



Gonbad Kavous University
Journal of New Approaches in
Water Engineering and Environment
Volume 1, Issue 1

Experimental Study of Effect of Flow Drop Height on Downstream Bed Topography of Type-A Trapezoidal Piano Key Weir

Chonoor Abdi Chooplou^{1*}, Masoud Ghodsian², Mohammad Vaghefi³, Sara Kazerooni⁴
and Elnaz Bodaghi⁵

¹PhD Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of civil and environmental engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

²Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of civil and environmental engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

³Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of civil engineering, Persian Gulf University, Bushehr, Iran

⁴M.Sc. Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of civil and environmental engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

⁵M.Sc. Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of civil and environmental engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received: 30.03.2022; Accepted: 26.06.2022

Abstract:

Predicting the extent of local scouring downstream of hydraulic structures has been one of the topics of interest to researchers in recent years. In this research, downstream scouring of a trapezoidal piano key weir under changes in the hydraulic conditions of the flow and the height of the flow drop passing through the weir in a channel with a length of 10 meters and a width and height of 0.75 and 0.80 meters in the hydraulic laboratory of Water Engineering Group. And hydraulic structures of Tarbiat Modares University of Tehran have been studied. Uniform and non-sticky sediments with an average diameter of 2 mm in length and width of 3 and 0.75 m downstream of the piano key weir were used. All experiments were performed under free flow conditions. The results showed that the maximum occurrence of scour depth with increasing flow drop height is farther away from the weir. The maximum scour depth increases with increasing flow drop height. Scouring in the transverse middle of the bed is less than its walls. Increasing the height of the flow drop is accompanied by more changes in the topography of the bed.

Keywords: Experimental study, Scouring, Piano Key Weir, Free flow, Flow drop height

¹ . Corresponding author, Email: a.chonoor@modares.ac.ir



دانشگاه گنبد کاووس

نشریه "رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست"
دوره اول، شماره اول

<http://Nawee.gonbad.ac.ir>

مطالعه آزمایشگاهی اثر ارتفاع ریزش جریان بر توپوگرافی بستر پایین دست سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای شکل نوع A

جنور عبدی چوپلو^{1*}، مسعود قدسیان²، محمد واقفی³، سارا کازرونی⁴، الناز بداعی⁵

¹ دانشجوی دکتری مهندسی عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
² استاد هیدرولیک، گروه مهندسی عمران و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست و پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

³ دانشیار سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

⁴ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

⁵ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ دریافت: 1401/01/10؛ تاریخ پذیرش: 1401/04/05

چکیده

پیش‌بینی میزان آبشستگی موضعی در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی از موضوعات مورد توجه محققان در سال‌های اخیر بوده است. در این تحقیق آبشستگی پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای شکل تحت تغییرات شرایط هیدرولیکی جریان و ارتفاع ریزش جریان عبوری از سرریز به صورت آزمایشگاهی در کانالی به طول 10 متر و عرض و ارتفاع 0/75 و 0/80 متر در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه تربیت مدرس تهران بررسی شده است. از ر سوبات یکنواخت و غیر چسبنده با قطر متوسط 2 میلی‌متر به طول و عرض 3 و 0/75 متر در پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی استفاده شد. تمامی آزمایش‌ها در شرایط جریان آزاد انجام گردید. نتایج نشان داد که محل رخداد بیشینه عمق آبشستگی با افزایش ارتفاع ریزش جریان، در فاصله دورتری از سرریز قرار می‌گیرد. بیشینه عمق آبشستگی با افزایش ارتفاع ریزش جریان، افزایش می‌یابد. آبشستگی در میانه عرضی بستر کمتر از جداره‌ها آن می‌شود. افزایش ارتفاع ریزش جریان SXf همراه با تغییرات بیشتری در توپوگرافی بستر می‌باشد.

کلمات کلیدی: مطالعه آزمایشگاهی، آبشستگی، سرریز کلیدپیانویی، جریان آزاد، ارتفاع ریزش جریان

¹. نویسنده مسئول، Email: a.chonor@modares.ac.ir

مقدمه

سرریز سازه‌ای است که در بدنه یا در تکیه‌گاه‌های سد برای تخلیهٔ ایمن حجم مازاد بر ذخیره مخزن ساخته می‌شود و عامل اصلی ایمنی سدها در زمان سیلاب است. سرریز کلیدپیانویی نوع توسعه یافته سرریزهای کنگره‌ای است که با رویکرد افزایش ظرفیت تخلیه سرریزها، طراحی و ساخته می‌شود. این نوع سرریز از جمله سازه‌های کنترل با تنظیم جریان است که به ازای یک مقدار تراز آب روی تاج سرریز، دارای بیشترین ظرفیت تخلیه (حداقل 4 برابر) نسبت به سرریزهای خطی است. به طوری که برای یک دبی ثابت، عمق آب روی این نوع سرریز به مقدار قابل توجهی کمتر است (Anderson and Tullis, 2011). Lemperiere and Ouamane (2003) نخستین پژوهشگرانی بودند که بر روی هیدرولیک سرریزهای کلیدپیانویی کار کردند. در ادامه پژوهشگرانی مانند Lemperiere and Jun (2006); Barcouda et al (2006); Hien et al (2006); Ouamane and Lemperiere (2006); Anderson and Tullis (2005); Machiels (2012); Machiels et al (2012); Cicero and Delisle (2013); Laugier et al (2013); Mehboudi et al (2016); Safarzadeh and Noroozi (2017); Hu et al (2018); Karimi et al., 2019; and Abhash and Pandey (2021) پژوهش‌های گسترده‌ای برای بررسی تأثیر پارامترهایی از قبیل شکل هندسی سرریز در پلان، ارتفاع سرریز، ضخامت دیوار، شکل تاج، نوع و شکل رأس تاج بر روی الگوی جریان و رفتار هیدرولیکی حول این سازه‌ها و نهایتاً ضریب آبگذری و راندمان این سرریزها انجام دادند. با وجود مطالعات متعدد و گسترده‌ای که در زمینه عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کلیدپیانویی صورت گرفته است مطالعات معدودی نیز در زمینه آبشستگی پایین‌دست این سرریز انجام شده است که در ادامه به اهم آنها اشاره خواهد شد. (Justrich et al (2016) با مطالعه آزمایشگاهی روی آبشستگی پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی، تأثیر پارامترهایی همچون دبی جریان، ارتفاع ریزش جریان عبوری از روی

سرریز (ارتفاع سقوط جت)، خصوصیات رسوبات پایین‌دست سرریز و عمق پایاب را بر ابعاد حفره و پشته رسوبی بررسی کردند. ایشان دریافتند که با افزایش دبی و کاهش عمق پایاب، ابعاد حفره آبشستگی افزایش چشمگیری دارد و روابطی را برای تخمین ابعاد حفره ارائه نمودند. Yazdi et al (2020) به بررسی آزمایشگاهی آبشستگی پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی در دو نوع شکل تاج مستطیلی و دوزنقه‌ای در پلان پرداختند و بیان کردند که بیشینه عمق و طول حفره آبشستگی در سرریز مستطیلی بیشتر از سرریز دوزنقه‌ای است. مقایسه آبشستگی پایین‌دست سرریزهای کلیدپیانویی دوزنقه‌ای و مثلی شکل توسط Ghodsian et al (2021) انجام گردید. نتایج تحقیقات آنان نشان داد که به‌طور کلی میانگین مقادیر بیشینه عمق آبشستگی پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای بیشتر است. Kumar and Ahmad (2020) به مطالعه آزمایشگاهی آبشستگی پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی مستطیلی پرداختند. ایشان با بررسی اثر عمق پایاب به ازای دبی‌های مختلف دریافتند که جت‌های ریزشی از کلیدهای ورودی و خروجی سرریز عامل اصلی ایجاد حفره آبشستگی و پشته در پایین‌دست آن است. Bodaghi et al (2021) به بررسی آزمایشگاهی اثر جریان ورودی و عمق پایاب بر آبشستگی پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی در شرایط جریان آزاد پرداختند. نتایج تحقیقات آنان نشان داد که افزایش 62/5 و 125 درصدی عمق پایاب، به ترتیب کاهش 30/5 و 47/32 درصدی عمق آبشستگی را نشان داد. با افزایش 33/3 درصدی دبی در عمق‌های پایاب 8، 13 و 18 سانتی‌متر، عمق آبشستگی به ترتیب به میزان 30/86، 52/66 و 61/7 درصد افزایش می‌یابد. مروری بر پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد که بیشتر محققین به بررسی تأثیر شرایط جریان و شکل هندسی سرریز بر رفتار هیدرولیکی جریان عبوری و ضریب آبگذری

کمتری روی آبشستگی پایین دست سرریزهای کلیدپیانویی دوزنقه‌ای انجام شده است.

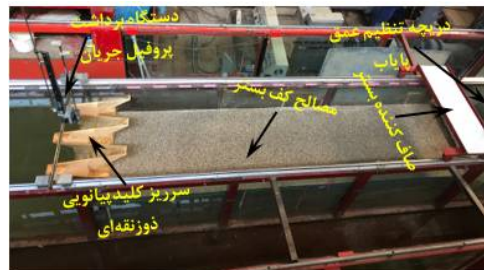
خروجی، عرض 75 سانتی‌متر (هم عرض کانال)، طول تاج و ارتفاع به ترتیب 50 و 20 سانتی‌متر می‌باشد. ابعاد هندسی سرریزهای استفاده شده نیز در شکل (2) مشخص شده است. آزمایش‌ها با دبی‌های جریان 30 و 40 لیتر بر ثانیه و ارتفاع‌های مختلف ریزش جریان عبوری از روی سرریز با عمق پایاب ثابت انجام شد. به منظور تعیین زمان مناسب در این آزمایش‌ها، یک آزمایش طولانی به مدت 15 ساعت در پایین دست سرریز دوزنقه‌ای انجام گردید و تغییرات عمق آبشستگی اندازه‌گیری شد که نتایج آن در شکل (3) نشان داده شده است. با توجه به این شکل روشن است که حفره آبشستگی پس از حدود 5 ساعت (300 min)، طبق معیار Chiew (1992)، به تعادل رسیده است. لذا با انتخاب این زمان تعادل، آزمایش‌های بعدی برای مدت زمان 5 ساعت انجام شد.

سرریزهای کلیدپیانویی پرداخته‌اند و مطالعات انگشت-شماری در زمینه آبشستگی پایین دست این سازه‌ها صورت گرفته است. از طرفی با توجه به اینکه تحقیقات بسیار

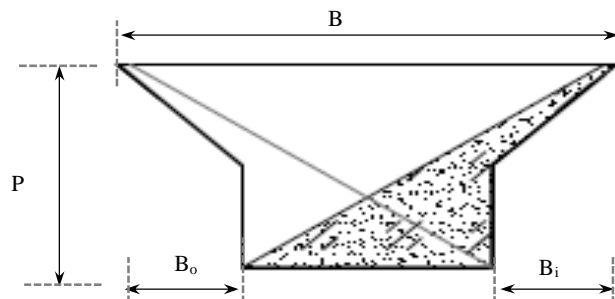
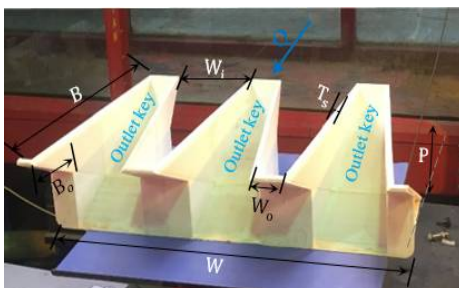
بنابراین در این تحقیق آبشستگی پایین دست سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای شکل متأثر از تغییرات شرایط هیدرولیکی جریان و ارتفاع ریزش جریان عبوری از آن به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

امکانات آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس و با استفاده از فلومی به طول 10 متر، عرض 0/75 متر و ارتفاع 0/8 متر انجام شد. تصویری از فلوم استفاده شده در شکل (1) نشان داده شده است. سرریز مورد استفاده در این آزمایش‌ها که در شکل (2) نشان داده شده است در فاصله 3/7 متری از ابتدای کانال به منظور ایجاد جریان یکنواخت و کاملاً توسعه یافته، نصب و آببندی آن انجام شد. جنس سرریز ترموپلاستیک با ضخامت 1/2 سانتی‌متر، دارای 6 کلید (3 کلید ورودی و 3 کلید

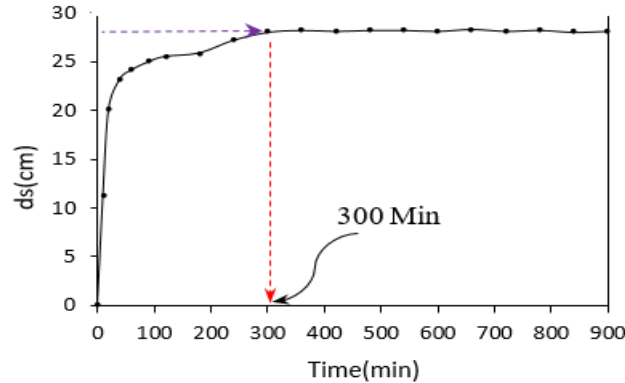


شکل 1- نمایی از کانال آزمایشگاهی به‌همراه ستاپ آزمایش‌ها



شکل 2- نمایی از سرریز کلیدپیانویی به‌همراه علائم و مقادیر ابعاد هندسی آن

P ارتفاع سرریز = 20 سانتی متر
 W عرض سرریز=عرض کانال= 75 سانتی متر
 W_i عرض دهانه های ورودی= 17/5 سانتی متر
 W_o عرض دهانه های خروجی= 5/1 سانتی متر
 B طول جانبی سرریز= 50 سانتی متر
 B_o و B_i لبه آویزان بالادست و پایین دست= 12/5 سانتی متر
 T_s ضخامت سرریز= 1/2 سانتی متر



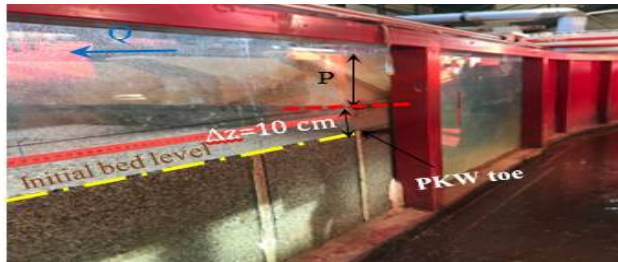
شکل 3- نمودار توسعه زمانی حفره آبشستگی پایین دست سرریز کلید پیاپویی در 15 ساعت

به آبشستگی ناچیز است. از طرفی طبق گزارش Justrich (2016) et al، مقدار d_{50}/P در طبیعت برای تعدادی از سدها در محدوده $0.01 \leq d_{50}/P \leq 0.04$ قرار دارد. بنابراین با توجه به معیارهای فوق و استفاده از سرریز با ارتفاع $P=20\text{cm}$ ، قطر انتخابی مصالح در این تحقیق، برابر 2 میلی متر انتخاب شد و در طولی برابر 3 متر پوشیده شد. تراز بستر رسوبی جهت بررسی ارتفاع ریزش جریان عبوری از سرریز در یک سری آزمایش ها، همتراز پنجه سرریز و برابر صفر ($\Delta z=0$) است (شکل 4-الف) و در سری بعدی آزمایش ها به فاصله 10 سانتی متری از تراز پنجه سرریز ($\Delta z=10\text{ cm}$) می باشد (شکل 4-ب).

با توجه به اینکه در تمامی آزمایش ها محدوده عدد رینولدز جریان بیش از 2000 می باشد بنابراین جریان در محدوده آشفتگی قرار دارد و می توان از عدد رینولدز صرف نظر نمود (Henderson, 1986) همچنین با توجه به دبی های انتخابی، بار آبی روی سرریز بیش از $2/5$ سانتی متر اندازه گیری شد، بنابراین می توان از اثر کشش سطحی نیز صرف نظر نمود (Soler et al., 2015). پس طراحی آزمایش ها به نحوی صورت گرفت که کشش سطحی و لزجت دینامیکی اثرگذار نباشد. طبق تحقیقات Pagliara et al (2006) در صورتی که حداقل اندازه ذرات بستر (d_{10}) بیشتر از 1 میلی متر باشد اثرات مقیاس مربوط



(الف)

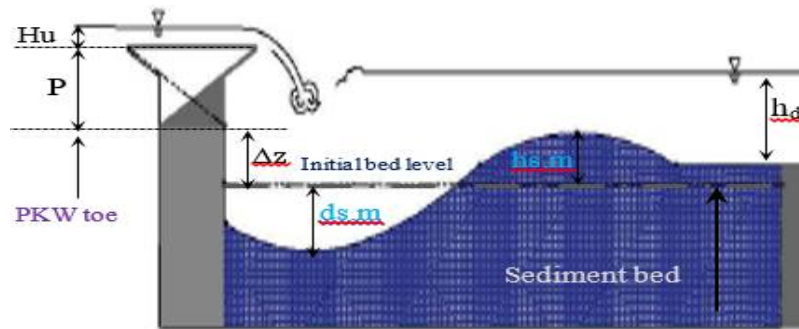


(ب)

شکل 4- نمایی از بستر پایین دست سرریز با تراز ارتفاعی بستر نسبت به پنجه سرریز برابر الف) صفر و ب) 10 سانتی متر

ترتیب بیشینه عمق آبشستگی و حداکثر تراز رسوبگذاری، H_u و h_d به ترتیب عمق جریان در بالادست سرریز و عمق پایاب می باشد.

نمای کلی حفره آبشستگی پایین دست سرریز کلیدپیانویی و پارامترهای هندسی و هیدرولیکی جریان در شکل (5) ارائه شده است. در این شکل $h_{s,m}$ و $d_{s,m}$ به



شکل 5- نمای کلی از مشخصات هندسی حفره آبشستگی پایین دست سرریز کلیدپیانویی و پارامترهای هیدرولیکی

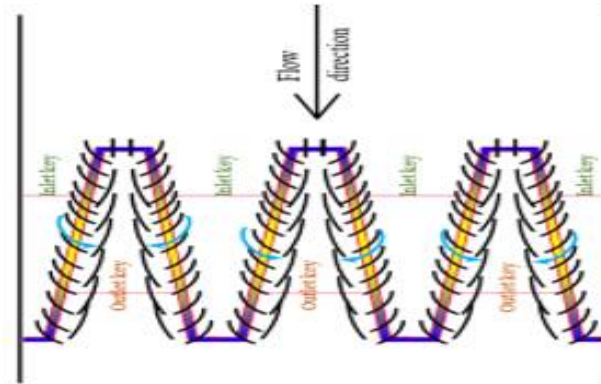
داشت که با گودتر شدن حفره آبشستگی و افزایش سطح مقطع جریان، سرعت جریان کاهش یافته و ظرفیت فرسایش دهندگی جریان کاهش یابد. در این وضعیت بستر اصطلاحاً به شرایط تعادل خواهد رسید، لیکن تعادل دینامیکی هرگز حاصل نخواهد شد. در این حالت عمق بیشینه حفره آبشستگی تقریباً ثابت مانده اما به علت وجود حرکات رفت و برگشتی ذرات رسوبی مجاور حفره، ممکن است شکل حفره دچار تغییراتی جزئی شود. همچنین بر خورد خطوط جریان جدا شده از لبه سرریز با عمیق ترین نقطه حفره آبشستگی سبب گسترش عمقی حفره خواهد شد. بدین ترتیب برای لحظات کوتاهی از زمان فرایند توسعه حفره، گسترش عمقی حفره نسبت به گسترش طولی آن بیشتر است. جز در لحظات اولیه آزمایش که انتقال ذرات رسوبی به صورت ترکیبی از بار معلق و بار

نتایج و بحث

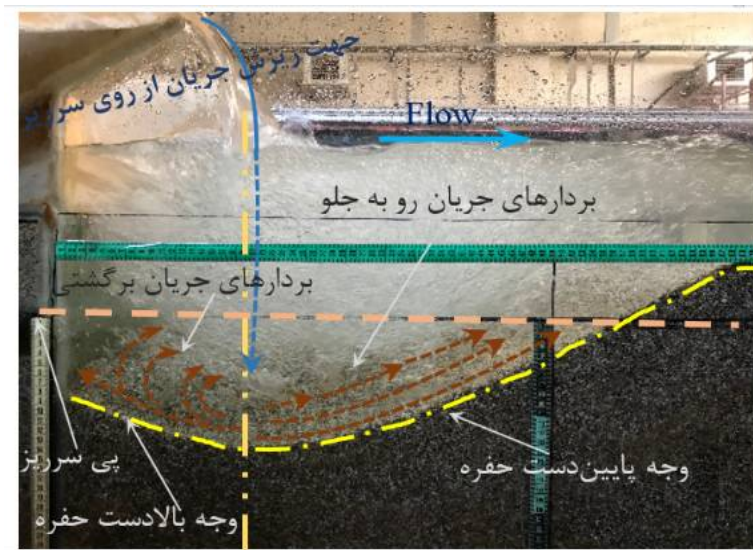
در حین آزمایش ها و با توجه به شکل (6)، جریان عبوری از روی سرریز کلیدپیانویی را می توان به دو بخش تقسیم کرد. بخش اول جریانی که از روی دیوارهای مستقیم عمود بر جریان عبور می کند (تاج های بالادست و پایین دست) و بخش دوم جریان متغیر مکانی که از روی دیواره جانبی سرریز می گذرد. هنگامی که جریان از روی تاج سرریز کلیدپیانویی ریزش می کنند، انرژی پتانسیل ناشی از بار آبی روی تاج سرریز به انرژی جنبشی تبدیل می شود. این انرژی مخرب موجب ایجاد گردابه های بزرگ مقیاس و تشکیل حفره آبشستگی در این ناحیه خواهد شد. در واقع در پایین دست سرریز کلیدپیانویی ظرفیت جریان جهت فرسایش دهندگی بستر و حمل ذرات رسوبی قابل توجه است. فرسایش بستر تا جایی ادامه خواهد

جریان سطحی عمل می‌کنند که منجر به رسوبگذاری در ناحیه حفره می‌شود. نکته دیگر آنکه، کل ناحیه حفره آبشستگی، از مقطعی با بیشینه عمق قابل تقسیم به دو بخش مجزا است: در وجه بالادست حفره، جریان‌های برگشتی و سرعت‌های منفی سبب شکل‌گیری وجه بالادست حفره خواهد شد و در وجه پایین‌دست حفره، وجود سرعت‌های مثبت و جریان‌های رو به جلو موجب شکل‌گیری این بخش خواهد شد. در حقیقت مقطع حفره با بیشینه عمق، تمیز دهنده جریان‌های رو به جلو و جریان‌های برگشتی است که در شکل (7) نشان داده شده است. رسوبات خارج شده از حفره، در پایین‌دست ته‌نشین شده و تشکیل پشته رسوبی می‌دهد. مشخصات این پشته رسوبی نیز تابع شرایط جریان است.

بستر انجام می‌شود، انتقال بار رسوبی به طور عمده در قالب بار بستری رخ خواهد داد. شدت تعلیق ذرات رسوب تابعی از ارتفاع ریزش جریان و دبی جریان است که با افزایش بعد قائم حفره از میزان آن کاسته می‌شود. به‌طور کلی فرایند تغییرات بستر پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی ترکیبی از دو فرایند آبشستگی و رسوبگذاری است. در طول فرایند آبشستگی، جریان خروجی از کلیدهای ورودی و خصوصاً کلیدهای خروجی سرریز به ترتیب به صورت آبشار آزاد و جت مایل (شکل 6) با بستر برخورد کرده و آبشستگی قابل توجهی را موجب می‌گردد. پس از گذشت مدت زمان کوتاهی از گسترش عمقی حفره آبشستگی، خطوط جریان از عمق حفره به سمت سطح آب منحرف می‌شوند و پس از برخورد با سطح آب به صورت یک



شکل 6- تصویری از جریان عبوری از روی سرریز کلیدپیانویی

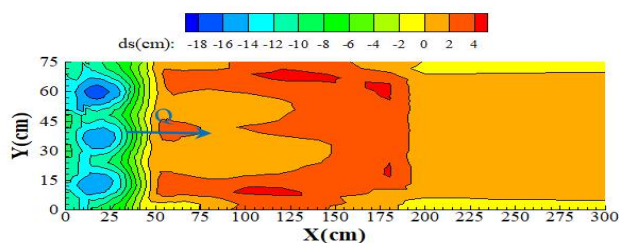


شکل 7- تصویری از جهت جریان‌های چرخشی در حفره آبستنگی

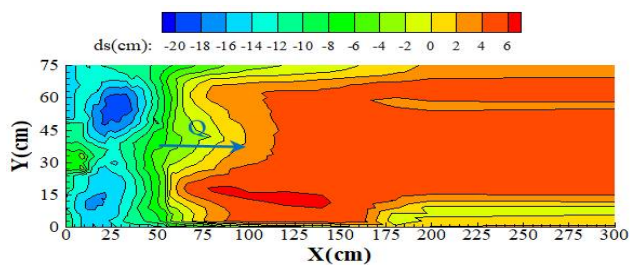
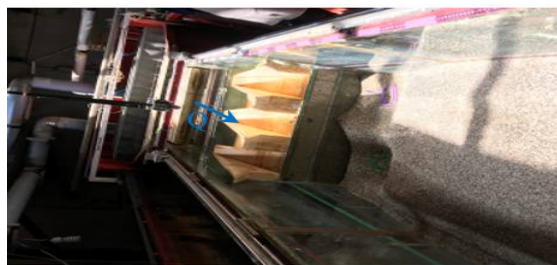
نمی‌شود. در شکل (8) تغییرات توپوگرافی بستر در طول کانال در دو حالت بستر هم‌تراز پنجه سرریز ($\Delta z = 0$) و بستر 10 سانتی‌متر پایین‌تر از پنجه سرریز ($\Delta z = 10 \text{ cm}$) برای نسبت بی‌بعد Hu/P برابر با 0/16 ارائه شده است. بر اساس این شکل‌ها مشاهده می‌گردد که محل آغاز آبستنگی، بلافاصله از پنجه سرریز می‌باشد و حفره‌های آبستنگی در زیر کلیدهای خروجی با بیشینه عمق آبستنگی شکل گرفته‌اند.

می‌توان اینگونه استدلالت کرد که به خاطر تلاقی جریان ریزشی از روی تاج دیوارهای کناری سرریز با جریان خروجی بالادست، بالادستی سطح آب در کلیدهای خروجی سرریز رخ داده و هنگامی که جریان خروجی وارد ناحیه پایین‌دست سرریز شود، آشفتگی شدیدی در خروجی کلیدهای سرریز شکل می‌گیرد. به همین دلیل بستر پایین‌دست که در برابر کلید خروجی قرار گرفته بیشتر شسته می‌شوند.

در حین آزمایش‌ها مشاهده شد که نرخ فرسایش حفره آبستنگی با گذشت زمان کم می‌گردد. می‌توان اینگونه استدلال کرد که با افزایش تدریجی عمق حفره با زمان، عمق جریان افزایش می‌یابد. از دیدگاه پیوستگی، با افزایش سطح مقطع جریان، سرعت متوسط جریان در آن مقطع کاهش می‌یابد. بر همین اساس، سرعت جریان در مجاورت بستر با گسترش عمقی حفره کاهش پیدا کرده و در نتیجه نرخ فرسایش با گذشت زمان کم می‌شود. همچنین افزایش تلفات انرژی جنبشی ناشی از گردابه‌ها و جریان‌های چرخشی موجود در حفره آبستنگی، با افزایش عمق حفره، این گردابه‌ها نیز انرژی جنبشی بیشتری را مستهلک کرده و آبستنگی کاهش می‌یابد. در نهایت سرعت جریان در مجاورت بستر در حد سرعت بحرانی ذره رسوبی در آستانه حرکت کاهش یافته و در نتیجه به علت عدم توانایی انتقال ذرات رسوبی از ناحیه حفره، شرایط تعادل نسبی حاصل می‌شود و تغییر قابل ملاحظه‌ای در ابعاد حفره مشاهده



(الف)



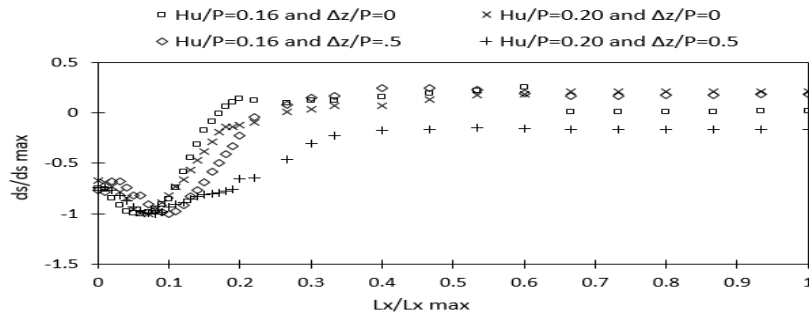
(ب)

شکل 8- نمونه‌ای از تغییرات توپوگرافی بستر در آزمایش با: (الف) $\Delta z=0$ و (ب) $\Delta z=10$ cm

بستر، بخشی از رسوبات موجود در مجاورت آن جداره را به صورت بار بستر در عرض منتقل می‌کنند. این پدیده در سمت دیگر جداره نیز مشاهده می‌شود. در نتیجه جریان‌ها عرضی از دو طرف جداره در میانه عرضی تلاقی کرده و بار

همچنین در پایین دست حفره‌ها، آبشستگی در میانه عرضی بستر کمتر از جداره‌ها آن می‌شود. در توجیه این پدیده می‌توان گفت سرعت‌های ناشی از جریان‌های عرضی پس از برخورد با جداره و در بازگشت به میانه عرضی

آزمایش‌ها، در طول کانال تا حدودی یکسان می‌باشند. ولی مقدار آبشستگی در شرایطی که Hu/P و $\Delta z/P$ به ترتیب برابر با $0/20$ و $0/5$ هست، نسبت به آزمایش‌های دیگر بیشتر است. بر مبنای این شکل، کمترین تغییرات توپوگرافی بستر در پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی در آزمایشی با حالت بستر هم‌تراز با پنجه سرریز ($\Delta z=0$) و با نسبت Hu/P ، برابر با $0/16$ ، به دلیل کم بودن سرعت جریان روبه جلو و کاهش ارتفاع جت ریزشی جریان، رخ می‌دهد. همچنین مشاهده شد که محل رخداد بیشینه عمق آبشستگی با افزایش تراز ریزش جریان عبوری از سرریز در فاصله دورتری از سرریز قرار می‌گیرد.

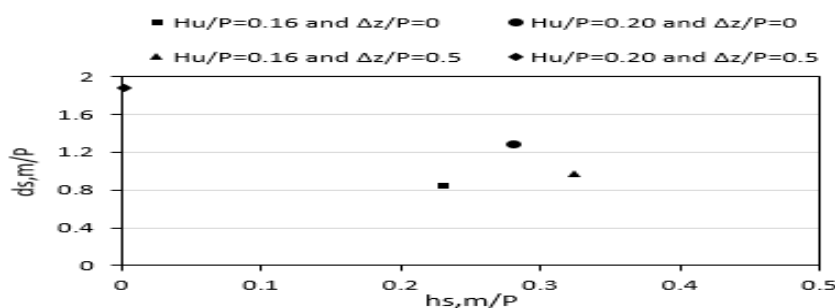


شکل 9- نمونه‌ای از پروفیل طولی بستر متأثر از تغییرات شرایط هیدرولیکی جریان و ارتفاع ریزش جریان

در واقع با افزایش ارتفاع ریزش جریان، توان فرسایشی جریان در عمق افزایش یافته است و جت‌های ریزشی ناشی از کلیدهای ورودی و خروجی سرریز، توانایی نفوذ بیشتری خواهند داشت و در نتیجه آبشستگی و انتقال رسوب بیشتر رخ می‌دهد. همچنین با افزایش تراز نسبی ارتفاع جریان بالادست سرریز، در حالت هم‌تراز بودن سطح رسوبات با پنجه سرریز، روند افزایشی حداکثر ارتفاع رسوبگذاری در پایین‌دست حفره آبشستگی مشاهده می‌گردد، بطوریکه در شرایط کمترین عمق نسبی $Hu/P=0.16$ ، حداکثر تراز رسوبگذاری 22 درصد کمتر از آزمایشی با بیشترین عمق نسبی $Hu/P=0.20$ می‌باشد.

بستر در این ناحیه ته‌نشین می‌گردد. با مقایسه دو شکل 8 الف و ب، آنچه واضح هست تغییرات بیشتر توپوگرافی بستر با افزایش ارتفاع ریزش جریان می‌باشد بطوریکه با افزایش ارتفاع ریزش جریان بیشینه و محدوده آبشستگی بیشتر شده است. نمونه‌ای از پروفیل‌های طولی بستر، در شرایط بررسی تاثیر متغیرهای موثر بر آبشستگی در پایین‌دست سرریز کلید پیانویی در شکل (9) آورده شده است. در این شکل محور افقی، فاصله‌ی بی‌بعد شده از انتهای سرریز و محور عمودی، تراز بستر بی‌بعد شده با بیشینه عمق آبشستگی را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان گفت که روند تغییرات بستر در تمامی

شکل (10) ارتباط بین بیشینه عمق نسبی آبشستگی و حداکثر تراز ارتفاع رسوبگذاری در اثر متغیرهای مستقل تاثیرگذار را نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که در عمق‌های بیشتری برای تراز نسبی عمق بالادست سرریز، عمق حفره آبشستگی بیشتر رخ خواهد داد. بطوریکه در نسبت بی‌بعد $\Delta z/P=0.5$ ، در شرایط کمینه عمق نسبی $Hu/P=0.16$ ، مقادیر بیشینه عمق آبشستگی حدود $47/5$ درصد کمتر از آزمایشی با بیشینه عمق نسبی $Hu/P=0.20$ است. همچنین مشاهده می‌گردد که تغییرات نسبی بیشینه عمق آبشستگی در حفره پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی با افزایش ارتفاع ریزش جریان، افزایشی است.



شکل 10- مقایسه بیشینه عمق‌های نسبی آبشستگی و حداکثر تراز رسوبگذاری در اثر متغیرهای مستقل تاثیرگذار

نتیجه گیری

- 1) یکی از انواع سرریزهای غیرخطی، سرریز کلیدپیانویی می‌باشد. در طی سالیان گذشته پژوهش‌های مختلفی در زمینه آبشستگی پایین دست این نوع سرریز انجام شده است. اما مقایسه‌ای کامل در خصوص آبشستگی پایین دست سرریز دوزنقه‌ای تحت تاثیر تغییرات ارتفاع ریزش جریان صورت نگرفته است. در این پژوهش با مدل سازی آزمایشگاهی این موضوع مورد بررسی قرار گرفت. خلاصه‌ای از نتایج حاصله به شرح ذیل است:
- 2) محل آغاز آبشستگی بلافاصله از دیواره پایین دست سرریز رخ داد.
- 3) بستر پایین دست که در برابر کلید خروجی قرار گرفته آبشستگی بیشتری رخ داد.
- 4) مقدار آبشستگی در مدلی با Hu/P و $\Delta z/P$ به ترتیب برابر با $0/20$ و $0/5$ نسبت به آزمایش‌های دیگر بیشتر می‌باشد.
- 5) کمترین تغییرات توپوگرافی بستر در پایین دست

- سرریز کلیدپیانویی در مدلی با حالت بستر هم تراز با پنجه سرریز و با نسبت Hu/P برابر با $0/16$ اندازه گیری شد.
- 6) محل رخداد بیشینه عمق آبشستگی با افزایش تراز ریزش جریان عبوری از سرریز در فاصله دورتری از سرریز قرار می‌گیرد.
- 7) مقادیر بیشینه عمق آبشستگی در نسبت بی بعد $\Delta z/P=0.5$ و $Hu/P=0.16$ حدود $47/5$ درصد کمتر از نسبت $Hu/P=0.20$ می‌باشد.
- 8) تغییرات نسبی بیشینه عمق آبشستگی در حفره پایین دست سرریز کلیدپیانویی با افزایش ارتفاع ریزش جریان، افزایشی است.
- 9) جهت تکمیل مطالعات مربوط به آبشستگی پایین دست سرریز کلیدپیانویی، موارد ذیل پیشنهاد می‌گردد:
- 10) بررسی تاثیر دانه بندی مصالح بستر بر روی آبشستگی پایین دست سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای
- 11) بررسی تاثیر شیب کلیدهای خروجی سرریز بر روی آبشستگی پایین دست سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای

منابع

Abhash A., and Pandey K. K. 2021. Numerical study of discharge-head relationship of piano key weirs for low heads. *Water Resources*, 48(2), pp.235-244.

Anderson R.M., and Tullis B.P. 2011. Piano key weir: Reservoir versus channel application. *Journal*

of irrigation and drainage engineering, 138(8), pp.773-776.

Anderson R.M., Tullis B.P. 2013. Piano key weir hydraulics and labyrinth weir comparison. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(3), 246-253.

Barcouda M., Cazaillet O., Cochet P., Jones B.A., Lacroix S., Laugier F., Odeyer C., Vingny J.P.

2006. Cost-effective increase in storage and safety of most dams using fuse gates or P. K. weirs. Proc. 22nd ICOLD Congress. Barcelona, Spain.
- Bodaghi E., Ghodsian M., Abdi Chooplou Ch. 2021. Experimental study on the Effect of Discharge and Tailwater Depth on scour scour of a Piano Key Weir(A). Int. Conf, Gorgan, Iran.
- Chiew Y.M. 1992. Scour protection at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(9), pp.1260-1269.
- Cicero G., Delisle J. 2013. Effects of the crest shape on the discharge efficiency of a type A Piano Key weir (pp. 41-48). CRC Press/Balkema.
- Ghodsian M., Abdi Chooplou Ch., Ghafouri A. 2021. Scouring of Triangular and Trapezoidal Pianos Key Weir. *Iranian Hydraulic Association Journal of Hydraulics*, 16(2). (In Persian)
- Henderson F.M. 1986. *Open channel flow*, McMillan Publishing Company, New York.
- Hien T.C., Son H.T., Khanh M.H.T. 2006. Results of some piano keys weir hydraulic model tests in Vietnam, Proc. 22nd ICOLD Congress, CIGB/ICOLD, Barcelona Q87(R39). pp.581-596.
- Hu H., Qian Z., Yang W., Hou D., Du L. 2018. Numerical study of characteristics and discharge capacity of piano key weirs. *Flow Measurement and Instrumentation*, 62, pp.27-32.
- Jüstrich S., Pfister M., Schleiss A.J. 2016. Mobile riverbed scours downstream of a piano key weir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(11), pp.04016043.
- Karimi M.J., Attari M., Saneie M.R.J. 2019. Ghazizadeh, Side weir flow characteristics: Comparison of piano key, labyrinth, and linear types, *J. Hydraul. Eng.* 144.
- Kumar B., and Ahmad Z. 2020. Experimental Study on Scour Downstream of a Piano Key Weir with Nose. 8th IAHR ISHS, Santiago, Chile.
- Laugier F. Vermeulen J., and Lefebvre V. 2013. Overview of piano key weirs experience developed at EDF during the past few years. *Labyrinth and piano key weirs II*, CRC, Boca Raton, FL, pp.213-226.
- Lempérière F., and Jun G. 2005. Low Cost Increase of Dams Storage and Flood Mitigation: The Piano Keys weir. Proc. of 19th Congress of ICID, Beijing, China.
- Lempérière F., Ouamane A. 2003. The Piano Keys weir: a new cost-effective solution for spillways. *International Journal on Hydropower & Dams*, 10(5), 144-149.
- Machiels O. 2012. Experimental study of the hydraulic behavior of piano key weirs, PhD. Dissertation, Faculty of Applied Science, University of Liège.
- Machiels O. Erpicum S. Archambeau P. Dewals B.J., and Pirotton M. 2012. Piano Key weir preliminary design method - Application to a new dam project. Proc. Int. conf. Labyrinth and Piano Key Weirs, Liege, Belgium. pp.199-206.
- Mehboudi A. Attari J., and Hosseini S.A. 2016. Experimental study of discharge coefficient for trapezoidal piano key weirs. *Flow Measurement and Instrumentation*, 50, pp.65-72.
- Ouamane A., Lempérière F. 2006. Design of a new economic shape of weir. Proceedings of the International symposium on dams in the societies of the 21st Century, 18, pp.463-470.
- Pagliara S., Hager W.H., Minor H.E. 2006. Hydraulics of plane plunge pool scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 10.1061/(ASCE)0733-9429 (2006)132:5(450), pp.450-461.
- Safarzadeh A., Noroozi B. 2015. 3D hydrodynamics of trapezoidal Piano Key spillways. *International Journal of Civil Engineering*, 15(1), pp.89-101.
- Soler J., Gamazo P., Rodellar J., Gomez M. 2015. Operation of an irrigation canal by means of the passive canal control. *Irrigation science*, 33(2), pp.95-106.
- Yazdi A.R., Hoseini S.A., Nazari S., Amanian N. 2020. Comparison of Downstream Scour of the Rectangular and Trapezoidal Piano Key Weirs, *Iranian Hydraulic Association Journal of Hydraulics*, 15(2), 95-102. (In Persian).