلی، دوزنقه‌ای و استوانه‌ای در هر کلید خروجی سرریز و روی سازه‌ی تونلی نصب شدند. سازه‌ی تونلی، باعث عدم اختلاط جریان خروجی از کلیدهای ورودی و خروجی می‌شد. بلوک‌ها، جریان و بیشینه عمق آبشستگی را به فاصله‌ی دورتری از پنجه سرریز هدایت می‌کنند و مانند مانعی در برابر جریان عمل کرده و سرعت جریان خروجی از کلیدها را کاهش می‌دهند. فاصله دورتر بیشینه عمق آبشستگی از پنجه سرریز، می‌تواند باعث کاهش خطر واژگونی سرریز شود. در بلوک‌های مستطیلی، بیشینه عمق آبشستگی کاهش بیشتری یافته و محل آن از پنجه سرریز دورتر می‌گردد. همچنین با افزایش عدد فرود ذرات، با افزایش دبی جریان و کاهش عمق پایاب، بیشینه عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. محدوده عدد فرود ذرات در تحقیق حاضر بین ۰/۴۳ تا ۰/۵۵ متغیر است. در نهایت از آنالیز ابعادی برای محاسبه بیشینه عمق آبشستگی استفاده شد.

کلمات کلیدی

کلیدهای خروجی، شاخص آبشستگی، مستطیلی، نوع B، هندسه متفاوت بلوک.

* نویسنده مسئول: ali.khoshfetrat@iaui.ir

سرریزهای کلیدپیانویی (PKWs) شکل جدیدی از سرریزهای غیر خطی هستند که ظرفیت عبور جریان بیشتری نسبت به دیگر سرریزهای مشابه دارند. این سرریزها دارای شکل‌های مستطیلی، مثلثی و دوزنقه‌ای در پلان و درای 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. شکل (۱) انواع مدل‌های سرریز کلیدپیانویی را نشان می‌دهد. سرریزهای کلیدپیانویی دارای فونداسیون و پی سبکی هستند و علاوه بر سدها، در کانال‌های زهکشی، کانال‌های کشاورزی و رودخانه‌ها نیز جای می‌گیرند [۱]. به دلیل راندمان بالای این سرریزها، بررسی آبشستگی موضعی و راهکار برای کاهش آن و همچنین افزایش اتلاف انرژی 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.



شکل ۱. انواع مدل‌های سرریز کلیدپیانویی از نمای جانبی

Fig. 1. All types of PKWs from the side view

بسیاری از محققان، تأثیر جریان و قطر مصالح بستر را بر آبشستگی موضعی در پایین دست سرریزهای کلیدپیانویی مورد بررسی قرار دادند. جاستریچ و همکاران (۲۰۱۶)، غفوری و همکاران (۲۰۲۰)، دهرشید و همکاران (۲۰۲۲)، عبدی چوپلو و همکاران (۲۰۲۳ و ۲۰۲۴ الف)، بداعی و همکاران (۲۰۲۳ و ۲۰۲۴) و دهقان و کریمی (۲۰۲۴) روی آبشستگی موضعی پایین دست سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی و دوزنقه‌ای نوع A و D تأثیر دبی جریان، عمق پایاب، فاصله ریزش جریان، دانه بندی مصالح بستر را در حالت جریان آزاد و مستغرق به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار دادند [۲-۹]. ایشان دریافتند که با افزایش دبی جریان، سرعت جریان افزایش یافته و باعث افزایش تنش برشی روی بستر پایین دست سرریز می‌شود و در نهایت افزایش بیشینه عمق آبشستگی را به همراه دارد. با افزایش عمق پایاب طول انتشار جریان در پایین دست سرریز افزایش یافته و باعث کاهش سرعت جریان شده 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 قدرت گردابه‌ها، اغتشاش جریان افزایش یافته و مصالح بستر به راحتی به پایین دست منتقل شده و در نهایت باعث افزایش بیشینه عمق آبستگي می‌شود. با افزایش قطر متوسط مصالح بستر، سرعت جریان و تنش برشی موجود در روی بستر به راحتی نمی‌تواند مصالح را جابه‌جا کند و همین امر باعث کاهش بیشینه عمق آبستگي می‌شود. در حالت جریان مستغرق نیز اغتشاش جریان و قدرت گردابه‌ها به مراتب کاهش می‌یابد و همین امر باعث کاهش بیشینه عمق آبستگي می‌شود. در تحقیق حاضر و با توجه به مطالعات بالا، از دبی جریان متفاوت، عمق پایاب متفاوت و مصالح بستر شنی در حالت جریان آزاد استفاده شد.

بسیاری دیگر از محققان نیز تأثیر هندسه سرریزهای کلیدپیانویی را بر بیشینه عمق آبستگي مورد بررسی قرار دادند. گوهری و احمدی (۲۰۱۹)، یزدی و همکاران (۲۰۲۰ و ۲۰۲۲)، قدسیان و همکاران (۲۰۲۱) و جمال و همکاران (۲۰۲۲) آبستگي موضعی پایین دست سرریزهای مستطیلی، دوزنقه‌ای و مثلثی نوع A را مورد مطالعه قرار دادند [۱۰-۱۴]. ایشان دریافتند که بیشینه عمق آبستگي در سرریزهای کلیدپیانویی دوزنقه‌ای کمتر از سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی و مثلثی است. ایشان همچنین دریافتند که فاصله بیشینه عمق آبستگي در سرریزهای کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نیز بیشتر است و خطر واژگونی سرریز را می‌تواند کاهش دهد. ایشان تعداد سیکل‌های سرریز، ارتفاع سرریز و نسبت عرض کلیدهای ورودی به خروجی را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که با افزایش تعداد سیکل‌های سرریز، ارتفاع آن و افزایش نسبت عرض کلیدهای ورودی به خروجی، بیشینه عمق آبستگي افزایش می‌یابد. دلیل آن افزایش سرعت جریان و افزایش فاصله ریزش جریان است که قبلاً به این موارد اشاره شد. در تحقیق حاضر نیز از سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B و با ارتفاع ۰/۲۰ متر و با نسبت عرض کلیدهای ورودی به خروجی ۱ استفاده شد.

بسیاری دیگر از محققان نیز تأثیر سازه‌های مازاد روی تاج، کلیدهای خروجی و پایین دست سرریزهای کلیدپیانویی را بر بیشینه عمق آبستگي مورد بررسی قرار دادند. لنتز و همکاران (۲۰۲۱)، کومار و احمد (۲۰۲۲)، رضیوی و همکاران (۲۰۲۳)، فتحی و همکاران (۲۰۲۴)، عبدی چوپلو و همکاران (۲۰۲۴ ب)، کازرونی و همکاران (۲۰۲۴)، فتحی و همکاران (۲۰۲۵) و مشالی و همکاران (۲۰۲۵) از کفبند، پله، بافل با هندسه ثابت، تیغه‌های جداکننده جریان و چامپ در سرریزهای کلیدپیانویی نوع A و C استفاده کردند [۱۵-۲۲]. ایشان دریافتند که کفبند باعث کاهش بیشینه عمق آبستگي می‌شود و دلیل آن کاهش قدرت جت‌های خروجی از کلیدهای ورودی و خروجی سرریز روی کفبند است. تعداد پله‌های متفاوت و بافل با هندسه ثابت در کلیدهای خروجی سرریز نیز باعث کاهش سرعت جریان داخل کلیدهای خروجی می‌شوند و بیشینه عمق آبستگي را کاهش می‌دهند. وجود پله‌ها و بافل مانند مانع و زبری در کلیدهای خروجی عمل کرده و باعث کاهش قدرت گردابه‌های موجود در کلیدهای خروجی می‌شوند. وجود چامپ در کلیدهای خروجی سرریز باعث افزایش فاصله ریزش جریان موجود در کلیدهای

خروجی سرریز به فاصله‌ای دورتر از پنجه سرریز می‌شود و بیشینه عمق آبشستگی را از پنجه سرریز دور می‌کند. همین امر می‌تواند باعث کاهش خطر احتمالی واژگونی سرریز شود. وجود تیغه‌های جداکننده جریان باعث کاهش طول موثر تاج سرریز و افزایش ریزش جریان به فاصله دورتری از پنجه سرریز شده و بیشینه عمق آبشستگی را کاهش و از پنجه سرریز دورتر می‌کند. باباخواه و خوش فطرت (۲۰۲۴)، آبشستگی موضعی پایین دست سرریزهای کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع B را همراه با مصالح طبیعی ریپرپ مورد بررسی قرار دادند [۲۳]. ایشان دریافتند که با افزایش طول ریپرپ، بیشینه عمق آبشستگی کاهش می‌یابد و فاصله آن نسبت به پنجه سرریز دورتر می‌شود. همچنین ایشان بیان کردند که ریپرپ به دلیل طبیعی بودن، خطر زیست‌محیطی را نسبت به کفبند کاهش می‌دهد و قیمت آن ارزان تر است. پانتی (۲۰۲۵) نیز در ادامه کار باباخواه و خوش فطرت (۲۰۲۴) از ریپرپ استفاده کرده و اثر چوب‌های عبوری در جریان را بر آبشستگی موضعی در پایین دست سرریز کلیدپیانویی مورد بررسی قرار دادند [۲۳-۲۴]. در تحقیق حاضر نیز از بلوک با هندسه‌های متفاوت روی سازه‌ی تونلی در کلیدهای خروجی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی استفاده شد تا مانند مانع عمل کرده و بیشینه عمق آبشستگی را کاهش دهند.

با توجه به مطالعات موجود روی آبشستگی موضعی پایین دست سرریزهای کلیدپیانویی همچنان به راهکارهایی ارزان تر و بهینه تر برای کاهش آبشستگی در این سرریزها و به ویژه سرریزهای کلیدپیانویی نوع B نیاز است. در مطالعه حاضر و برای اولین بار، در صورت بهترین دانش ما، از سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B همراه با هندسه متفاوت بلوک روی سازه‌ی تونلی در کلیدهای خروجی آن استفاده شد. همچنین از سه دبی مختلف جریان، سه عمق پایاب مختلف، مصالح بستر شن، سازه‌ی تونلی با هندسه ثابت و بلوک‌های مکعب مستطیلی و دوزنقه‌ای و استوانه‌ای در هر کلید خروجی سرریز استفاده شد. در تحقیق حاضر محدودیت‌هایی مانند دائمی بودن جریان و واحد بودن ضریب اصلاح سرعت در نظر گرفته شده است. همچنین در نظر نگرفتن تاثیر گل و لای و آشغال‌های موجود در جریان در مواقع سیلابی نیز یکی دیگر از محدودیت‌های مطالعه حاضر است. در ادامه از آنالیز ابعادی جهت بسط نتایج تحقیق حاضر به طبیعت نیز استفاده شد. با کمک گرفتن از آنالیز ابعادی نیز می‌توان بیشینه عمق آبشستگی را به صورت بدون بعد محاسبه نمود.

آنالیز ابعادی

رابطه (۱)، پارامترهای موثر بر آبشستگی موضعی پایین دست سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B را همراه با هندسه متفاوت بلوک روی سازه‌ی تونلی موجود در کلیدهای خروجی آن نشان می‌دهد. در رابطه (۱)، Z_s بیشینه عمق آبشستگی، X_s فاصله بیشینه عمق آبشستگی نسبت به پنجه سرریز، q دبی در واحد عرض جریان در بالادست سرریز، E_1 انرژی مخصوص جریان در بالادست سرریز، E_2 انرژی مخصوص جریان در پایین دست سرریز، g نیروی گرانش، σ ضریب کشش سطحی، μ لزجت دینامیکی،

ρ چگالی جریان، $\Delta\rho$ اختلاف چگالی مصالح بستر (ρ_s) با چگالی جریان، d_{50} قطر متوسط مصالح بستر و Type نمایشگر سرریز ساده، سرریز تونلی و سرریزهای دارای بلوک در روی تونل هستند.

انرژی مخصوص جریان در بالادست سرریز از رابطه $(E_1 = P + h + (V_1^2/2g) = P + H)$ و انرژی مخصوص در پایین دست سرریز از رابطه $(E_2 = \gamma + (V_2^2/2g))$ قابل محاسبه است [۲۵]. همانطور که گفته شد، ضریب اصلاح سرعت (α) در مطالعه حاضر، واحد در نظر گرفته شده است [۲۶]. شکل (۲) نیز آبشستگی موضعی پایین دست سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B را همراه با سازه تونلی و بلوک نشان می دهد. در این شکل، V_1 سرعت جریان در 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، H نظیر هد کل جریان در بالادست سرریز و Y نظیر هد کل جریان در پایین دست سرریز هستند. همچنین معرفی پارامترهای موثر بر آبشستگی موضعی پایین دست سرریز کلیدپیانویی مستطیلی مطابق آنالیز ابعادی تحقیق باباخواه و خوش فطرت در نظر گرفته شده است [۲۳].

$$(Z_s, X_s) = f(q, E_1, E_2, g, \sigma, \mu, \rho, \Delta\rho, d_{50}, Type) \quad (1)$$

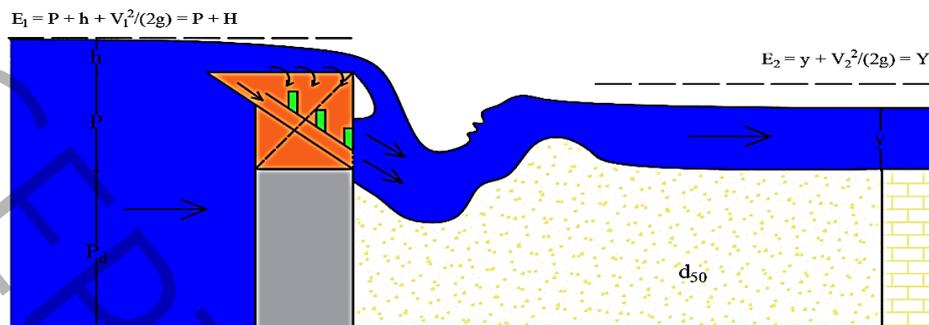
با در نظر گرفتن سه پارامتر تکراری q ، E_1 و ρ و با استفاده از تئوری π باکینگهام، پارامترهای موثر بر آبشستگی موضعی پایین دست سرریز کلیدپیانویی مستطیلی با بلوک موجود روی سازه ی تونلی در کلیدهای خروجی، مطابق رابطه (۲) خواهد شد.

$$\left(\frac{Z_s}{E_1}, \frac{X_s}{E_1}\right) = f\left(\frac{E_2}{E_1}, Fr, Re, We, \frac{\Delta\rho}{\rho}, \frac{d_{50}}{E_1}, Type\right) \quad (2)$$

در رابطه (۲)، Fr از رابطه $(q/(gE_1^3))^{0.5}$ به دست می آید. با توجه به عدد رینولدز $(Re = q\rho/\mu)$ بزرگتر از ۴۰۰۰ و وجود جریان کاملاً آشفته و همچنین به دلیل عمق کافی جریان در روی تاج سرریز (بیشتر از ۰/۰۳ متر)، از عدد وبر $(We = q^2\rho/E_1\sigma)$ ، عدد رینولدز و ضریب کشش سطحی صرف نظر شد [۲۷ و ۲۸]. با ترکیب Fr ، d_{50}/E_1 و $\Delta\rho/\rho$ پارامتر $Fr_d = (q/(E_1(g(\Delta\rho/\rho)d_{50}))^{0.5})$ به دست می آید.

همچنین نسبت E_2/E_1 را به صورت Er نمایش داده و به آن انرژی نسبی می گویند. باین حال، پارامترهای موثر بر آبشستگی موضعی پایین دست سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B همراه با بلوک و سازه تونلی مطابق رابطه (۳) خواهد شد. همچنین با توجه به ثابت بودن پارامتر $\Delta\rho/\rho$ به دلیل طبیعی بودن مصالح شن و حضور آن در پارامتر Fr_d از حضور مستقیم آن صرف نظر شد [۲۱].

$$\left(\frac{Z_s}{E_1}, \frac{X_s}{E_1}\right) = f(Er, Fr_d, Type) \quad (3)$$



شکل ۲. پارامترهای موثر بر آبشستگی موضعی در پایین دست سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B همراه با سازه تونلی و بلوک

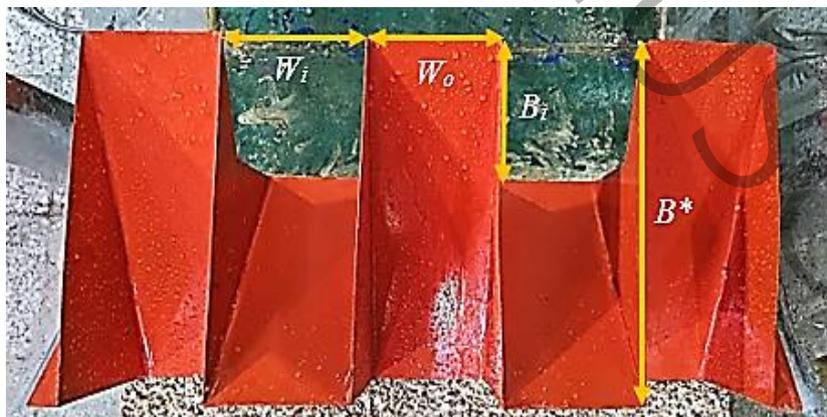
Fig. 2. Parameters affecting local scour downstream of a rectangular piano key weir type B with tunnel and block structure

مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در یک فلوم به طول ۱۰ متر، عرض ۰/۸ متر و ارتفاع ۱ متر انجام شدند. شیب کانال صفر بود. جریان توسط دستگاه Programmable Logic Controller (PLC)، پمپ و لوله‌ای به قطر ۸ اینچ، از مخزن زیرزمینی وارد کانال می‌شد. مخزن زیرزمینی دارای حجم ۱۰ متر مکعب و از جنس پی‌وی‌سی بود. یک فلومتر به PLC متصل است که توسط نمایشگر موجود روی دستگاه PLC می‌توان دبی را تنظیم کرد. خطای پمپ ۰/۰۱ درصد بود. سرریز در فاصله‌ی ۵/۵ متری از ابتدای کانال نصب شد. دلیل انتخاب فاصله‌ی ۵/۵ متری، توسعه‌یافتگی جریان و برهم منطبق بودن پروفیل‌های سرعت مطابق تحقیق فتحی و همکاران (۲۰۲۵) است [۲۱]. پروفیل‌های سرعت در فاصله‌های ۳/۵، ۴/۰ و ۴/۵ متری از ابتدای کانال برهم منطبق بودند. سرریز با چسب ضدآب شد و روی یک پایه فلزی به ارتفاع ۰/۳ متر نصب گردید. از سه دبی ۰/۰۳۰، ۰/۰۳۵ و ۰/۰۴۰ متر مکعب بر ثانیه استفاده شد. دمای جریان بین ۸ تا ۱۳ درجه سانتی‌گراد متغیر بود. سه سنسور آلتراسونیک، عمق جریان در بالادست، پایاب و روی تاج سرریز را برداشت کرده و روی PLC نمایش می‌دادند. سنسورها با کف کانال کالیبره و صفر می‌شدند و با موجی که به سطح جریان می‌فرستادند، عمق جریان را برداشت می‌کردند. مدل سنسورها URF بود. سنسور اول در فاصله 4P نسبت به مرکز سرریز و در بالادست، سنسور دوم در فاصله 10P نسبت به مرکز سرریز عمق جریان در پایین دست را برداشت می‌کردند [۲۹]. سنسور سوم نیز عمق جریان روی تاج سرریز را نشان می‌داد. همانطور که در بخش آنالیز ابعادی اشاره شد، عمق جریان روی تاج سرریز همواره بیشتر از ۰/۰۳ متر بود. عمق جریان در بالادست، پایاب و روی تاج سرریز توسط عمق‌سنج نقطه‌ای نیز برداشت شد. عمق‌سنج نقطه‌ای دارای خطای ۰/۰۰۰۱ متر بود. نتایج نشان داد که عمق‌های برداشت شده توسط سنسورهای آلتراسونیک

و عمق سنج نقطه‌ای با خطای بسیار ناچیزی مطابقت دارند. از سه عمق پایاب ۰/۰۵، ۰/۱۰ و ۰/۱۵ متر استفاده شد. عمق‌های پایاب توسط دریچه انتهایی موجود در فلوم، قابل تنظیم بودند. عمق‌های پایاب به نحوی انتخاب شدند که جریان روی سرریز به صورت آزاد باشد و هرگز مستغرق نشود [۲۱]. بیشترین دبی و کمترین عمق پایاب به نحوی انتخاب شدند تا آبشستگی به کف نرسد. از مصالح بستر شن استفاده شد. مصالح به طول ۲ متر، ارتفاع ۰/۳ متر و عرض ۰/۸ متر در بستر پایین دست سرریز ریخته شدند. مطابق شکل (۲)، در انتهای مصالح از دیواری صلب استفاده شد تا مصالح ریزش نکنند. دیوار تأثیری بر عمق پایاب نداشت و ارتفاع آن ۰/۳ متر بود. قطر متوسط مصالح شن ۰/۰۷۵ متر بود. جاستریچ و همکاران (۲۰۱۶) مقدار d_{50}/P را بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۴ نظر گرفتند [۲]. در مطالعه حاضر نیز مقدار d_{50}/P در مصالح شن ۰/۰۳۷۵ است. شن استفاده شده به صورت طبیعی بوده و دارای چگالی (ρ_s) برابر ۲۶۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب است. یک آزمایش ۱۶ ساعته برای مصالح شن و در بدترین حالت (بیشترین دبی، کمترین عمق پایاب و در نبود بلوک و سازه‌ی تونلی) انجام شد. تغییرات حفره آبشستگی در مصالح شن و در زمان ۹۰۰۰ ثانیه کمتر از ۰/۰۰۱ متر بود. طبق تحقیق فتحی و همکاران، (۲۰۲۴) و چپو، (۱۹۹۲) این زمان به‌عنوان زمان تعادل در نظر گرفته شد [۳۰ و ۱۸]. مصالح بستر غیرچسبیده بودند. دانه‌بندی مصالح بستر به صورت یکنواخت است و ضریب یکنواختی مصالح $(\sigma_g = (d_{84}/d_{16})^{0.5})$ که در آن d_{84} و d_{16} قطری هستند که به ترتیب ۸۴ و ۱۶ درصد مصالح از آن‌ها ریزترند، برای مصالح شن کمتر از ۱/۶ بودند [۲۱]. ضریب یکنواختی مصالح شن در مطالعه حاضر، ۱/۱۹ است.

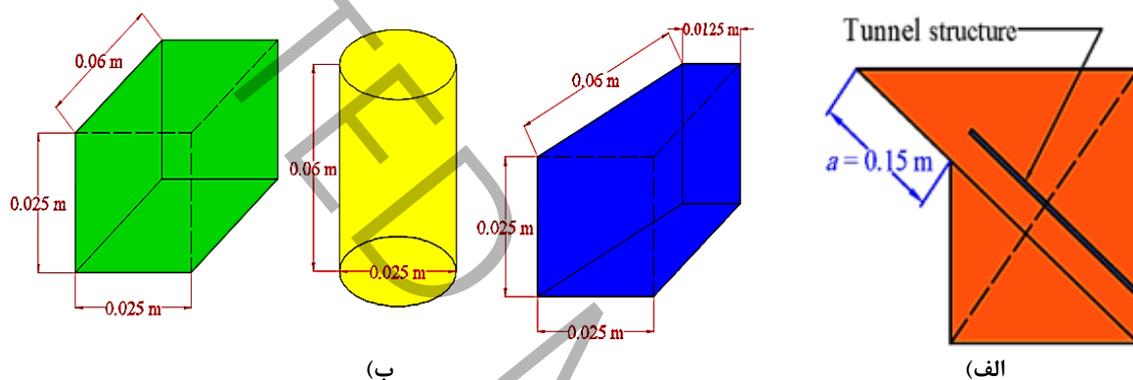
مطابق شکل (۳) از یک سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B و با ارتفاع ۰/۲۰ متر استفاده شد. ضخامت سرریز ۰/۰۱ متر، عرض کلیدهای ورودی و خروجی آن (W_o و W_i) برابر ۰/۱۴۵ متر، طول دیواره‌ی آن (B^*) برابر ۰/۴۰ متر، طول لبه‌ی آوریزان در بالادست آن (B_i) برابر ۰/۱۳ متر و طول تاج (L) برابر ۳/۲۷ متر است. سرریز مورد بررسی دارای سه کلید خروجی، دو کلید ورودی و دو نیم‌کلید ورودی است.



شکل ۳. سرریز کلیدپیانویی مستطیلی استفاده شده در تحقیق حاضر

Fig. 3. Rectangular type B PKW used in the present study

از یک ورق مستطیلی به طول ۰/۳۰ متر و عرض ۰/۱۴۵ متر و با همان شیب کلیدهای خروجی و با فاصله ۰/۰۴ متر از کف کلیدهای خروجی در دیواره‌های آن نصب گردید. فاصله‌ی لبه‌ی سازه‌ی تونلی از ابتدای کلیدهای خروجی (a)، ۰/۱۵ متر است. سازه‌ی تونلی به صورت آزمون و خطا و به نحوه‌ای در کلیدهای خروجی قرار گرفت که باعث برگشت جریان به بالادست نشود. شکل (۴-الف) به صورت شماتیک سازه‌ی تونلی نصب شده در کلیدهای خروجی سرریز را نشان می‌دهد. بر روی سازه‌ی تونلی نصب شده در کلیدهای خروجی و به صورت مجزا از بلوک (بافل) با هندسه‌های متفاوت استفاده شد. بلوک‌ها به صورت مکعب مستطیلی، دوزنقه‌ای و استوانه‌ای هستند. مشخصات هندسی بلوک‌ها در شکل (۴-ب) ارائه شده است. بلوک‌ها مطابق شکل (۲) نیز به نحوه‌ای بر روی سازه‌های تونلی نصب شدند که تأثیری بر عمق جریان در بالادست سرریز نداشته باشند.



شکل ۴. الف) سازه‌ی تونلی نصب شده در کلید خروجی سرریز به صورت شماتیک و ب) هندسه متفاوت بلوک‌ها (بافل‌ها)

Fig. 4. a) Schematic of the installed tunnel structure in the weir outlet key, and b) different geometries of the blocks (baffles)

با داشتن دبی و عمق جریان در بالادست سرریز توسط سنسور اول و با استفاده از رابطه $(Q = V_1WH)$ ، سرعت جریان در بالادست سرریز محاسبه شد. در این رابطه W عرض کانال و Q دبی جریان است. با استفاده از رابطه پیوستگی و داشتن عمق جریان در پایین دست سرریز توسط سنسور دوم، سرعت جریان در پایین دست سرریز محاسبه می‌شود. پس از تنظیم دبی و عمق پایاب تست‌ها شروع می‌شدند. بعد از گذشت زمان و به تعادل رسیدن مصالح بستر، پمپ خاموش می‌شد. پس از زهکشی جریان موجود در حفره آبشستگی، توسط یک متر لیزری و در ابعاد ۰/۰۳ در ۰/۰۳ متری، تغییرات بستر شسته شده برداشت و ثبت می‌شد و سپس محل بیشینه عمق آبشستگی و فاصله‌ی آن نسبت به پنجه سرریز مشخص می‌شد. مدل متر لیزری GLM 80 Laser Measure Archive بود. فتحی و همکاران (۲۰۲۵) نیز بستر آبشستگی را به ابعاد ۰/۰۳ در ۰/۰۳ متر زون‌بندی کردند [۲۱]. بعد از پایان هر آزمایش، مصالح بستر مسطح شده و آزمایش بعدی تکرار می‌شد. جدول (۱) پارامترهای هیدرولیکی و رسوبی تاثیرگذار بر آبشستگی پایین دست سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B در حالت ساده و حالت تونلی و بدون بلوک و در مصالح شن را نشان می‌دهد. از ۱۸ تست برای سرریزهای بدون بلوک و در صورت سرریز ساده و

سرریز تونل‌دار استفاده شد. جدول (۲) رنج تغییرات پارامترهای هیدرولیکی و رسوبی تاثیرگذار بر آبشستگی پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B با هندسه متفاوت بلوک را نشان می‌دهد. از ۲۷ تست برای سرریزهای با بلوک نصب شده در روی سازه‌ی تونلی استفاده شد. در مجموع از ۴۵ تست برای آبشستگی با و بدون بلوک و سازه‌ی تونلی استفاده شد.

جدول ۱. پارامترهای هیدرولیکی و رسوبی در سرریزهای کلیدپیانویی در حالت سرریز ساده و با سازه تونلی

Table 1. Hydraulic and sedimentary parameters in simple and tunnel PKWs

Q (m ³ /s)	E_1 (m)	E_2 (m)	مدل سرریز	E_2/E_1 (-)	d_{50}/E_2 (-)	Fr_d (-)	Z_s/E_1 (-)	X_s/E_1 (-)
۰/۰۳۰	۰/۲۴۸	۰/۰۷۹	سرریز ساده	۰/۳۱۷	۰/۰۹۵	۰/۴۳۴	۰/۴۸۴	۰/۵۲۸
۰/۰۳۵	۰/۲۵۶	۰/۰۸۹	سرریز ساده	۰/۳۴۸	۰/۰۸۴	۰/۴۹۱	۰/۵۹۵	۰/۵۳۶
۰/۰۴۰	۰/۲۶۳	۰/۱۰۱	سرریز ساده	۰/۳۸۴	۰/۰۷۴	۰/۵۴۶	۰/۷۳۴	۰/۵۴۰
۰/۰۳۰	۰/۲۴۸	۰/۱۰۷	سرریز ساده	۰/۴۳۲	۰/۰۷۰	۰/۴۳۴	۰/۴۳۵	۰/۵۴۸
۰/۰۳۵	۰/۲۵۶	۰/۱۱۰	سرریز ساده	۰/۴۳۰	۰/۰۶۸	۰/۴۹۱	۰/۵۳۶	۰/۵۶۰
۰/۰۴۰	۰/۲۶۳	۰/۱۱۳	سرریز ساده	۰/۴۲۹	۰/۰۶۷	۰/۵۴۶	۰/۶۷۷	۰/۵۶۷
۰/۰۳۰	۰/۲۴۸	۰/۱۵۳	سرریز ساده	۰/۶۱۷	۰/۰۴۹	۰/۴۳۴	۰/۳۸۳	۰/۵۶۸
۰/۰۳۵	۰/۲۵۶	۰/۱۵۴	سرریز ساده	۰/۶۰۴	۰/۰۴۹	۰/۴۹۱	۰/۴۷۷	۰/۵۸۷
۰/۰۴۰	۰/۲۶۳	۰/۱۵۶	سرریز ساده	۰/۵۹۲	۰/۰۴۸	۰/۵۴۶	۰/۶۲۴	۰/۶۰۱
۰/۰۳۰	۰/۲۴۸	۰/۰۷۹	سرریز تونلی	۰/۳۱۷	۰/۰۹۵	۰/۴۳۴	۰/۴۳۵	۰/۵۴۸
۰/۰۳۵	۰/۲۵۶	۰/۰۸۹	سرریز تونلی	۰/۳۴۸	۰/۰۸۴	۰/۴۹۱	۰/۵۴۸	۰/۵۶۰
۰/۰۴۰	۰/۲۶۳	۰/۱۰۱	سرریز تونلی	۰/۳۸۴	۰/۰۷۴	۰/۵۴۶	۰/۶۸۱	۰/۵۵۵
۰/۰۳۰	۰/۲۴۸	۰/۱۰۷	سرریز تونلی	۰/۴۳۲	۰/۰۷۰	۰/۴۳۴	۰/۳۷۹	۰/۵۷۶
۰/۰۳۵	۰/۲۵۶	۰/۱۱۰	سرریز تونلی	۰/۴۳۰	۰/۰۶۸	۰/۴۹۱	۰/۴۸۵	۰/۵۹۹
۰/۰۴۰	۰/۲۶۳	۰/۱۱۳	سرریز تونلی	۰/۴۲۹	۰/۰۶۷	۰/۵۴۶	۰/۶۰۵	۰/۶۰۹
۰/۰۳۰	۰/۲۴۸	۰/۱۵۳	سرریز تونلی	۰/۶۱۷	۰/۰۴۹	۰/۴۳۴	۰/۳۳۰	۰/۶۰۸
۰/۰۳۵	۰/۲۵۶	۰/۱۵۴	سرریز تونلی	۰/۶۰۴	۰/۰۴۹	۰/۴۹۱	۰/۴۱۹	۰/۶۳۴
۰/۰۴۰	۰/۲۶۳	۰/۱۵۶	سرریز تونلی	۰/۵۹۲	۰/۰۴۸	۰/۵۴۶	۰/۵۶۷	۰/۶۳۹

جدول ۲. رنج تغییرات پارامترهای هیدرولیکی و رسوبی در سرریزهای کلیدپیانویی با بافل (بلوک)

Table 2. Range of variation of hydraulic and sedimentary parameters in PKWs with blocks

Parameter	Minimum	Average	Maximum	Number of tests
Q (m ³ /s)	۰/۰۳۰	۰/۰۳۵	۰/۰۴۰	۳
E_1 (m)	۰/۲۴۸	۰/۲۵۶	۰/۲۶۳	۳
E_2 (m)	۰/۰۷۹	۰/۱۱۸	۰/۱۵۶	۹
d_{50}/E_2 (-)	۰/۰۴۸	۰/۰۷۲	۰/۰۹۵	۹
E_2/E_1 (-)	۰/۳۱۷	۰/۴۶۷	۰/۶۱۷	۹
Fr_d (-)	۰/۴۳۴	۰/۴۹۰	۰/۵۴۶	۳
Z_s/E_1 (-)	۰/۳۰۲	۰/۴۸۴	۰/۶۶۶	۲۷
X_s/E_1 (-)	۰/۵۵۶	۰/۶۱۱	۰/۶۶۶	۲۷

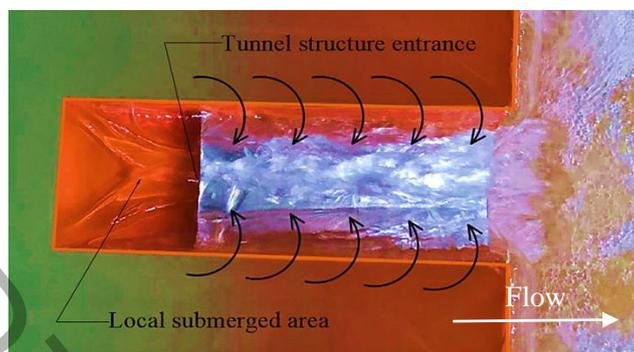
نتایج و بحث

جریان از روی کلیدهای ورودی سرریز به صورت جت آزاد به پایین دست و داخل کلیدهای خروجی و به صورت جت مایل از کلیدهای خروجی به پایین دست منتقل می شود. جریان در ابتدای کلیدهای خروجی همگرا شده و وارد آن می شود. در ابتدای کلیدهای خروجی ناحیه استغراق موضعی ایجاد می شود که دارای ارتفاع جریان بیشتری است. این ناحیه در ادامه مسیر باعث ایجاد یک گردابه ی پر قدرت شده و وارد بستر پایین دست می شود. این گردابه سرعت زیادی دارد و مصالح بستر را با خود به راحتی حمل می کند.

دو گردابه ی سطحی در کنار دیواره های کلیدهای خروجی به صورت ساعتگرد و پادساعتگرد نیز تشکیل می شود. این گردابه ها با مختلط شدن جریان موجود در کلیدهای خروجی و جریان ریخته شده از کلیدهای ورودی به کلیدهای خروجی ایجاد می شوند. همانطور که گفته شده این گردابه ها به صورت سطحی و با قدرت کمتری وارد بستر می شوند. مصالح جابه جا شده توسط ناحیه اغتشاش ایجاد شده در پایین دست سرریز که توسط جت وسطی به وجود آمده است، با جت ایجاد شده ی سطحی توسط گردابه های کناری به پایین دست انتقال می یابند. بر خلاف سرریزهای کلیدی پیاپی نوع A و C در نوع B لبه های آویزان تنها در بالادست سرریز وجود دارند و به دلیل عدم وجود لبه آویزان در پایین دست سرریز، جت آزاد ریزشی از کلیدهای ورودی در نزدیکی پنجه سرریز می ریزد. همچنین به دلیل عدم وجود لبه آویزان در پایین دست سرریز مورد مطالعه، جریان های خروجی از کلیدهای ورودی به نزدیکی پنجه سرریز می ریزند که همین امر باعث افزایش آبستگي در کنار پنجه سرریز می شود. همانطور که گفته شد، از سازه ی تونلی در کلیدهای خروجی سرریز استفاده شد. دلیل استفاده از سازه های تونلی جلوگیری از اختلاط جریان خروجی از کلیدهای خروجی و جریان ریزشی از کلیدهای ورودی داخل کلیدهای خروجی است (شکل ۵).

با جلوگیری از اختلاط جریان، گردابه های سطحی کناری حذف شده و باعث این می شوند تا مصالح کمتری به پایین دست انتقال یابد. جریان خروجی از کلیدهای خروجی و جریان خروجی از روی سازه ی تونلی به صورت جداگانه به پایین دست منتقل می شوند. جریان خروجی از روی سازه ی تونلی در فاصله ی بیشتری از پنجه سرریز می ریزد که همین امر می تواند خطر واژگونی سرریز را کاهش دهد. جریان خروجی از کلیدهای خروجی، سازه ی تونلی و کلیدهای ورودی در فاصله ای دورتر از پنجه سرریز با هم مخلوط شده و همین امر باعث ایجاد گردابه در جریان می شود. وجود گردابه ها و چرخش جریان به صورت سطحی بوده و آبستگي کمتری رخ می دهد (شکل ۶). در شکل (۶)، پیکان نارنجی، مشکی و سبز به ترتیب نشانگر جریان خروجی از کلیدهای ورودی، کلیدهای خروجی و سازه ی تونلی هستند. باین حال، برای کاهش سرعت بیشتر جریان ریزشی از کلیدهای ورودی روی سازه ی تونلی، از بلوک استفاده شد. بلوک ها مانند مانع عمل کرده و سرعت جریان پس از برخورد با آن ها کمتر می شود. در پشت بلوک ها، جریان دارای چرخش می شود و با افزایش دبی، جریان از روی بلوک ها به پایین دست پرش می کند. به دلیل اینکه جریان

از کلیدهای ورودی به کناره‌های سازه‌ی تونلی می‌ریزد؛ در کناره‌های سازه‌ی تونلی از چهار بلوک و در وسط (به‌صورت زیگزاکی) از یک بلوک استفاده شد. برای درک بهتر چیدمان بلوک‌ها و جریان روی آن‌ها، می‌توانید به شکل (۷) مراجعه کنید.



شکل ۵. جدایش جریان موجود روی کلیدهای خروجی با ایجاد سازه‌ی تونلی

Fig. 5. Separation of the current on the output keys by creating a tunnel structure



شکل ۶. خروج جریان از کلیدهای خروجی، سازه‌ی تونلی و کلیدهای ورودی به بستر پایین دست

Fig. 6. Flow exiting the outlet keys, tunnel structure, and inlet keys to the downstream bed



(ج)



(ب)



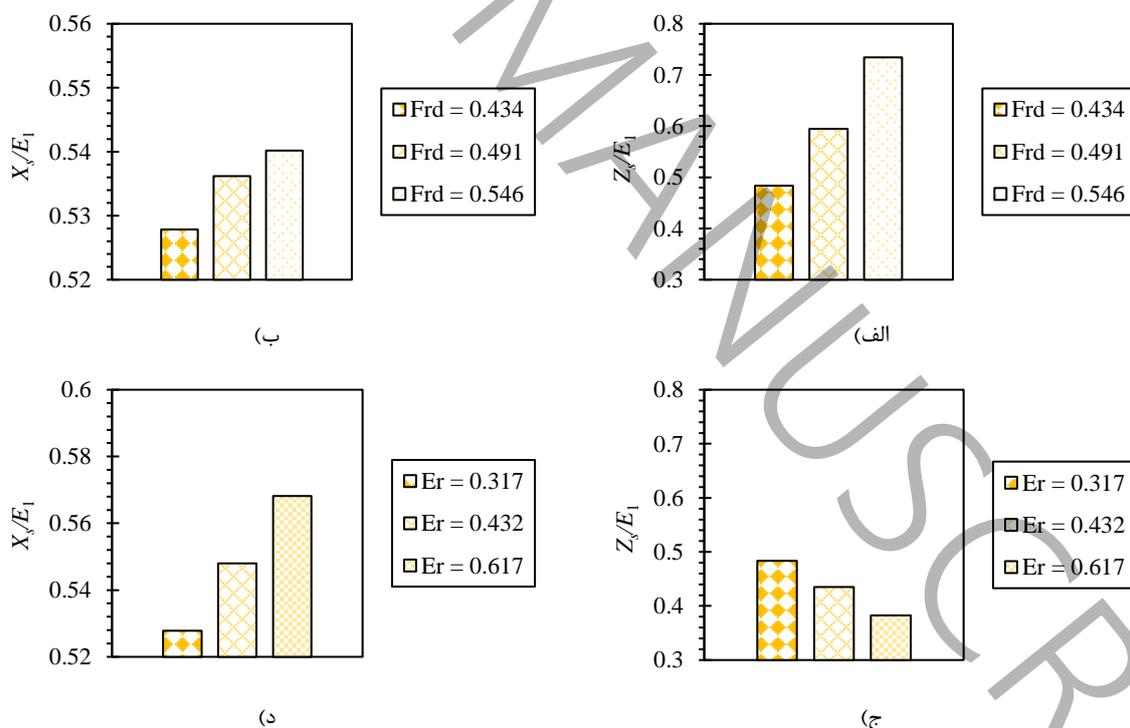
(الف)

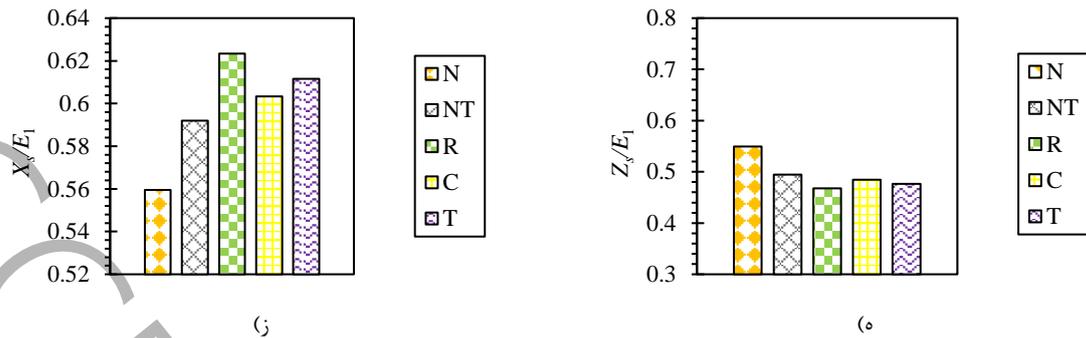
شکل ۷. جریان ایجاد شده روی بلوک‌ها با هندسه‌ی متفاوت

Fig. 7. Flow created on blocks with different geometry

شکل (۸-الف) و شکل (۸-ب) به ترتیب تأثیر Fr_d را بر بیشینه عمق آبستگي و فاصله‌ی آن نسبت به پنجه سرریز نشان می‌دهند. این شکل‌ها در حالت عمق پایاب ثابت $0/05$ متر، و در صورت عدم وجود سازه‌ی تونلی و بلوک ارائه شده‌اند. همانطور که پیداست با افزایش Fr_d بیشینه عمق آبستگي و فاصله‌ی آن از پنجه سرریز افزایش می‌یابند. دلیل آن، افزایش دبی در واحد عرض جریان در بالادست سرریز است. با افزایش دبی در واحد عرض جریان، سرعت جت‌های ریزشی و مایل به پایین دست سرریز، افزایش یافته و بر قدرت اغتشاش جریان می‌افزایند. اغتشاش زیاد جریان نیز تأثیر زیادی بر افزایش تنش برشی دارد. تنش برشی وارد بر مصالح بستر با افزایش Fr_d افزایش می‌یابد و آبستگي تا زمانی که به مقدار بحرانی برسد، توسعه می‌یابد. گودال آبستگي (و تکامل آن) نیز به عمق پایاب بستگی دارد. با افزایش Fr_d مصالح بیشتری شسته شده و به پایین دست منتقل می‌شوند. برای مثال، در سرریز بدون سازه تونلی و بلوک، به طور متوسط، با افزایش $14/3$ و 25 درصدی دبی در واحد عرض جریان نسبت به دبی در واحد عرض جریان $0/0375$ متر مکعب بر ثانیه بر متر، میانگین بیشینه عمق آبستگي در سرریز ذکر شده به ترتیب $21/4$ و $39/6$ درصد و میانگین فاصله‌ی آن نسبت به پنجه سرریز $5/1$ و $9/1$ درصد افزایش می‌یابند. شکل (۸-ج) و (۸-د) به ترتیب تأثیر نسبت هد کل عمق پایاب (E_2) به هد کل عمق جریان در بالادست سرریز (E_1) را بر بیشینه عمق آبستگي و فاصله‌ی آن نسبت به پنجه سرریز نشان می‌دهد. این شکل‌ها در حالت دبی ثابت $0/03$ متر مکعب بر ثانیه و در صورت عدم وجود سازه‌ی تونلی و بلوک ارائه شده‌اند. با توجه به ثابت بودن دبی و عمق جریان در بالادست سرریز؛ پس این شکل‌ها تأثیر هد کل عمق پایاب را نشان می‌دهند. با افزایش عمق پایاب، بیشینه عمق آبستگي و ارتفاع حفره آبستگي کاهش می‌یابند. با افزایش عمق پایاب، جریان پایین دست سرریز با جریان خروجی از سرریز مخلوط شده و سرعت آن کاهش می‌یابد. با کاهش سرعت جریان، تنش برشی روی مصالح بستر کاهش می‌یابد و آبستگي (و تکامل آن) تا زمانی که به مقدار بحرانی برابر برسد، ایجاد می‌شود. با افزایش عمق پایاب، طول انتشار جت‌هایی که به مصالح بستر برخورد می‌کنند نیز افزایش می‌یابد [۲۱]. همانطور که گفته شد، با افزایش طول انتشار و کم عمق تر شدن گردابه‌ها و جت‌های موجود، بیشینه عمق آبستگي کاهش می‌یابد و حفره آبستگي کم عمق تر و کشیده تر می‌شود و قدرت پرش هیدرولیکی نیز کاهش می‌یابد، به طوری که پرش هیدرولیکی کم عمق تر شده و می‌توان آن را مستغرق در نظر گرفت [۲۱]. همچنین با افزایش عمق پایاب، حجم گودال آبستگي کاهش می‌یابد و حداکثر عمق آبستگي از پنجه سرریز دورتر می‌شود. برای مثال، در سرریز بدون سازه تونلی و بلوک، به طور متوسط، با افزایش 50 و $66/7$ درصدی عمق پایاب نسبت به عمق پایاب $0/05$ متر، میانگین بیشینه عمق آبستگي در سرریز ذکر شده به ترتیب 9 و $18/1$ درصد کاهش و میانگین فاصله‌ی آن نسبت به پنجه سرریز $4/2$ و $8/7$ درصد افزایش می‌یابند. شکل (۸-ه) و (۸-ز) به ترتیب تأثیر پارامتر Type را بر بیشینه عمق آبستگي و فاصله‌ی آن نسبت به پنجه سرریز نشان می‌دهند. این شکل‌ها در حالت دبی ثابت $0/03$ متر مکعب بر ثانیه، عمق پایاب $0/04$ متر ارائه شده‌اند. همانطور که پیداست، با سازه‌ی تونلی و بلوک در کلیدهای خروجی سرریز، بیشینه عمق آبستگي کاهش می‌یابد و پروفیل طولی بستر سطحی تر می‌شود. همانطور

که در بخش مشاهدات آزمایشگاهی به آن اشاره شد، با وجود سازه تونلی و بلوک‌ها، سرعت جریان خروجی از روی سازه تونلی کاهش یافته و در نهایت باعث کاهش قدرت اغتشاش جریان و گردابه‌ها در پایین دست سرریز می‌شوند. همچنین یکی دیگر از دلایل آن سطحی تر شدن جت‌های خروجی به پایین دست سرریز در صورت عدم اختلاط جت‌ها هستند که همین امر باعث افزایش طول انتشار جریان به پایین دست شده و در نهایت باعث کشیده تر و سطحی تر شدن حفره آبستنگی می‌شود. همچنین با وجود بلوک‌ها، پرش ایجاد شده در روی سازه تونلی باعث ریزش جت‌ها به فاصله‌ای دورتر از پنجه سرریز و کاهش قدرت آن‌ها می‌شود. میانگین بیشینه عمق آبستنگی در سرریز تونلی، سرریز دارای بلوک‌های مستطیلی، دوزنقه‌ای و استوانه‌ای نسبت به سرریز ساده، به ترتیب ۱۰، ۱۴/۸، ۱۳/۲ و ۱۱/۸ درصد کمتر می‌یابد. دلیل کمتر بودن مقدار آبستنگی در سرریز دارای بلوک مستطیلی، ایجاد گردابه‌ها و پرش هیدرولیکی در پشت این بلوک‌ها است. در بلوک‌های دوزنقه‌ای به دلیل شیب دار بودن، جریان به راحتی از روی آن عبور می‌کند و پرش هیدرولیکی زیادی به چشم نمی‌خورد. در بلوک‌های استوانه‌ای نیز به دلیل دایره‌ای بودن، گردابه‌ای پشت آن تشکیل نمی‌شود و با افزایش دبی نیز این گردابه‌ها قدرت زیادی نسبت به سرریزهای مستطیلی ندارند. جریان در کنار دیواره‌ها نیز پس از برخورد به بلوک‌های کناری به سمت بلوک وسط متمایل شده و از قدرت آن کاسته می‌شود.



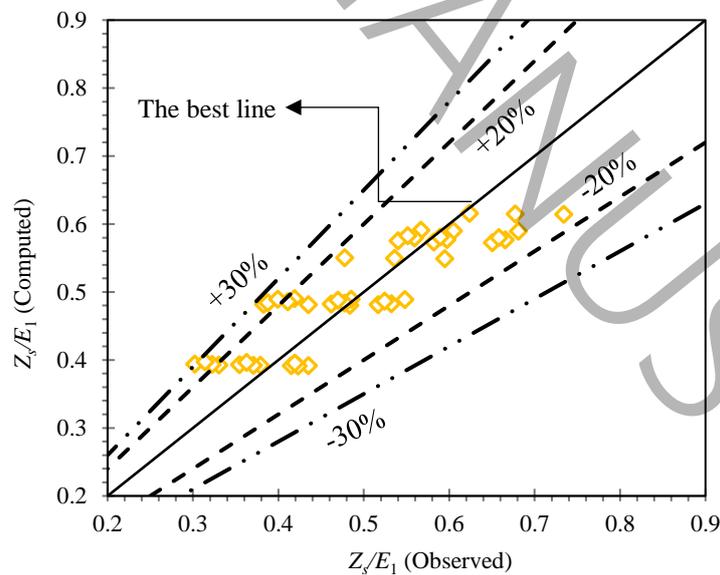


شکل ۸. تأثیر پارامترهای بدون بعد بر بیشینه عمق آبشستگی و فاصله آن نسبت به پنجه سرریز

Fig. 8. The effect of dimensionless parameters on the maximum scour depth and its distance from the weir toe

رابطه (۴) برای محاسبه بیشینه عمق آبشستگی ارائه شده است. این رابطه با ضریب همبستگی ۹۸/۸ درصد است. شکل (۹) نیز بیشینه عمق آبشستگی بدون بعد مشاهده شده و محاسبه شده را نشان می‌دهد که با خطای $\pm 20\%$ درصد برای ۸۷ درصد داده‌ها و با خطای $\pm 30\%$ درصد برای ۹۸ درصد داده‌ها مناسب است. این رابطه برای ۷۵ درصد داده‌ها ارائه و با ۲۵ درصد داده‌ها کالیبره شده است. در این رابطه مقدار K_1 ، K_2 و K_3 مرتبط به نوع سرریز است که از جدول (۳) قابل ارائه هستند.

$$\frac{Z_s}{E_1} = K_1 (Fr_d^{K_2} Er^{(K_3 Fr_d)}) \quad (۴)$$



شکل ۹. بیشینه عمق آبشستگی مشاهده شده و محاسبه شده

Fig. 9. Observed and calculated maximum scour depth

جدول ۳. مقادیر ضرایب K جهت محاسبه بیشینه عمق آبشستگی

Table 3. The K coefficient values for calculating maximum scour depth

Row	Type	K_1	K_2	K_3
۱	N	۱/۱۸	۱/۰۷	۰/۰۱
۲	NT	۱/۷۴	۱/۷۸	۰/۰۱
۳	R	۱/۵۷	۱/۶۵	۰/۰۲
۴	C	۱/۶۲	۱/۶۹	۰/۰۲
۵	T	۱/۶۱	۱/۷۷	۰/۰۲

شاخص‌های آبخستگی از پارامترهای مهم در مطالعات آبخستگی هستند. یکی از روابط پیشنهادی برای شاخص آبخستگی، نسبت دو برابر حداکثر عمق آبخستگی به حداکثر فاصله عمق آبخستگی نسبت به پنجه سرریز است که در رابطه (۵) به آن اشاره شده است. مقدار کمتر شاخص آبخستگی به معنای خطر کمتر واژگونی سرریز است. داشتن بیشینه عمق آبخستگی کمتر و فاصله بیشتر نسبت به پنجه سرریز، احتمال شکست و واژگونی سازه‌های هیدرولیکی را کاهش می‌دهد [۲۱].

شکل (۱۰) میانگین شاخص آبخستگی را در سرریزهای دارای و ساده، با سازه‌ی تونلی و با بلوک نشان می‌دهد. طبق شکل (۱۰)، میانگین شاخص آبخستگی در سرریز دارای سازه تونلی، بلوک مستطیلی، بلوک استوانه‌ای و بلوک ذوزنقه‌ای به ترتیب ۱۴/۷، ۲۳/۳، ۱۷/۹ و ۲۰/۴ درصد کمتر از سرریز ساده است. باین حال، شرایط بهینه برای میانگین شاخص آبخستگی در سرریز با سازه‌ی تونلی دارای بلوک مستطیلی مشاهده می‌شود.

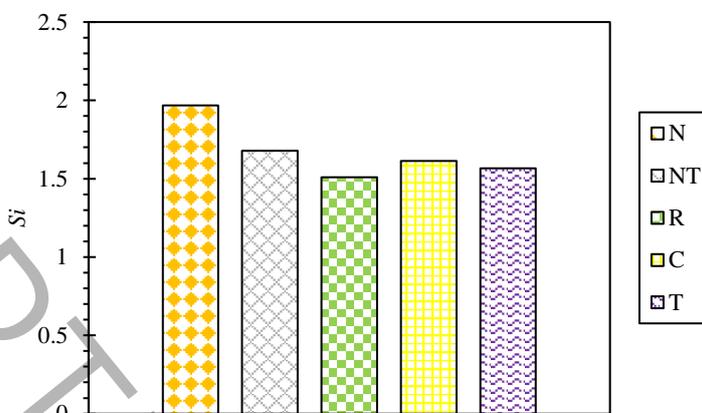
$$Si = \frac{2Z_s}{X_s} \quad (5)$$

ارتفاع سرریز در مطالعه‌ای که توسط جاستریچ و همکاران (۲۰۱۶) انجام شد، ۰/۱۵ متر بود [۲]. ایشان شش آزمایش روی مصالح شنی انجام دادند. میانگین شاخص آبخستگی در مطالعه ایشان ۱/۴۹ بود. در مطالعه حاضر، میانگین شاخص آبخستگی در سرریز ساده ۱/۹۷ است که ۲۴/۴ درصد با میانگین شاخص آبخستگی در مطالعه جاستریچ و همکاران (۲۰۱۶) متفاوت است [۲].

میانگین شاخص آبخستگی در مطالعه رضیوی و همکاران (۲۰۲۳)، در مصالح بستر شنی با سرریز دارای حوضچه آرامش USBR نوع I، ۱/۷۸ و بدون آن ۰/۷۸۴ است [۱۷]. شاخص آبخستگی در سرریز ساده مطالعه حاضر با تحقیق ایشان به ترتیب ۹/۶ و ۶۰/۲ درصد بیشتر است. دلیل آن کاهش آبخستگی در سرریز دارای حوضچه آرامش و کاهش قدرت گردابه‌ها در آن است.

میانگین شاخص آبخستگی در بهترین حالت مطالعه فتحی و همکاران (۲۰۲۵)، سرریزهای با تیغه‌های جداکننده جریان شش تایی مستطیلی، برابر ۰/۴۵ است [۲۱]. شاخص آبخستگی در مطالعه ایشان حدود ۷۰/۲ درصد کمتر از شاخص آبخستگی

در سرریزهای دارای بلوک مستطیلی در تحقیق حاضر است. دلیل آن وجود تیغه‌های جداکننده جریان و ریزش جریان به فاصله‌ای دورتر از پنجه سرریز و شرایط هیدرولیکی و مرزی متفاوت در مطالعه ایشان است.



شکل ۱۰. میانگین شاخص آبرستگی

Fig. 10. The average scour index

نتیجه‌گیری

این مطالعه به بررسی کاهش آبرستگی موضعی در پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B با استفاده از سازه‌ی تونلی و بلوک با هندسه متفاوت در کلیدهای خروجی پرداخت. وجود بلوک‌ها به‌طور قابل توجهی بیشینه عمق آبرستگی را کاهش داد، به‌طوری که بلوک‌های مکعب مستطیلی مؤثرتر از دیگر از بلوک‌ها بودند. وجود سازه‌ی تونلی نیز تأثیر به‌سزایی بر کاهش بیشینه عمق آبرستگی گذاشت. این مطالعه رابطه‌ای را برای محاسبه بیشینه عمق آبرستگی با ضریب همبستگی بالا ارائه داد. محدوده پارامترهای بدون بعد مورد استفاده در این تحقیق (مانند Fr_d ، Type، E_2/E_1 و E_2/E_1) را می‌توان در جداول (۱ و ۲) مشاهده کرد. همانطور که بحث شد، سازه‌ی تونلی و بلوک‌ها، جریان را به فاصله بیشتری از پنجه سرریز می‌فرستند که می‌تواند آبرستگی موضعی را کاهش داده و آن را از پنجه سرریز دورتر کند. همچنین، این امر به طراحی کارآمدتر و اقتصادی‌تر فونداسیون سرریز کمک می‌کند. یافته‌های کلیدی:

- سازه‌ی تونلی به‌طور قابل توجهی عمق آبرستگی را کاهش می‌دهد (حدود ۱۰ درصد نسبت به سرریز ساده).
- به‌دلیل عدم وجود لبه آویزان در پایین‌دست سرریز نوع B، جریان خروجی از کلیدهای ورودی به نزدیکی پنجه سرریز می‌ریزند که همین امر باعث افزایش آبرستگی در کنار پنجه سرریز می‌شود.
- بلوک‌ها، حفره آبرستگی را کشیده‌تر و بیشینه عمق آبرستگی را از پنجه سرریز دور کردند و بلوک‌های مستطیلی تغییر بیشتری را نشان دادند.

- بلوک‌های مستطیلی نصب شده روی سازه‌ی تونلی کمترین عمق آبشستگی را نشان می‌دهد..
- شاخص آبشستگی در سرریز دارای تونلی و بلوک مستطیلی، عملکرد بهبود یافته‌ای را نشان می‌دهد.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

علائم انگلیسی	توضیح فارسی	واحد
a	بازشدگی دهانه‌ی سازه‌ی تونلی	m
B^*	طول دیواره‌ی جانبی سرریز	m
B_i	طول لبه آویزان ورودی	m
d_{50}	قطر متوسط ذرات بستر	m
d_{16}	قطری که ۱۶ درصد ذرات از آن ریزترند.	m
d_{84}	قطری که ۸۴ درصد ذرات از آن ریزترند.	m
E_1	انرژی جریان در بالادست سرریز	m
E_2	انرژی جریان در پایین‌دست سرریز	m
E_r	انرژی نسبی	-
Fr_d	معادل عدد فرود ذرات	-
g	نیروی گرانشی	m/s ²
h	عمق جریان در بالادست سرریز	m
H	هد کل جریان در بالادست سرریز	m
K	مقادیر ثابت محاسبه شده در رابطه‌ها	-
L	طول سرریز	m
P	ارتفاع سرریز	m
q	دبی در واحد عرض	m ² /s
Q	دبی جریان	m ³ /s
Re	عدد رینولدز	-
T_s	ضخامت سرریز	m
V_1	سرعت جریان در بالادست سرریز	m/s
V_2	سرعت جریان در پایین‌دست سرریز	m/s
W	عرض سرریز	m
W_i	عرض کلید ورودی	m
W_o	عرض کلید خروجی	m
We	عدد وبر	-

m	فاصله بیشینه عمق آبستنگی نسبت به پنجه سرریز	X_s
m	عمق پایاب	y
m	هد کل جریان در پایین دست سرریز	Y
m	ارتفاع بیشینه عمق آبستنگی	Z_s

علائم یونانی

Kg/ (m.s)	لزجت دینامیکی	μ
Kg/m ³	چگالی رسوب	ρ_s
-	ضریب اصلاح سرعت	α
Kg/m ³	چگالی آب	ρ_w
Kg/s ²	ضریب کشش سطحی	σ

مراجع

- [1]. Fathi, A., Khoshfetrat, A., Talebipour, F. and Saadat, M. Influence of rigid vegetation on flow energy dissipation downstream of type B trapezoidal piano key weirs. *Innovative Infrastructure Solutions*, 10(8) (2025) 1-15. <https://doi.org/10.1007/s41062-025-02172-x>.
- [2]. Jüstrich, S., Pfister, M. & Schleiss, A.J. Mobile riverbed scouring downstream of a piano key weir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(11) (2016) 04016043. <https://doi.org/10.1061/ASCE HY.1943-7900.0001189>.
- [3]. Ghafouri, A., Ghodsian, M. & Abdi Chooplou, Ch. Experimental study on the effect of discharge and tailwater depth on bed topography downstream of a piano key weir. *Journal of Hydraulics*, 15(3) (2020) 107-122. <https://doi.org/10.30482/JHYD.2020.236770.1465>.
- [4]. Dehrashid, F.A., Gohari, S., Asim, T., Mishra, R., Khoshkonesh, A., Bahamanpouri, F. & Nsom, B. Experimental and numerical study of local scouring downstream of D-type piano key weir. *International Journal of COMADEM*, 25(1) (2022) 51-62.
- [5]. Abdi Chooplou, Ch., Ghodsian, M., Abediakbar, D., & Ghafouri, A. An experimental and numerical study on the flow field and scour downstream of rectangular piano key weirs with crest indentations. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(5) (2023) 140. <https://doi.org/10.1007/s41062-023-01108-7>.
- [6]. Abdi Chooplou, C., Ghodsian, M. and Ghafouri, A. Local scour downstream of various shapes of piano key weirs. *Innovative Infrastructure Solutions*, 9(4) (2024) 117. <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01411-x>.
- [7]. Bodaghi, E., Ghodsian, M. and Abdi Chooplou, Ch. The experimental study of downstream scouring of trapezoidal Piano key weir type A under free and submerged flow. *Journal of Hydraulics*, Vol. 18, Issue 1 (2023). <https://doi.org/10.30482/JHYD.2022.330389.1590>.
- [8]. Bodaghi E, Abdi Chooplou Ch, Ghodsian M. Experimental investigation of scour downstream of a type A trapezoidal piano key weir under free and submerged flow conditions. *Journal of Hydrology and Hydromechanics.*, 71 (2024). <https://doi.org/10.2478/johh-2023-0041>.
- [9]. Dehghan, M. and Karami, H. Numerical investigation of scour downstream of piano key Weirs using Flow-3D software. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 56(2) (2024) 203-228. <https://doi.org/10.22060/CEEJ.2024.22659.8019>.
- [10]. Gohari, S. & Ahmadi, F. Experimental study of downstream scour of piano keys weirs. *Journal of Water and Soil Conservation*, 26(1) (2019) 91-109. <https://doi.org/10.22069/JWSC.2019.14680.2961>.
- [11]. Yazdi, A., Hosseini, S.A., Nazari, S. & Amanian, N. Comparison of downstream scour of the rectangular and trapezoidal piano key weirs. *Journal of Hydraulics*, 15(2) (2020) 95-112. <https://doi.org/10.30482/JHYD.2020.227522.1453>.
- [12]. Yazdi, A.M., Hoseini, S., Nazari, S. and Fazeli, M. Numerical and experimental analysis of scour downstream of piano key weirs. *Sādhanā*, 47(4) (2022) 189. <https://doi.org/10.1007/s12046-022-01960-w>.
- [13]. Ghodsian, M., Abdi Chooplou, Ch. & Ghafouri, A. Scouring of triangular and trapezoidal pianos key weir. *Journal of Hydraulics*, 16(2) (2021) 43-58. <https://doi.org/10.30482/JHYD.2021.261439.1497>.

- [14]. Jamal, A.A.R., Tahaa, K.Y. and Hayawi, G.A.A.M. 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 (AREJ)*, 27(1) (2022) 193-204. <https://doi.org/10.33899/rengj.2021.130402.1101>.
- [15]. Lantz, W., Crookston, B.M. & Palermo, M. Apron and cutoff wall scour protection for piano key weirs. *Water*, 13(17) (2021) 2332. <https://doi.org/10.3390/w13172332>.
- [16]. Kumar, B. & Ahmad, Z. Scour downstream of a piano key weir with and without a solid apron. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 148(1) (2022) 04021066. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001647](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001647).
- [17]. Rdhaiwi, A.Q., Khoshfetrat, A. and Fathi, A. Experimental investigation of scour downstream of a C-Type trapezoidal piano key weir with stilling basin. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 27(6) (2023) 688-697. <https://doi.org/10.31272/jeasd.27.6.2>.
- [18]. Fathi, A., Abdi Chooplou, C. and Ghodsian, M. Local scour downstream of type-A trapezoidal stepped piano key weir in sand and gravel sediments. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, (2024) 1–13. <https://doi.org/10.1080/09715010.2024.2353612>.
- [19]. Abdi Chooplou, C., Kahrizi, E., Fathi, A., Ghodsian, M. and Latifi, M. Baffle-Enhanced Scour Mitigation in Rectangular and Trapezoidal Piano Key Weirs: An Experimental and Machine Learning Investigation. *Water*, 16(15), (2024) 2133. <https://doi.org/10.3390/w16152133>.
- [20]. Kazerooni, S., Abdi Chooplou, C. and Ghodsian, M. Effects of flow splitters on local scour downstream of type-A trapezoidal piano key weir. *Applied Water Science*, 14(12) (2024) 247. <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02309-w>.
- [21]. Fathi, A., Khoshfetrat, A. and Alavi, S.H. Downstream Local Scour of PKW with Different Shapes and Numbers of Flow Splitters. *Journal of Hydraulic Engineering*, 151(4) (2025) 04025015. <https://doi.org/10.1061/JHEND8.HYENG-14143>.
- [22]. Mshali, K.C., Khoshfetrat, A. and Fathi, A. 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) (2024) 1353-1368. <https://doi.org/10.22060/CEEJ.2024.22565.7996>.
- [23]. Babakhah, L. and Khoshfetrat, A. Investigating local scour downstream of Piano key weir with Riprap. *Innovative Infrastructure Solutions*, 9(11) (2024) 1-15. <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01759-0>.
- [24]. Panthi, M. A Laboratory Study of Local Scour and Driftwood Effects at a Type a Piano Key Weir. (2025). <https://doi.org/10.26076/e209-99f7>.
- [25]. Rdhaiwi, A.Q., Khoshfetrat, A. and Fathi, A. Experimental comparison of flow energy loss in type-B and-C trapezoidal piano key weirs. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 28(1) (2024) 55-64. <https://doi.org/10.31272/jeasd.28.1.4>.
- [26]. Fathi, A., Abdi Chooplou, Ch. and Ghodsian, M. An Experimental Study of Flow Energy Loss in Trapezoidal Stepped Piano Key Weirs (PKWs). *Modares Civil Engineering journal*, 23(4) (2023) 163-174. <https://doi.org/10.22034/23.4.163>.
- [27]. Sumer, B.M. & Fredsoe, J. August. Onset of scour below a pipeline exposed to waves. In *The First International Offshore and Polar Engineering Conference*. OnePetro. (1991). <https://doi.org/10.1115/OMAE2010-20719>.
- [28]. Novák, P. & Čabelka, J. Models in hydraulic engineering: Physical principles and design applications. *Monographs & surveys in water resources engineering*. (1981).
- [29]. Singh, D. and Kumar, M. Gene expression programming for computing energy dissipation over type-B Piano Key Weir. *Renewable Energy Focus*, 41 (2022) 230-235. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2022.03.005>.
- [30]. Chiew, Y.M. Scour protection at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(9) (1992) 1260-1269. <https://doi.org/10.1061/ASCE0733-94291992118:91260>.