

اثر شرایط جریان ورودی و قطر مصالح بستر بر آبشستگی پایندست سرریز کلیدیانویی دوزنقهای نوع A: بررسی آزمایشگاهی

سارا کازرونی¹، چنور عبدی چوپلو² و مسعود قدسیان²

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

چکیده

یکی از مباحث مهم در حوزه مسایل مهندسی رودخانه، پیشبینی و کنترل فرسایش در نزدیکی سازه‌های هیدرولیکی، که پتانسیل به خطر افتادن ایمنی این سازه‌ها را دارد، میباشد. به طور کلی، جریان پایبندست سازه‌های هیدرولیکی مانند جریان ناشی از سرریزها به صورت جت ریزشی می باشد. این جت آبشستگی موضعی را در اطراف این سازه‌ها ایجاد کرده که در صورت توسعه به زیر سازه، باعث تخریب آن میشود. برای طراحی درست سازه‌های هیدرولیکی لازم است مهندسان مطالعتهای دقیقی و فهم کامل از آبشستگی و مکانیزم آن داشته باشند تا بتوانند تمهیدات لازم را به منظور پایداری این سازه‌ها در نظر بگیرند. امروزه با توجه به مزایای سرریزهای تاج طولانی به خصوص سرریز کلیدیانویی از این نوع سرریزها به عنوان گزینه-ای مناسب به جای سرریزهایی با تاج مستقیم استفاده میشود. از آنجا که سرریزها سازه‌هایی هستند که در معرض پدیده‌های آبشستگی قرار دارند اطلاع از وضعیت آبشستگی پایین دست این سازه حائز اهمیت میباشد. این پژوهش در کانالی به طول 10 متر، عرض 75 سانتیمتر و ارتفاع 80 سانتیمتر به بررسی تاثیر تغییرات عمق جریان، عمق پایاب و قطر مصالح بستر بر مشخصات حفره آبشستگی پایبندست سرریز کلیدیانویی دوزنقهای نوع A پرداخته است. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش 20 درصدی قطر متوسط ذرات رسوبی، بیشینه عمق آبشستگی 35 درصد کاهش، حداکثر تراز رسوبگذاری حدود 43 درصد افزایش و موقعیت حداکثر تراز رسوبگذاری 52 درصد کاهش مییابد.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی، سرریز کلیدیانویی، شرایط جریان ورودی، دانهبندی مصالح

مقدمه

سرریزها از جمله سازه‌های هیدرولیکی سدها هستند که امکان تخلیه سیلاب را از مخزن سد به رودخانه پایبندست آن فراهم میآورند (ویشر و هگر 1998). از لحاظ ایمنی، کاربرد سرریزهای آزاد نسبت به سرریزهای دریچه‌دار ارجحیت داشته و در مواردی که فضای کافی برای احداث آنها وجود نداشته باشد، میتوان از انواع سرریزهایی که طول آنها بیشتر میباشد استفاده نمود (خاتسوریا 2005). سرریزها بر اساس طول تاج به سه دسته سرریزهای کوچک شده، سرریزهای هم عرض کانال و سرریزهای تاج طولانی تقسیم میشوند. سرریزهای هم عرض کانال به صورت عمود بر جریان قرار گرفته و عرض آنها با عرض کانال برابر است. در سرریزهای تاج طولانی با افزایش طول سرریز، امکان آبگذری بیشتر، با هد ثابت فراهم میشود. از جمله این سرریزها میتوان به سرریزهای کلیدیانویی اشاره کرد. به دلیل راندمان بالای این سرریزها و اقتصادی بودن آنها، لزوم تحقیق و بررسی در مورد این سرریز بیش از پیش احساس میشود. سرریزهای کلیدیانویی، شکل جدیدی از سرریزهای غیرخطی هستند که به دلیل مزیت‌هایی همچون: قابلیت احداث روی سدهای موجود و سدهای وزنی جدید، افزایش 4 برابری ظرفیت آبگذری نسبت به سرریزهای معمولی، افزایش ظرفیت مخزن، مقرون به صرفه بودن، هزینه نگهداری کمتر، ساختار ساده و سادگی اجرا، مورد استقبال ویژه‌ای قرار گرفته‌اند.

درمورد آبگذری جریان عبوری از سرریزهای کلیدپیانویی مطالعاتی توسط محققین مختلف صورت گرفته است، خلاصه‌ای از برخی تحقیقات به شرح زیر می‌باشد: هین (2006) و بارکودا و همکاران (2006) نشان دادند اگر دهانه ورودی این نوع سرریز بزرگتر از دهانه خروجی آن در نظر گرفته شود، باعث افزایش دبی عبوری از سرریز می‌شود. مهبودی و همکاران (2014) نشان دادند که ظرفیت آبگذری سرریز کلیدپیانویی دوزنقهای از نوع مستطیلی بیشتر می‌باشد. خاساف و بغدادی (2015) برتریهای سرریزهای کلیدپیانویی را نسبت به سرریزهای خطی بیان کردند.

آبشستگی در پایبندست سرریز میتواند تأثیر مستقیمی بر پایداری سازه داشته باشد. ازسوی دیگر هزینههای بسیار زیاد ساخت سازههای مستهلککننده انرژی مانند حوضچههای آرامش و حوضچههای استغراق باعث شده تا اهمیت آبشستگی در بستر رودخانه و محافظت آن بیشتر شود. در صورت وجود انواع حوضچهها یا کفبند، بررسی و ارزیابی آبشستگی در پایبندست این سازهها ضروری می‌باشد. به همین دلیل، پیشبینی مشخصات حفره آبشستگی در پایبندست سرریزهای کلیدپیانویی مورد توجه برخی از پژوهشگران بوده است. احمدی دهرشید و همکاران (2016) به بررسی تأثیر دبی و عمق پایاب بر ابعاد حفره آبشستگی پایبندست سرریز کلیدپیانویی مستطیلی پرداختند. نتایج تحقیقات آنان نشان داد که با افزایش عمق پایاب، پیشینه عمق آبشستگی کاهش می‌یابد و افزایش دبی موجب افزایش ابعاد حفره آبشستگی می‌شود. جاستریچ و همکاران (2016) به بررسی آزمایشگاهی آبشستگی در پایبندست سرریز کلیدپیانویی مستطیلی شکل تحت تأثیر پارامترهای هیدرولیک جریان ورودی و دانهبندی مصالح بستر پایبندست سرریز پرداختند. نتایج تحقیقات آنان نشان داد که پیشینه عمق آبشستگی به ویژگیهای رسوب، دبی، اختلاف ارتفاع جریان در بالادست و پایبندست و عمق پایاب بستگی دارد. افزون بر این ابعاد هندسی حفره آبشستگی، تابعی از پیشینه عمق حفره آبشستگی هستند. یزدی و همکاران (2020) آبشستگی پایبندست سرریزهای کلیدپیانویی دوزنقهای و مستطیلی شکل را بررسی کردند. نتایج تحقیقات آنان نشان داد که عمق آبشستگی در سرریز کلیدپیانویی مستطیلی بیش از سرریز کلیدپیانویی دوزنقهای بود، به گونه‌ای که در همهی دبیها به طور میانگین عمق نسبی حفره آبشستگی در سرریز کلیدپیانویی دوزنقهای نسبت به سرریز کلیدپیانویی مستطیلی 7 درصد کاهش می‌یابد. ایشان رابطهای برای عمق پیشینه آبشستگی برای سرریز کلیدپیانویی دوزنقهای ارائه دادند. مرادی و همکاران (1399) به مطالعه آبشستگی موضعی در پایبندست سرریزهای کلیدپیانویی با در نظر گرفتن بستر رسوبی با دو دانهبندی غیرچسبنده پرداختند. نتایج تحقیقات آنان نشان داد که مقادیر آبشستگی در رسوبات ریزدانه بیشتر از رسوبات درشتدانه رخ داده است. قدسیان و همکاران (2020) به بررسی آبشستگی پایبندست سرریز کلیدپیانویی دوزنقهای شکل پرداختند. نتایج تحقیقات آنان نشان داد که افزایش 112، 5/89 و 5/63 درصدی عمق پایاب در دبیهای 30، 40 و 50 لیتر بر ثانیه، به ترتیب کاهش 37، 35 و 3/20 درصدی عمق آبشستگی را به دنبال دارد. همچنین آنان معادلهای برای رخنمای طولی حفره آبشستگی ارائه دادند. کومار و احمد (2020)، تحقیقات تجربی بر روی سرریز کلیدپیانویی با دماغه و مقایسه با حالت بدون دماغه، را برای مطالعه الگوی آبشستگی انجام دادند. نتایج گزارش شده توسط ایشان نشان می‌دهد که حداکثر عمق آبشستگی عمدتاً به دلیل دو جت است که از کلیدهای ورودی و خروجی خارج می‌شوند. همچنین پروفیل آبشستگی نشانمیدهد، عمق و طول آبشستگی در دبیهای بالا با عمق پایاب کم، بیشتر است.

بررسی آبشستگی پایبندست این سرریز با در نظر گرفتن سه دبی، عمق پایاب و دانه بندی میتواند اطلاعات بیشتری درمورد مشخصات پروفیل آبشستگی پایبندست سرریز برای پیشبینی و کنترل میزان آبشستگی ارائه کند. بنابراین در این تحقیق آزمایشگاهی پیشینه عمق آبشستگی و حداکثر تراز رسوبگذاری و موقعیت آنها در پایبندست سرریز کلیدپیانویی دوزنقهای شکل در دبیها و عمق پایابهای مختلف، با دو دانهبندی مصالح بستر بررسی شد.

مواد و روشها

آزمایشها در کانالی با مقطع مستطیلی، اسکلت فلزی و دیواره شیشه‌ای، به طول 10 متر، عرض 75/0 متر و ارتفاع 80/0 متر در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب و سازه-

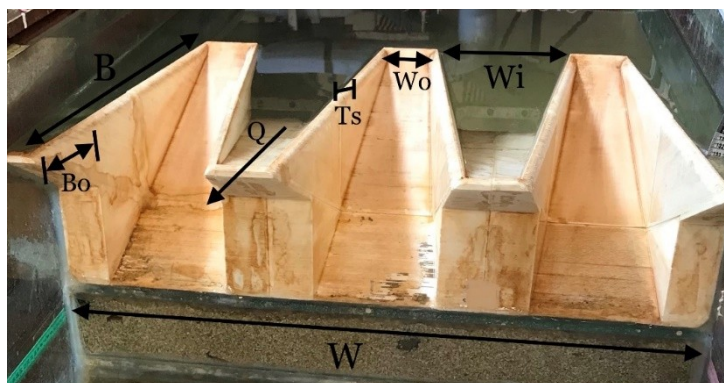
های هیدرولیکی، دانشگاه تربیت مدرس تهران انجام شد (شکل 1). جریان آب از طریق یک پمپ از مخزن اصلی به فلوم انتقال میابد. عمق پایاب به کمک یک دریچه در انتهای فلوم تنظیم می شود.

مقدار عمق جریان به وسیله عمق سنج قرائت و دبی جریان توسط دبی سنج اندازه گیری می شود. همهی آزمایشها با سرریز در شرایط جریان آزاد انجام شد. سرریز کلیدپیانویی نوع A دوزنهای شکل مورد استفاده در این پژوهش، از جنس ترموپلاستیک با ضخامت 2/1 سانتی-متر، دارای 6 کلید (3 کلید ورودی و 3 کلید خروجی) میباشد. برابر شکل 2 و جدول شماره 1 نشانهای استاندارد در ویژگیهای هندسی سرریز کلیدپیانویی همگی بر حسب سانتیمتر شامل: ارتفاع سرریز، W عرض سرریز (برابر عرض کانال)، W_i عرض دهانههای ورودی، W_o عرض دهانههای خروجی، B_0 لبه آویز بالادست، B_i لبه آویز پاییندست، B طول جانبی سرریز، T_s ضخامت سرریز میباشد. پارامترهای هیدرولیکی شامل: d_{sm} بیشینه عمق آبشستگی، H_{sm} حداکثر تراز رسوبگذاری و H_u عمق جریان در بالادست سرریز، L_s موقعیت بیشینه آبشستگی و L_H موقعیت بیشینه رسوبگذاری میباشد.

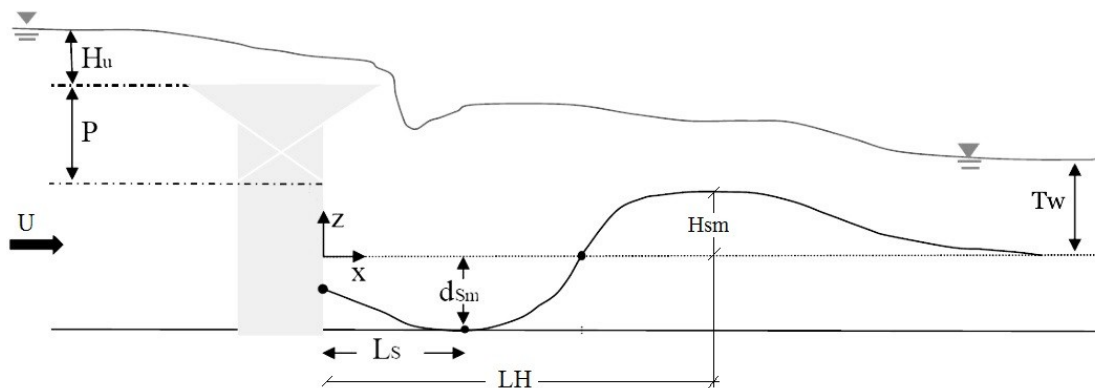
آزمایشها در دو عمق پایاب (8 cm و 18) و دو دبی (30 و 40 l/s) انجام شده است. دو نوع مصالح رسوبی غیر چسبنده با قطر متوسط 2/2 و 64/1 میلیمتر در پاییندست سرریز به طول 3 متر و عرض 75 سانتیمتر قرار گرفته است.



شکل 1- نمایی از فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده این پژوهش



الف



ب

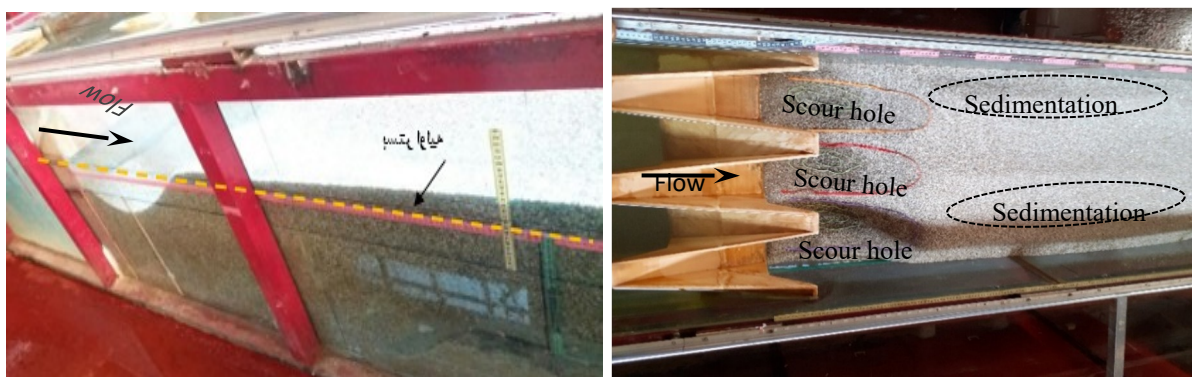
شکل 2- سرریز کلیدپیانویی: (الف) تصویر سرریز و پارامترهای مربوطه، (ب) نمای جانبی به همراه نمای کلی از مشخصات هندسی حفره آبشستگی و پشته رسوبی پایین

جدول 1- ویژگیهای هندسی سرریز کلیدپیانویی نوع A

T_s	B	B_0	B_i	W_o	W_i	W	P	پارامتر
1.2	50	12.5	12.5	5.1	17.5	75	20	مقدار (cm)

نتایج و بحث

شکل 3 نمونه‌های از تغییرات پروفیل بستر پایین دست سرریز کلیدپیانویی مورد آزمایش را نمایش می‌دهد. نتایج نشان داد با شروع آزمایش، مصالح بستر از حالت سکون شروع به حرکت نموده و فرسایش در پایین دست سرریز صورت گرفته است. بیشترین گستردگی حفره آبشستگی پایین دست سرریز به طور کلی در بازه‌ی 0 تا 50 سانتیمتری از پنجه سرریز به وقوع پیوسته است که بسته به شرایط هیدرولیکی جریان و قطر مصالح بستر، این بازه تغییر میکند. همانطور که مشاهده میشود آبشستگی بلافاصله از زیر کلیدهای سرریز و علی-الخصوص کلیدهای خروجی سرریز شروع شده و در انتهای کانال تغییرات قابل ملاحظه‌ای در بستر رخ نداده است و رسوبات جدا شده از حفره‌ی آبشستگی، در پایین دست آن بر روی هم انباشته میشوند.



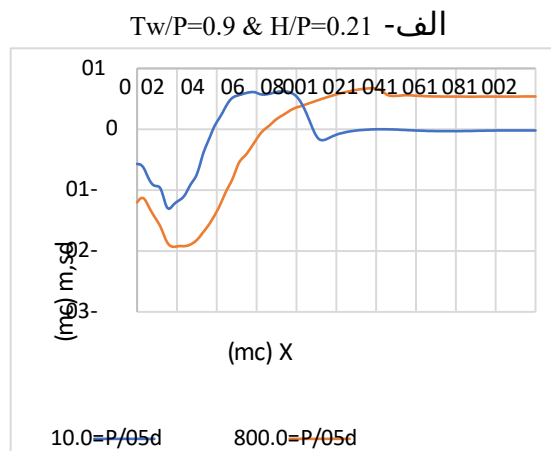
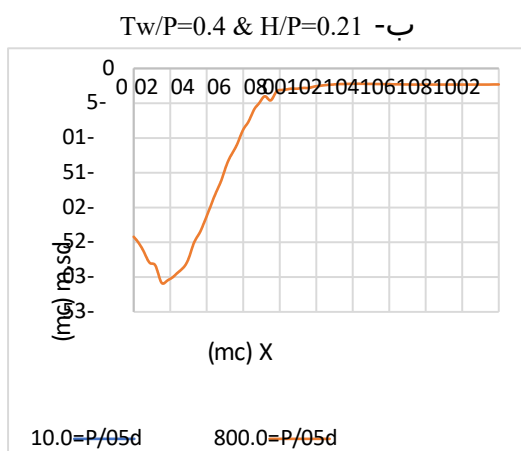
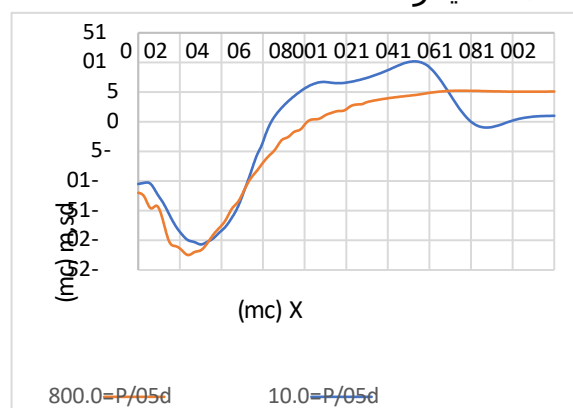
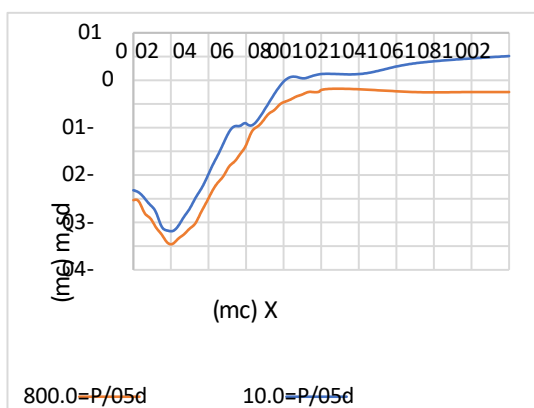
ب

الف

شکل 3- نمونه‌های از تغییرات پروفیل بستر در: (الف) پلان و (ب) نمای جانبی حفره

آبشستگی

شکل 4 پروفیل طولی و شکل 5 پروفیل عرضی تحت تاثیر قطر متوسط ذرات رسوبی بر بیشینه عمق آبشستگی را در دبیها و اعماق پایاب متفاوت بررسی میکند. این نمودارها در فواصل معین از ابتدای کانال در عمیقترین نقطه از نظر عمق آبشستگی رسم شدهاند. همانگونه که مشخص است ذرات ریزدانه ($d_{50}/P=0.008$) آبشستگی بیشتری ایجاد میکنند. در شکل 4-ب که مربوط به بیشترین دبی و کمترین عمق پایاب است، بیشترین عمق آبشستگی مشاهده میشود با توجه به دلایلی که در ادامه ذکر میشود این مورد قابل توجه است. با افزایش دبی سرعت برشی جریان افزایش مییابد، همچنین در عمق پایاب کمتر انرژی جت کمتر مستهلک میشود لذا بیشینه عمق پایاب در این مورد رخ داده است. در این حالت با افزایش 20 درصدی قطر متوسط ذرات رسوبی، بیشینه عمق آبشستگی حدود 8 درصد کاهش یافته است. در شکل 4-الف و ب اختلاف بیشینه عمق آبشستگی در دو حالت با قطر متوسط ذرات رسوبی متفاوت کمتر از شکل 4-ج و د مشاهده میشود. در شکل 4-ج بیشینه عمق آبشستگی در آزمایشی که از مصالح با قطر متوسط کوچکتر استفاده شده است 35 درصد بیشتر از آزمایش مشابه با قطر متوسط درشتتر گزارش میگردد. در این حالت بیشترین اختلاف در بیشینه عمق آبشستگی و همچنین بیشترین اختلاف حداکثر ارتفاع پشته رسوبی در آزمایش با دو قطر متوسط ذرات استفاده شده به میزان حدود 7 سانتیمتر مشاهده میگردد.

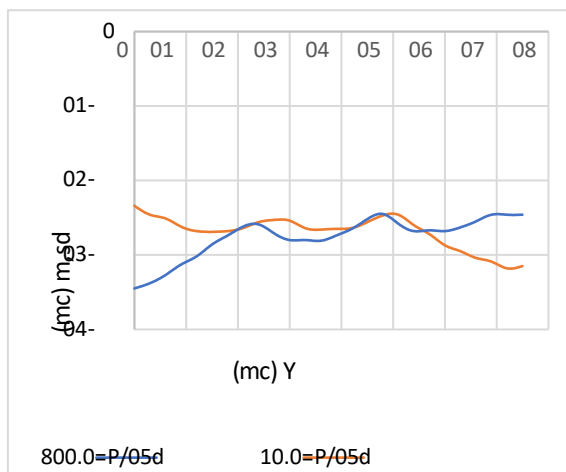


د- $T_w/P=0.4$ & $H/P=0.16$

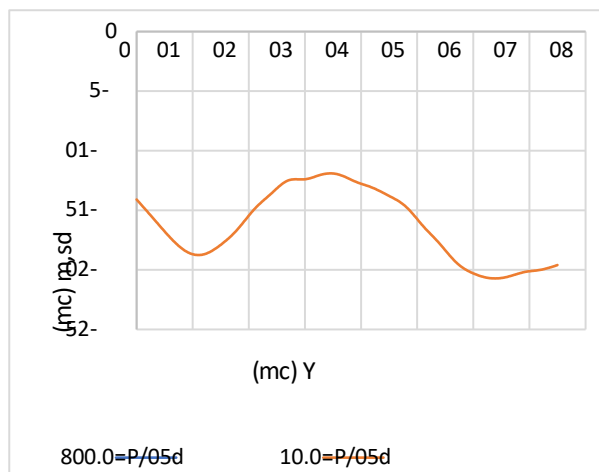
ج- $T_w/P=0.9$ & $H/P=0.16$

شکل 4- نمونه‌های از اثر متغیرهای موثر بر پروفیل طولی آبشستگی

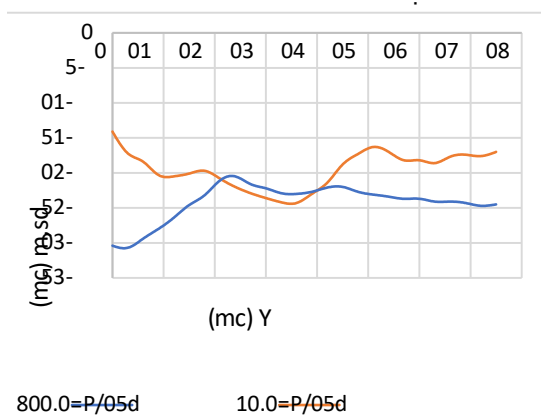
در شکل 5 مشخص میشود که پروفیل آبشستگی در عرض کانال متغیر است. حمیدفر و همکاران (1389) دلیل غیریکنواختی پروفیل در عرض حفره را به آشفته بودن جریان در پایاب و تصادفی بودن بردارهای سرعت در این ناحیه نسبت دادند. با بررسی شکل 5، تاثیر قطر متوسط دانههای رسوبی بر مشخصات آبشستگی مشخص میگردد. در مصالح رسوبی با نسبت $d_{50}/P=0.008$ عمق آبشستگی بیشتر مشاهده میشود. به طور کلی اختلاف عمق آبشستگی در آزمایش با قطرهای متفاوت رسوب در کناره دیواره کانال بیشتر از میانه کانال میباشد. بیشترین مقدار بیشینه عمق آبشستگی در کناره دیواره مربوط به آزمایش در شرایط $T_w/P=0.4$ & $H/P=0.21$ است که در شکل 5-ب نشان داده شده است. زیرا پارامتر بیعد (H/P) در بیشترین حالت و پارامتر بیعد عمق پایاب (T_w/P) در کمترین مقدار است. با افزایش عمق پایاب ضخامت تیغهی ریزشی جریان افزایش و سرعت آن کاهش مییابد برآیند این موضوع به همراه اثر کاهندهی عمق پایاب در مومنتم ورودی منجر به کاهش عمق آبشستگی میشود. بر اساس شکل 5-د بیشینه عمق آبشستگی در آزمایشی که مصالح با قطر درشتتر استفاده شده است حدود 53 درصد کمتر از آزمایش مشابه با قطر مصالح ریزتر میباشد. این حالت بیشترین اختلاف برای بیشینه عمق آبشستگی در عرض کانال نسبت به دو قطر مصالح استفاده شده است.



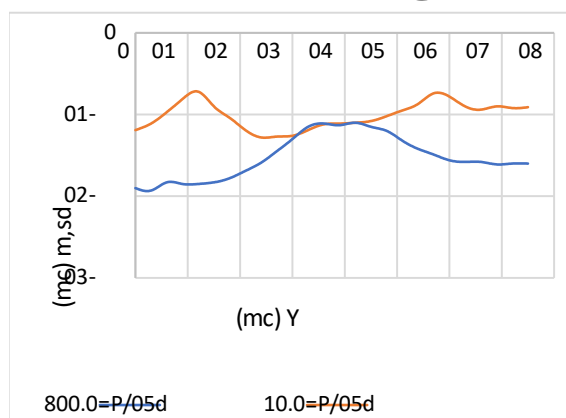
ب- $T_w/P=0.4$ & $H/P=0.21$



الف- $T_w/P=0.9$ & $H/P=0.21$



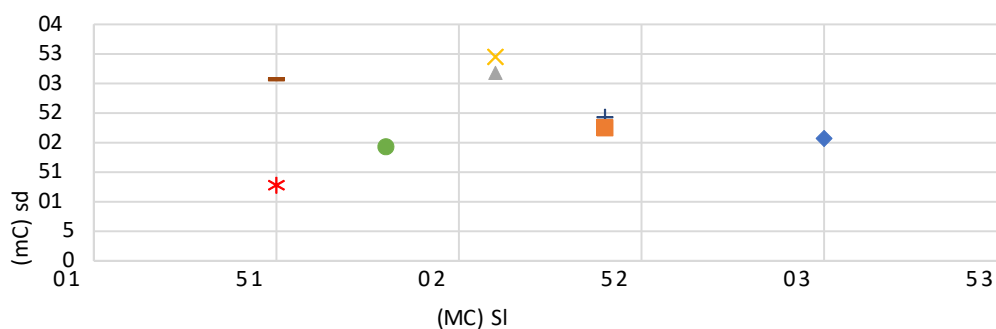
د- $T_w/P=0.4$ & $H/P=0.16$



ج- $T_w/P=0.9$ & $H/P=0.16$

شکل 5- نمونههای از اثر متغیرهای موثر بر پروفیل عرضی آبشستگی

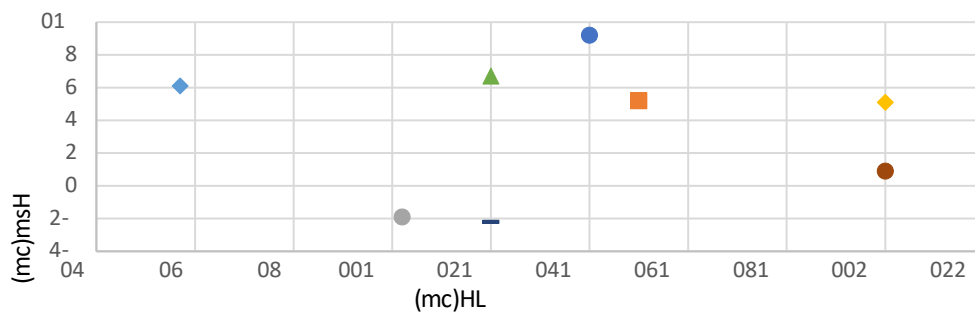
طبق شکل 6 موقعیت بیشینه عمق آبشستگی L_s در آزمایش با $d_{50}/P=0.01$ ، $T_w/P=0.9$ و $H/P=0.21$ رخ داده است. کمترین طول آبشستگی در شرایط $T_w/P=0.4$ و 0.9 و $H/P=0.16$ اتفاق افتاده است که کمترین عمق آبشستگی را نیز شامل می‌گردد. بیشینه عمق آبشستگی مربوط به آزمایش با $T_w/P=0.4/50$ ، $P=0.008$ و $H/P=0.21$ است. با توجه به اینکه با افزایش دبی، سرعت برشی جریان افزایش می‌یابد و همچنین به دلیل کمتر مستهلک شدن انرژی جنبشی جت در پایابهای کمتر، بیشینه عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. با در نظر گرفتن سه پارامتر موثر بر ابعاد حفره رسوبی، ابعاد طول حفره تا 50 درصد و عمق حفره تا حدود 63 درصد متغیر است.



.0=P/wT,10.0=P/05d	12.0=P/H,9.0=P/wT,800.0=P/05d
.0=P/wT,10.0=P/05d	12.0=P/H,4.0=P/wT,800.0=P/05d
.0=P/wT,10.0=P/05d	61.0=P/H,9.0=P/wT,800.0=P/05d
.0=P/wT,10.0=P/05d	61.0=P/H,4.0=P/wT,800.0=P/05d

شکل 6- تغییرات موقعیت بیشینه عمق آبشستگی در مقابل بیشینه عمق آبشستگی

طبق شکل 7 بیشینه تراز رسوبگذاری در شرایط $d_{50}/P=0.01$ ، $T_w/P=0.9$ ، $H/P=0.21$ رخ داده است. کمترین طول پشته رسوبگذاری در جریان با مشخصات $d_{50}/P=0.01$ ، $T_w/P=0.9$ و $H/P=0.16$ اتفاق افتاده است. موقعیت حداکثر تراز رسوبگذاری در بیشترین حالت مشترک در جریان با مشخصات $d_{50}/P=0.01$ ، $T_w/P=0.4$ ، $H/P=0.21$ و $d_{50}/P=0.01$ ، $T_w/P=0.4$ ، $H/P=0.21$ رخ داده است. با ثابت بودن دو پارامتر دبی و عمق پایاب بی بعد به بررسی اثر قطر مصالح بر مشخصات پشته رسوبگذاری پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش 20 درصدی قطر متوسط ذرات رسوبی، حداکثر تراز رسوبگذاری در بیشترین حالت حدود 43 درصد افزایش و موقعیت حداکثر تراز رسوبگذاری 52 درصد کاهش می‌یابد.



$10.0=P/wT, 10.0=P/0.5d$ $12.0=P/H, 9.0=P/wT, 800.0=P/0.5d$
 $0=P/wT, 800.0=P/0.5d$ $12.0=P/H, 4.0=P/wT, 10.0=P/0.5d$
 $10.0=P/wT, 10.0=P/0.5d$ $61.0=P/H, 9.0=P/wT, 800.0=P/0.5d$
 $0=P/wT, 800.0=P/0.5d$ $61.0=P/H, 4.0=P/wT, 10.0=P/0.5d$

شکل 7- تغییرات موقعیت حداکثر تراز رسوبگذاری در مقابل حداکثر تراز رسوبگذاری

نتیجه‌گیری

در این تحقیق آزمایشگاهی با در نظر گرفتن سه پارامتر موثر بر ابعاد حفره آبشستگی، اعم از پارامتر بی بعد عمق جریان (H/P)، پارامتر بی بعد عمق پایاب (T_w/P) و قطر مصالح بستر به بررسی مشخصات حفره آبشستگی پرداخته شد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش 20 درصدی قطر متوسط ذرات رسوبی، بیشینه عمق آبشستگی تا حدود 35 درصد کاهش می‌یابد. بیشینه عمق آبشستگی در جریان با مشخصات دبی بالا، عمق پایاب کم و دانه بندی ریزتر گزارش می‌شود. همچنین بیشینه عمق آبشستگی در آزمایشی که مصالح درشتتر استفاده شده است حدود 53 درصد کمتر از آزمایش مشابه با مصالح ریزتر می‌باشد. بیشینه طول آبشستگی در جریان با مشخصات $d_{50}/P=0.01$ ، $T_w/P=0.9$ و $H/P=0.21$ رخ داده است. با توجه به سه پارامتر موثر بر ابعاد حفره رسوبی و ایجاد شرایط مختلف جریان، ابعاد طول حفره تا 50 درصد و عمق حفره تا حدود 63 درصد تغییر می‌یابد. بیشینه تراز رسوبگذاری در شرایط $d_{50}/P=0.01$ ، $T_w/P=0.9$ ، $H/P=0.21$ رخ داده است و موقعیت حداکثر تراز رسوبگذاری در بیشترین حالت مشترکاً در جریان با مشخصات $d_{50}/P=0.01$ ، $T_w/P=0.4$ ، $H/P=0.21$ و $d_{50}/P=0.01$ ، $T_w/P=0.4$ رخ داده است. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش 20 درصدی قطر متوسط ذرات رسوبی، حداکثر تراز رسوبگذاری در بیشترین حالت حدود 43 درصد افزایش و موقعیت حداکثر تراز رسوبگذاری 52 درصد کاهش می‌یابد.

منابع

Ahmadi Dehrashid, F. and Gohari, S. (2016). Investigating the effect of discharge and tailwater depth on the dimensions of score hole downstream of a Piano Key Weir. International Conference on Civil Engineering, Tehran. (In Persian)

- Barcouda, M., Cazaillet, O., Cochet, P., Jones, B.A., Lacroix, S., Laugier, F., Odeyer, C. and 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.
- Ghafouri, A., Ghodsian, M., and Abdi, C. (2020). Experimental Study on the Effect of Discharge and Tailwater Depth on Bed Topography Downstream of a Piano Key Weir. *Journal of Hydraulics*, 15(3), 107-122. (In Persian)
- Hager, W. H. (2006). *Review of Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators* by RM Khatsuria: Marcel Dekker, New York, 2005; ISBN 0-8247-5789-0; 649 pp. Price: \$199.95/£ 115.
- Hien, T.C., Son, H.T. and 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), 581–596.
- Jüstrich, S., Pfister, M. and Schleiss, A.J. (2016). Mobile riverbed scours downstream of a piano key weir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(11), 04016043.
- Khassaf, S.I. and Al-Baghdadi, M.B. (2015). Experimental study of non-rectangular piano key weir discharge coefficient. *International Journal of Energy and Environment*, 6(5), 425-436.
- Kumar, B., and Ahmad, Z. (2020). Experimental study on scour downstream of a piano key weir with nose. 8th IAHR ISHS 2020.
- Lempérière, F., Vingny, J. P., and Ouamane, A. (2011, May). General comments on Labyrinth and Piano Key Weirs: The past and present. In *proceedings of the International Conference Labyrinth and Piano Key Weirs* (pp. 17-24).
- Mehboudi, A., Attari, J., Seyed Abbas Hosseini, S.A. and Jalili Ghazizadeh, M.R. (2014). Experimental study comparing Piano Key weir with artillery and linear Weirs, 13th Iranian Hydraulic Conference November 2014, University of Tabriz, Iran. (In Persian).
- Moradi, S. Shamsavari, H. and Esmaili, K. (2020). Investigate Foundation Local Scour Type-A Piano Key Weirs with Zigzag Sidewall, Iranian Hydraulic Association *Journal of Hydraulics*, 15(4), 81-94. (In Persian)
- Soler, J., Gamazo, P., Rodellar, J., & Gómez, M. (2015). Operation of an irrigation canal by means of the passive canal control. *Irrigation science*, 33(2), 95-106.
- Vischer, D., Hager, W. H. (1998). *Dam hydraulics* (Vol. 2). Chichester, UK: Wiley.
- Yazdi, A., Hosseini, S. A., Nazari, S., and Amanian, N. (2020). Comparison of Downstream Scour of the Rectangular and Trapezoidal Piano Key Weirs. *Journal of Hydraulics*, 15(2), 95-112. (In Persian)
- Hamidifar, H., Omid, M.H., and Nasrabadi, M. (2010). Local scouring at bed sill downstream of slide gates. *Journal of Water and Soil*, 24(4), 728-736. (In Persian)

Effect of inlet flow conditions and bed material diameter on downstream scour of type A trapezoidal piano key weir: Experimental Study

Sara Kazerooni¹ Chonoor Abdi Chooplou² and Masoud Ghodsian²

M.Sc. Student, Water and Hydraulic Structures Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Ph.D. Candidate, Water and Hydraulic Structures Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Prof., Faculty of Civil and Environmental Engineering, and Water Engineering Research Center, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Abstract

One of the important topics in the field of river engineering issues is the prediction and control of erosion near hydraulic structures, which has the potential to jeopardize the safety of these structures. In general, the downstream flow of hydraulic structures, such as the flow from weirs, is in the form of a falling jet. This jet creates a local scour around these structures, which if developed into the substructure, will cause its destruction. For the correct design of hydraulic structures, it is necessary for engineers to have a thorough study and full understanding of scouring and its mechanism so that they can consider the necessary arrangements for the stability of these structures. Today, due to the advantages of long crest wires, especially piano key weir, these types of weirs are used as a suitable option instead of straight crest wires. Since wires are structures that are exposed to the scouring phenomenon, it is important to know the downstream scouring status of this structure. In this study, the effect of changes in flow depth, tail water depth and bed materials diameter on the characteristics of the downstream scour cavity of type A trapezoidal piano key wire has been investigated. The results of this study showed that with a 20% increase in the average diameter of sediment particles, the maximum scour depth decreased by 35%, the maximum sedimentation level increased by about 43% and the position of the maximum sedimentation level decreased by 52%.

Keywords: Scouring, Piano Key Weir, Inlet Flow Conditions, Granulation of Materials