



دانشگاه گواران و منابع طبیعی

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و ششم، شماره اول، ۱۳۹۸

<http://jwsc.gau.ac.ir>

۹۱-۱۰۹

بررسی آزمایشگاهی آبشستگی پایین دست سرریز کلید پانویی

فریبا احمدی دهرشید^۱ و *سعید گوهری^۲

^۱دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی آب، گرایش سازه‌های آبی، دانشگاه بوعلی سینا،

آستادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۱/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۹/۱۱

چکیده

سابقه و هدف: سرریزها سازه‌های هیدرولیکی ساده و پرکاربردی در انتقال آب و کانال‌های آبیاری و زهکشی هستند که برای اندازه‌گیری میزان جریان، عبور آب اضافی ناشی از سیلاب سدها و کنترل سطح آب مخزن استفاده می‌شوند. سرریزهای کلید پانویی شکل جدیدی از سرریزهای با تاج طولانی هستند که می‌توانند با ایجاد طول بیشینه تاج سرریز در عرض محدود به عبور بهتر جریان کمک کنند. این سازه‌ها با شکل جدیدی از تاج سرریز، با کارایی بالا سازه‌های اقتصادی هستند. به دلیل مزیت‌های این سرریز لزوم مطالعه و پژوهش روی آبشستگی پایین دست این سرریز احساس می‌شود. آبشستگی در مجاورت سازه می‌تواند تأثیر مستقیمی بر پایداری سازه داشته باشد. به همین دلیل، پیش‌بینی شکل و ابعاد حفره آبشستگی در پایین دست این سازه‌ها مورد توجه پژوهشگران بوده است. در این پژوهش آبشستگی پایین دست سرریز کلید پانویی مورد مطالعه قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها: برای مطالعه آبشستگی در پایین دست سرریزهای کلید پانویی، از دو مدل فیزیکی با ۵ و ۹ کلید از این نوع سرریز برای انجام آزمایش‌هایی تحت شرایط هیدرولیکی مختلف استفاده شده است. آزمایش‌ها در فلومی به طول ۱۰ متر و عرض و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر انجام شده است. همچنین برای مقایسه میزان آبشستگی در سرریزهای کلید پانویی نسبت به سرریزهای خطی، آبشستگی پایین دست یک مدل سرریز لبه‌تیز با ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر و عرض ۵۰ سانتی‌متر به‌ازای شرایط هیدرولیکی متناظر با سرریزهای کلید پانویی نیز مطالعه شده است. بعد از برقراری تعادل، میزان آبشستگی در پایین دست این سرریزها مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از عمق سنج نقطه‌ای با دقت یک میلی‌متر که در بالای کانال نصب شده، ابعاد چاله فرسایشی اندازه‌گیری شده است. بررسی تأثیر عدد فرود ذره بر روی میزان حداکثر عمق آبشستگی و محل وقوع آن مورد مطالعه قرار گرفته است.

یافته‌ها: نتایج نشان می‌دهد که در سرریزهای کلید پانویی با افزایش طول مؤثر سرریز، عمق آب روی سرریز کاهش یافته و با کاهش سرعت برخورد جریان با بستر پایین دست سرریز مقدار عمق آبشستگی نیز کاهش می‌یابد. پروفیل آبشستگی در عرض کانال متغیر و به صورت سه‌بعدی می‌باشد. نرخ افزایش عمق حفره وابسته به تعداد

* مسئول مکاتبه: s.gohari@basu.ac.ir

کلیدهای سرریز نیز می‌باشد، یعنی به‌ازای یک عدد فرود ثابت و عمق پایاب ثابت، با افزایش تعداد کلیدهای سرریز، حداکثر عمق حفره و محل وقوع حداکثر عمق آب‌شستگی و حداکثر گسترش طول حفره آب‌شستگی نیز افزایش می‌یابد. همچنین عمق آب‌شستگی در سرریزهای کلید پیاپویی کم‌تر از سرریزهای معمولی خطی می‌باشد. این کاهش مقدار آب‌شستگی در پایین‌دست این سرریزها حتی در عمق‌های پایاب کم نیز مشاهده شده است. کاهش عمق پایاب موجب افزایش حداکثر عمق آب‌شستگی و دور شدن محل وقوع حداکثر عمق آب‌شستگی از انتهای کف‌بند می‌شود. پروفیل حفره آب‌شستگی در سرریز کلید پیاپویی تقریباً مشابه سرریزهای خطی است و تنها تفاوت آن در ارتفاع تلماسه ایجادشده در پایین‌دست حفره می‌باشد. ارتفاع تلماسه ایجادشده در سرریز کلید پیاپویی حتی در عمق‌های پایاب زیاد کمتر از سرریز لبه‌تیز است و همچنین با افزایش عدد فرود ذره، پارامترهای حداکثر عمق آب‌شستگی و طول محل وقوع آن افزایش می‌یابند. حداکثر عمق آب‌شستگی در سرریز ۹ کلیدی در دبی‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۵ لیتر بر ثانیه به‌طور متوسط ۳۰/۷ درصد بیش‌تر از سرریز ۵ کلیدی و ۷ درصد کمتر از سرریز لبه‌تیز بوده است.

نتیجه‌گیری: در سرریزهای کلید پیاپویی کاهش عمق پایاب موجب افزایش حداکثر عمق آب‌شستگی و دور شدن محل وقوع حداکثر عمق آب‌شستگی از انتهای کف‌بند می‌شود. با افزایش عدد فرود ذره، مقدار حداکثر عمق آب‌شستگی، محل وقوع حداکثر عمق آب‌شستگی و حداکثر گسترش طول حفره آب‌شستگی، افزایش می‌یابند. نرخ افزایش عمق حفره وابسته به تعداد کلیدهای سرریز نیز می‌باشد و در یک عدد فرود و عمق پایاب ثابت، با افزایش تعداد کلیدهای سرریز، حداکثر عمق حفره و محل وقوع حداکثر عمق آب‌شستگی نیز افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: چاله آب‌شستگی، سرریز کلید پیاپویی، عدد فرود، عمق آب، مطالعه آزمایشگاهی

مقدمه

سازه نیز به‌طور دقیق صورت پذیرد. آب‌شستگی موضعی از موضوعات مهم در مهندسی رودخانه و هیدرولیک جریان در بسترهای آبرفتی است. اگر در یک بازه مورد بررسی، مقدار رسوب واردشده کم‌تر از مقدار رسوب خارج‌شده باشد، عمل فرسایش کف رودخانه و یا بدنه آن رخ می‌دهد و کف رودخانه به‌تدریج گود می‌شود. از جمله اثرات گودشدن بستر رودخانه، می‌توان به مختل شدن پرش هیدرولیکی در بالادست و انتقال پرش به پایین‌دست اشاره کرد. با افزایش گرادیان هیدرولیکی که در نهایت افزایش فشار بالابرنده و ایجاد پدیده تراوش را در پی دارد خطرات آب‌شستگی در سازه افزوده می‌شود. از این‌رو پدیده آب‌شستگی در سازه‌ها بسیار دارای اهمیت است و پیش‌بینی آن قبل از ساخت سازه امری

سرریزهای کلید پیاپویی شکل جدیدی از سرریزهای غیرخطی تاج طولانی هستند که توسط مؤسسه هیدروکووپ فرانسه و آزمایشگاه هیدرولیک و محیط‌زیست دانشگاه بیسکارا الجزایر در سال ۱۹۹۸ ارائه شده است. اندرسون و تولیس (۲۰۱۳) نشان دادند که اجرای این نوع سرریزها نسبت به سرریزهای کنگره‌ای، فضای کم‌تری نیاز داشته و بنابراین پی این نوع سرریزها می‌تواند ابعاد کوچک‌تری داشته باشد به‌نحوی که این مزیت باعث شده است تا بتوان از این نوع سرریز در تاج سدهای بتنی استفاده کرد (۱). در سدها به‌علت فشار هیدرواستاتیکی نسبتاً زیاد اعمالی از طرف آب موجود در مخزن بر این سازه لازم است علاوه بر کنترل شرایط هیدرولیکی، کنترل‌های پایداری

سیکل سرریز کلید پیاونوی ارائه نمودند. ارتفاع سرریز، عرض کلیدها و ارتفاع برآمدگی کلیدها از یک سیکل سرریز کلید پیاونوی ارائه نمودند (۱۰). صفر زاده و نوروزی (۲۰۱۵) با استفاده از مدل عددی سه بعدی، ساختار جریان بر روی سرریزهای کلید پیاونوی دوزنقه‌ای را مطالعه نموده و به بهبود مناسب ضریب دبی این نوع سرریزها در سرریزهای کلید پیاونوی مستطیلی و کنگره‌ای اشاره نمودند که در آن به اهمیت تاج کناری بر عملکرد هیدرولیکی سرریز تأکید شده است (۱۵).

تاکنون پژوهش‌های زیادی روی آب‌شستگی پایین دست بسترهای حفاظت‌شده صورت گرفته است. فرهودی و اسمیت (۱۹۸۵) به بررسی تشابه پروفیل‌های آب‌شستگی در پایین‌دست پرش هیدرولیکی پرداختند و گودال آب‌شستگی را بر حسب پروفیل‌های بی‌بعد ارائه کردند (۵). دی و سرکار (۲۰۰۶) تشابه گودال‌های آب‌شستگی در شرایط مختلف را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که تغییرات زمانی عمق آب‌شستگی به صورت رابطه‌ی نمایی است (۴). این پژوهشگران همچنین مشاهده کردند که در مقادیر زیاد اعداد فرود ذره، عمق تعادلی گودال آب‌شستگی مستقل از عدد فرود ذره است. بی و همکاران (۲۰۰۷) نقش ساختار جریان را بر گودال آب‌شستگی دویعدی بررسی کردند، بررسی‌های این پژوهشگران نشان داد که در طول توسعه گودال آب‌شستگی، ساختار مختلفی از جریان مشاهده می‌شود (۲). ساراتی و همکاران (۲۰۰۸) به بررسی آب‌شستگی ناشی از نازل مربعی دیواره‌ای و با استفاده از رسوبات با دو دانه‌بندی متفاوت به این نتیجه رسیدند که در مقادیر کم عمق پایاب، در الگوی جریان و در نتیجه در الگوی گودال آب‌شستگی تقارن مشاهده نمی‌شود (۱۷). سیفی و همکاران (۲۰۱۴) با بررسی آب‌شستگی پایین‌دست سرریز لبه‌پهن دو طرف شیب‌دار نشان

ضروری است. بی و همکاران (۲۰۰۷) نشان دادند که گسترش این پدیده می‌تواند عملکرد سازه را تحت تأثیر قرار داده و پایداری آن را به خطر اندازد. (۲). مطالعات محدودی بر روی سرریز کلید پیاونوی صورت گرفته است. نتایج پژوهش ماچیلز و همکاران (۲۰۱۱)، نشان داد که در ترازهای پایین، زیاد کردن تعداد دهانه‌های سرریز باعث افزایش کارایی سرریز می‌شود (۸). ریبریو و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از نتایج مدل‌های فیزیکی موجود یک معادله عمومی برای رابطه اشل - دبی این نوع سرریزها ارائه نمودند (۱۴). بر اساس نتایج این پژوهش‌ها ظرفیت این نوع سرریزها عمدتاً به هد آب روی سرریز، طول کل، ارتفاع کلیدهای ورودی و عرض جانبی آن بستگی دارد. فیستر و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی تأثیر انسداد بالادست بر میزان دبی عبوری در سرریزهای کلید پیاونوی در مواقع سیلاب پرداختند و میزان ارتفاع آب در بالادست و ابعاد موانع را مهم‌ترین عوامل مؤثر در انسداد معرفی نمودند. (۱۱). رجایی و همکاران (۲۰۱۸) با مطالعه آب‌شستگی در پایین‌دست سرریزهای کنگره‌ای کاهش ۱۹ درصدی میزان آب‌شستگی در پایین‌دست این نوع سرریزها را نسبت به سرریزهای خطی گزارش دادند (۱۲). همچنین شکل دوزنقه‌ای سرریز کنگره‌ای (در پلان) بهترین نوع سرریز برآورد شده است. جاستریچ و همکاران (۲۰۱۶) با بررسی آب‌شستگی در پایین‌دست سرریزهای کلید پیاونوی گزارش دادند که شیب بیشینه عمق آب‌شستگی در پایین‌دست سرریزهای کلید پیاونوی متأثر از زاویه ایستایی مصالح بستر است. همچنین ابعاد آب‌شستگی در سرریزهای کلید پیاونوی شباهت زیادی به آب‌شستگی در جریان‌های جت مانند دارد (۷). ماچیلز و همکاران (۲۰۱۴) به مطالعه پارامتریک جریان بر روی سرریزهای کلید پیاونوی پرداخته و روابطی را برای تعیین دبی عبوری از یک

دادند که کاهش عمق پایاب باعث گسترش طولی مشخصه‌های آب‌شستگی می‌شود (۱۶). بر اساس نتایج آزمایشگاهی حاصل از مطالعه حمیدی‌فر و امید (۲۰۱۴) آب‌شستگی رسوبات غیرچسبنده در پایین‌دست کف‌بند، تحت تأثیر عمق پایاب و عدد فرود ذره می‌باشد (۶). با وجود مطالعاتی که در این زمینه صورت گرفته، تاکنون آب‌شستگی پایین‌دست این سرریز مورد بررسی قرار نگرفته و اطلاعات جامعی درباره مشخصات پروفیل آب‌شستگی پایین‌دست این سرریز ارائه نشده است. از آنجاکه برای پیش‌بینی و کنترل آب‌شستگی که دربرگیرنده‌ی تمام حالت‌های ممکن باشد معیار کلی کم‌تری ارائه شده است، روابط تجربی و آزمایشگاهی بسیار کاربردی خواهند بود.

مواد و روش‌ها

تجهیزات آزمایشگاهی: به‌منظور انجام آزمایش‌های این مطالعه، از دو مدل سرریز کلید پیانویی استفاده شده است که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است. این مطالعه در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه بوعلی‌سینا، در فلومی به طول ۱۰ متر و عرض و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر انجام گرفت. ارتفاع کانال از کف آزمایشگاه ۱/۳ متر و شیب کف کانال ثابت و ۰/۰۰۱ است. این شیب در محدوده شیب‌های طبیعی و معمول در بررسی‌های آزمایشگاهی بوده است. معمول جنس کف کانال از ورق گالوانیزه و دیواره‌ها از شیشه می‌باشد. برای اندازه‌گیری دبی جریان از یک سرریز مثلثی لبه‌تیز کالیبره شده (خطای ± 0.1 لیتر بر ثانیه) با زاویه رأس ۹۰ درجه از در انتهای حوضچه پایین‌دست استفاده گردید. هم‌زمان از یک دبی‌سنج کالیبره شده که بر روی لوله جریان ورودی نصب شده،

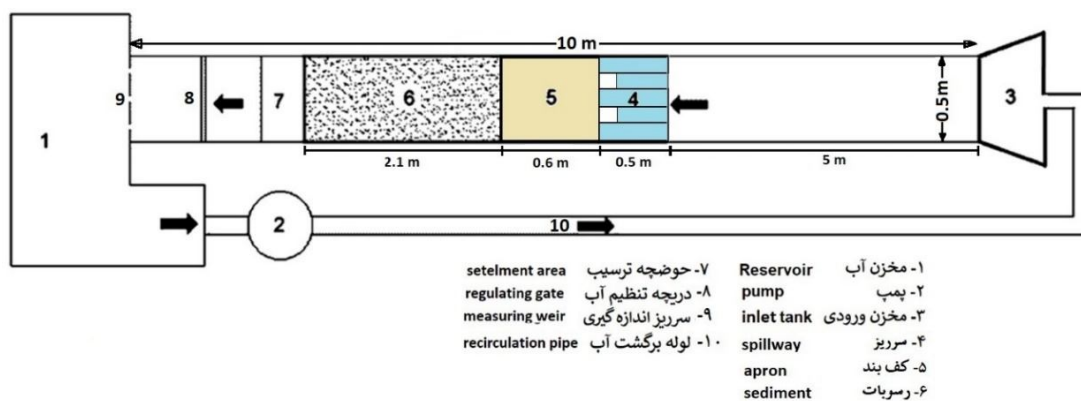
برای کنترل دبی استفاده شده است. همچنین، این فلوم در پایین‌دست مجهز به یک دریچه کشوی با قابلیت کنترل عمق پایاب می‌باشد. نمایی از فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در شکل ۱ آورده شده است. در پایین‌دست سرریز یک کف‌بند صلب به طول ۶۰ و عرض ۵۰ و ارتفاع ۱۷ سانتی‌متر قرار داده شد. عمق ۱۷ سانتی‌متر با توجه به آزمایش‌های اولیه و حداکثر عمق آب‌شستگی انتخاب شده است. طول کف‌بند طبق رابطه برادلی و پترکا (۱۹۵۷) بر اساس معیار طول پرش، تعیین شد (۳). به‌منظور تعیین میزان آب‌شستگی پایین‌دست سرریز کلید پیانویی از مصالح بستری با دانه‌بندی یکنواخت $d_{50}=1\text{mm}$ و انحراف معیار $\sigma_g = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}} = 1.3$ استفاده شده است. انتخاب این اندازه از دانه‌بندی با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاهی و همچنین افزایش پیچیدگی جریان در صورت انتخاب مصالح غیریکنواخت بوده است. به اینجای d_{84} و d_{16} به ترتیب قطر ذراتی است که ۸۴ و ۱۶ درصد ذرات از آن ریزتر بود. طول بستر قابل فرسایش پایین‌دست کف‌بند ۲۱۰ سانتی‌متر و عرض و عمق رسوبات به ترتیب ۵۰ و ۱۷ سانتی‌متر بوده و قبل از انجام آزمایش سطح مصالح کاملاً صاف می‌گردید. سپس همان آزمایش‌ها انجام شده بر روی سرریزهای کلید پیانویی را بر روی یک مدل سرریز لبه‌تیز با ارتفاع ۲۰ و عرض ۵۰ سانتی‌متر برای انجام مقایسه‌ای بین پروفیل و ابعاد حفره آب‌شستگی در سرریزهای خطی و غیرخطی انجام شد. طرح‌واره‌ای از حفره آب‌شستگی در پایین‌دست کف‌بند همراه با پارامترهای مشخصه حفره در شکل ۲ آورده شده است.

۹۴

جدول ۱- مشخصات مدل‌های سرریز مورد استفاده.

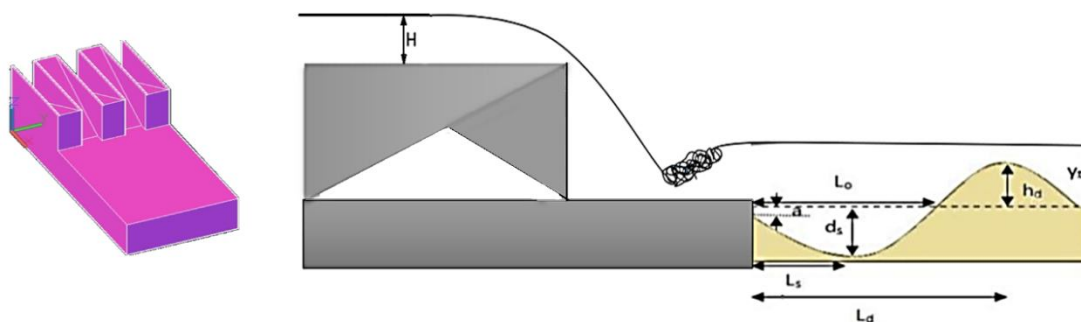
Table 1. Characteristics of used weir models.

سرریز لبه تیز sharp crested weir	مدل ۲ Model 2	مدل ۱ Model 1	مشخصات properties
-	9	5	تعداد کلیدها (N) Number of keys (N)
-	5.5	10	عرض کلیدهای ورودی و خروجی (cm) Input and output keys width (cm)
20	20	20	ارتفاع سرریز (cm) Weir height (cm)
50	50	50	عرض سرریز (cm) Weir width (cm)
1	1	1	ضخامت سرریز (mm) Weir Thickness (mm)



شکل ۱- تصویر کانال آزمایشگاهی.

Figure 1. Experimental flume scheme.

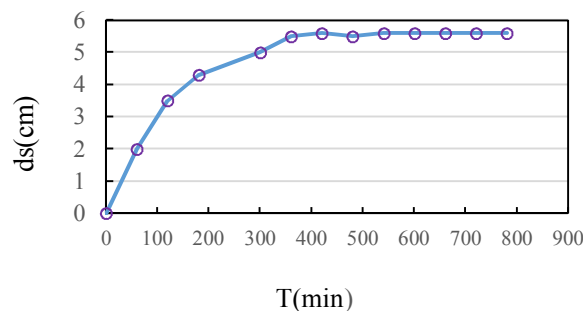


شکل ۲- طرح‌واره‌ای از سرریز کلید پیاپی با حفره آب‌شستگی و پارامترهای مشخصه آن.

Figure 2. Scheme of scour hole and related parameter.

را به‌وسیله شیر ورودی افزایش داده تا به دبی مطلوب (۱۰، ۱۵ یا ۲۰ لیتر بر ثانیه) برسد. پس از اطمینان از تثبیت دبی دریاچه پایین‌دست فلوم را به آهستگی باز نموده تا تراز سطح آب کاهش یافته و در عمق پایاب مورد نظر تثبیت شود. پس از تثبیت دبی و عمق پایاب در حد محاسبه شده، آزمایش شروع می‌شود و این شرایط آزمایش به مدت ۹ ساعت (زمان تعادل) ثابت نگه داشته می‌شود و خاتمه آزمایش زمانی است که انتقال ماسه‌ها از حفره ایجادشده به پایین‌دست تمام شود. ولی چون این اتفاق در زمان بیش‌تری رخ می‌دهد و در پژوهش‌های آزمایشگاهی باید زمانی را به‌عنوان زمان تعادل انتخاب کنیم که تفاوت ابعاد حفره در این حالت نسبت به گام زمانی بعدی ناچیز باشد (شکل ۳).

روش انجام آزمایش: بعد از ساخت کف‌بند و نصب مدل اول سرریز در داخل فلوم آزمایشگاهی و آب‌بندی کامل آن به‌وسیله چسب آکواریوم، ذرات رسوبی را به طول ۲۱۰ سانتی‌متر و هم‌ارتفاع با کف‌بند (۱۷ سانتی‌متر) را در پایین‌دست کف‌بند ریخته و به‌وسیله تسطیح‌کننده بستر کاملاً صاف و افقی و با فشار دست متراکم گردید. سپس در حالی که دریاچه انتهایی کاملاً بسته بود، شیرفلکه دبی ورودی را به مقدار کم باز نموده تا جریان آب به‌آرامی وارد فلوم شود. آب ورودی به فلوم در بالادست سرریز جمع شده و به‌تدریج از روی سرریز عبور کرده و به‌آرامی روی ماسه‌ها تجمع پیدا می‌کند، این عمل تا زمانی ادامه پیدا می‌کند تا ماسه‌ها و کف‌بند کاملاً مستغرق گردد. این عمل به‌دلیل این‌که مصالح شسته نشوند و خطای آزمایش کاهش یابد انجام می‌شود. سپس دبی



شکل ۳- نمودار توسعه زمانی حفره در ۱۲ ساعت.

Figure 3. Scour development chart in 12 hours.

پمپ خاموش و شیر خروجی باز می‌شد تا آب داخل فلوم کاملاً تخلیه گردد و بعد از زهکشی کامل بستر رسوبی، پروفیل آب‌شستگی در یک شبکه‌بندی مربعی شکل ۲×۲ سانتی‌متر در جهت طولی و عرضی کانال به‌وسیله عمق سنج لیزری (مدل لایکا K۸۱۰) با دقت ۱ میلی‌متر برداشت گردید. مراحل فوق برای مدل دوم سرریز کلید پیانویی و مدل سرریز لبه تیز برای مقایسه

در این آزمایش‌ها بیش‌ترین مقدار آب‌شستگی در همان زمان‌های اولیه (۳ ساعت اول) اتفاق می‌افتد. تغییرات در عمق آب‌شستگی به‌مرور کاهش یافته و بعد از مدتی به سمت صفر میل می‌کند. در این پژوهش زمان تعادل بعد از آزمایش‌های اولیه ۹ ساعت در نظر گرفته شده است. زمانی که آزمایش به اتمام رسید ابتدا دریاچه انتهایی فلوم را کاملاً بسته، سپس

Ψ (سای) (بر حسب متر) نمایانگر ابعاد حفره آب‌شستگی است. با استفاده از تئوری باکینگهام پارامترهای بی‌بعد مؤثر بر پدیده آب‌شستگی در پایین‌دست سرریز تعیین شدند:

$$\frac{\Psi}{H} = f_2 \left(\frac{q}{\sqrt{gH^3}}, \frac{Y_t}{H}, \frac{d_{50}}{H}, \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_s}, \frac{\mu}{\rho q}, \frac{W_i}{H}, N \right) \quad (3)$$

شرایط جریان در همه آزمایش‌ها آشفته است. با توجه به محدوده حداقل عمق (۰/۷ متر) و سرعت جریان (۰/۲۸ متر بر ثانیه) حداقل عدد رینولدز ۲۴۵۰۰ می‌باشد؛ بنابراین با توجه به آشفته بودن جریان عدد رینولدز از رابطه فوق حذف می‌شود. با ترکیب عدد فرود روی تاج سرریز، نسبت جرم واحد حجم ماسه به آب و نسبت اندازه ذرات به عمق آب روی تاج سرریز عدد فرود ذره حاصل شد و رابطه فوق به صورت زیر خلاصه می‌شود:

$$\frac{\Psi}{H} = f_3 \left(Fr_r, \frac{Y_t}{H}, Fr_d, \frac{W_i}{H}, N \right) \quad (4)$$

که در آن، Fr_d عدد فرود ذره یا عدد پایداری نامیده می‌شود و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Fr_d = \frac{V}{\sqrt{gd_{50} \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right)}} \quad (5)$$

که در آن، V سرعت جریان، g شتاب ثقل، d_{50} اندازه متوسط ذرات، ρ_s ، ρ_w به ترتیب جرم مخصوص آب و ماسه می‌باشند. میزان و نحوه وابستگی بین پارامترها در روابط فوق را به کمک داده‌های آزمایشگاهی می‌توان تعیین نمود.

میزان آب‌شستگی تا در پایین‌دست دو نوع سرریز انجام شد و در مجموع ۱۵ آزمایش آب‌شستگی انجام شد.

تحلیل ابعادی: پارامترهای مؤثر بر ابعاد آب‌شستگی در سرریز کلید پیاپی را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$f(q, Y_t, H, P, L, N, W_i, W_o, S_i, S_o, L_b, W, T, \rho_w, \rho_s, g, \mu, d_{50}, d_s, L_s, L_o, h_d, L_d) = 0 \quad (1)$$

که در آن، q دبی جریان در واحد عرض سرریز، Y_t عمق پایاب، H ارتفاع آب روی سرریز، L و N و P به ترتیب طول جانبی سرریز، تعداد کلیدها و ارتفاع سرریز، W_i و W_o عرض دهانه‌های ورودی و خروجی سرریز، W عرض کل سرریز، S_i و S_o شیب کلیدهای ورودی و خروجی، T زمان تعادل، L_b طول کف‌بند، g شتاب ثقل، μ لزجت دینامیکی آب، و d_s ، L_s ، L_o ، d_o ، L_d ، h_d به ترتیب جرم مخصوص ماسه، جرم مخصوص آب، محل وقوع حداکثر عمق آب‌شستگی، حداکثر گسترش حفره، حداکثر عمق آب‌شستگی، فاصله پشته از انتهای کف‌بند و ارتفاع پشته و d_{50} قطر ذرات رسوب می‌باشد.

با توجه به این‌که هدف از این پژوهش بررسی پارامترهای مذکور در حالت تعادل آب‌شستگی است، عامل زمان تعادل و پارامترهای ثابت از رابطه ۱ حذف می‌شوند و چون در هر دو مدل عرض کلیدهای ورودی و خروجی با هم برابر است پس فقط عرض کلید ورودی را در معادله‌ها وارد می‌شود. پس رابطه ۱ را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$\psi = f_1(q, Y_t, H, N, W_i, \rho_s, \rho_w, g, d_{50}, \mu) = 0 \quad (2)$$

جدول ۲- محدوده تغییرات پارامترهای بدون بعد در رابطه ۴.

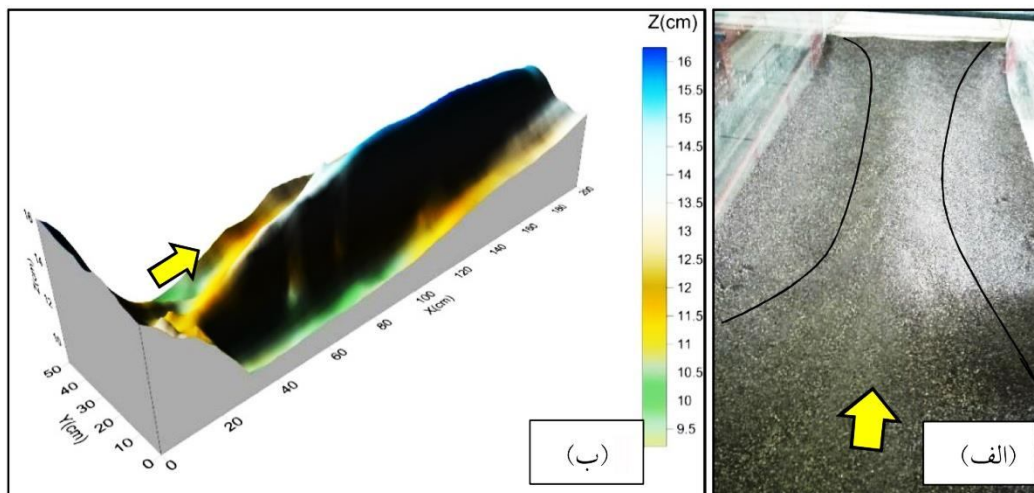
Table 2. Parameter Ranges of equation 4.

نوع پارامتر Parameter type	Fr	$\frac{Y_t}{H}$	Fr _d	$\frac{W_i}{H}$	N
محدوده تغییرات Parameter Ranges	0.2-0.4	6.3-10	1.47-2.35	2.75-14.3	5-9

نتایج و بحث

مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که در سرریزهای کلید پیاپایی دو نوع جریان غالب وجود دارد: کلید ورودی جریان‌های نزدیک‌شونده را به سمت خود کشیده و مشابه سرریزهای لبه‌تیز با بدنه شیب‌دار جریان از روی تاج ورودی به صورت ریزشی به سمت پایین دست تخلیه می‌شود. الگوی دوم بر روی کلیدهای خروجی شکل می‌گیرد. در این بخش، جریان عبوری از روی تاج خروجی، مشابه یک جت به سمت پایین دست بخش شیب‌دار کلید تخلیه می‌شود. جریان خروجی از کلید ورودی به سطح کف‌بند در پایین دست برخورد نموده و با توجه به عمق پایاب موجود، به صورت چرخش سطحی (در عمق پایاب کم) و اغتشاش سطحی (در عمق پایاب زیاد) ظاهر می‌شود در مطالعات لمپریه و اومان (۲۰۰۳) نیز به الگوی جریان مشابه اشاره شده است (۸). بخش کمی از جریان نیز به سمت پایین دست منحرف شده و پس از برخورد با سطح کف‌بند، ناحیه چرخشی ضعیفی در زیر کلید ورودی ایجاد می‌کند. الگوی جریان بر روی کلید خروجی بسیار پیچیده‌تر از کلید ورودی است. در این بخش از سرریز به خاطر تلاقی جریان ناشی از جت‌های ریزشی از تاج‌های

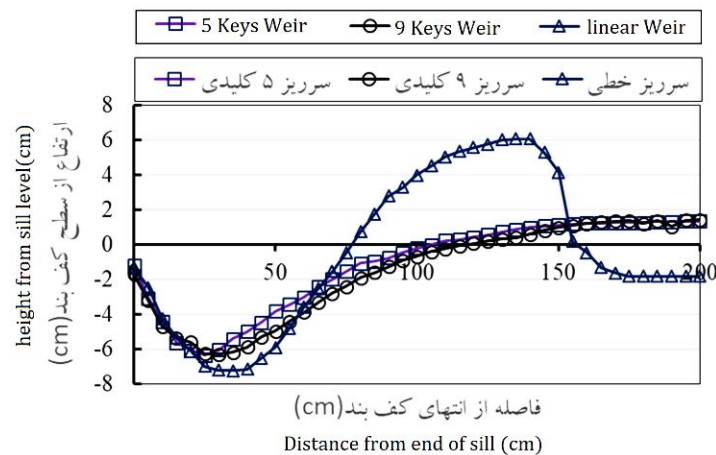
کناری با جریان خروجی بالادست، بالازدگی سطح آب رخ داده و زمانی که جریان خروجی به صورت یک جت ریزشی وارد ناحیه کف‌بند شده، ناحیه چرخشی شدید در مقابل کلید خروجی شکل می‌گیرد. به همین دلیل رسوباتی از بستر که در مقابل کلید خروجی قرار گرفته بیش‌تر شسته می‌شوند و از کناره‌ها کنده شده و در وسط بستر روی هم انباشته می‌شوند. در پایین دست کف‌بند جریان عبوری از روی بستر رسوبی باعث آب‌شستگی بستر می‌شود. محل شروع آب‌شستگی بلافاصله در محل اتصال کف‌بند به رسوبات می‌باشد. با گذشت زمان جریان ابعاد چاله بزرگ‌تر شده و جت عبوری در داخل این گودال به صورت جریان چرخشی درمی‌آید که با تعلیق بخشی از رسوبات به انتقال آن‌ها به پایین دست کمک می‌کند. همچنین این جریان گردابی باعث انتقال بخشی از رسوبات از قسمت شیب‌دار مثبت چاله به قسمت شیب‌دار منفی می‌شود. مقدار شیب در چاله فرسایشی در قسمت رو به پایین از قسمت رو به بالا بیش‌تر است. به شکل ۴ آب‌شستگی ایجاد شده توسط سرریز کلید پیاپایی ۵ کلیدی را که توسط نرم‌افزار تک پلات ترسیم شده را نشان می‌دهد.



شکل ۴- الگوی آب‌شستگی (الف) پروفیل ایجادشده در آزمایشگاه (ب) ترسیم نمای سه‌بعدی پروفیل آزمایشگاهی در نرم‌افزار Surfer.
Figure 4. Scouring pattern (A) Profile formed in the laboratory (B) Drawing the three-dimensional profile in Surfer software.

پیانویی با ۵ کلید کم‌تر از سرریز کلید پیانویی با ۹ کلید می‌باشد و در سرریز لبه‌تیز از هر دو مدل سرریز کلید پیانویی حداکثر عمق آب‌شستگی بیش‌تر است. محل وقوع حداکثر عمق آب‌شستگی در سرریز لبه‌تیز در فاصله دورتری از کف‌بند نسبت به دو مدل سرریز کلید پیانویی قرار دارد و در مدل ۹ کلیدی نیز محل وقوع حداکثر عمق آب‌شستگی از مدل ۵ کلیدی از انتهای کف‌بند دورتر است. در کل می‌توان گفت مقدار آب‌شستگی در سرریز ۵ کلیدی کم‌تر از ۹ کلیدی و این مقدار در هر دو مدل کلید پیانویی کم‌تر از سرریز لبه‌تیز است. علت این پدیده را می‌توان در مقدار انرژی تخلیه‌شده جریان بر روی کف‌بند افقی دانست. در سرریز خطی مقدار کم‌تری از انرژی جریان بر روی کف‌بند از بین رفته و این جریان می‌تواند در پایین‌دست با برخورد به بستر رسوبی آب‌شستگی بیش‌تری را به همراه داشته باشد. هر چند این اختلاف در سرریز ۵ و ۹ کلیدی ناچیز است. ارتفاع تلماسه نیز در سرریز لبه‌تیز بیش‌تر از هر دو مدل سرریز کلید پیانویی است.

مقایسه پروفیل‌های طولی آب‌شستگی: بعد از تنظیم دبی و عمق پایاب، پرش هیدرولیکی (با حداقل عدد فرود ۱/۲ قبل از پرش) روی کف‌بند رخ داده و جریان ریزشی کلید خروجی باعث ایجاد گردابه‌هایی می‌شود. این گردابه‌هایی باعث می‌شود ذراتی که در نزدیکی کف‌بند قرار داشتند بلافاصله جابجا شوند، به‌طوری‌که بخش زیادی از عمق تعادلی آب‌شستگی در همان دقایق اولیه حاصل شد. در نقاط عمیق گودال آب‌شستگی، گردابه‌هایی در نزدیکی بستر مشاهده می‌شدند که دارای قدرت کافی برای جدا کردن ذرات بستر و معلق شدن آن‌ها در جریان بودند. به‌نظر می‌رسید گردابه‌های حاصل از جت ریزشی کلید خروجی نقش مهمی در انتقال رسوبات داشته باشند. پروفیل‌های آب‌شستگی در سرریزهای مختلف در شرایط هیدرولیکی یکسان دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه و عمق پایاب ۱۳/۵ سانتی‌متر در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به نمودار رسم شده می‌توان گفت که مقدار آب‌شستگی در هر سه مدل سرریز در فاصله نزدیک به کف‌بند با هم تقریباً برابر می‌باشند ولی مقدار حداکثر عمق آب‌شستگی در سرریز کلید

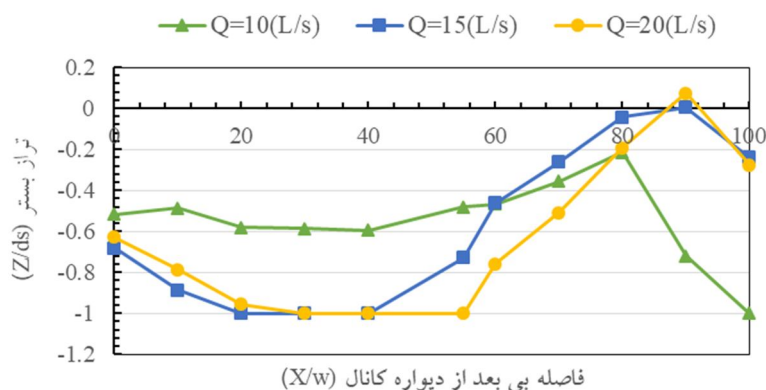


شکل ۵- پروفیل‌های طولی آب‌شستگی در هر سه مدل سرریز.

Figure 5. Longitudinal profiles in three weir models.

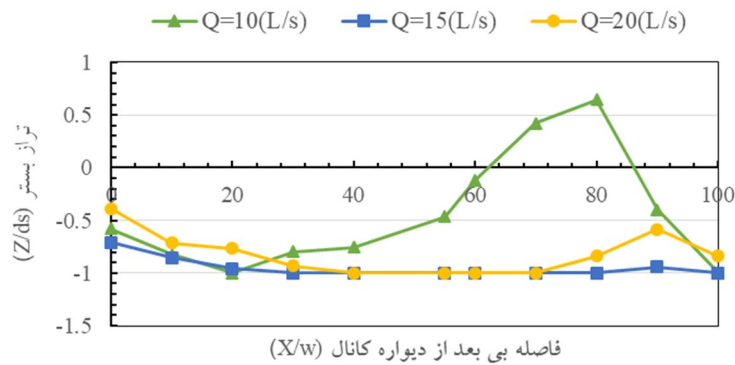
را نام برد. متغیر بودن پروفیل آب‌شستگی در عرض کانال، در مطالعات بعضی پژوهشگران مانند (حمیدی‌فر و همکاران، ۲۰۱۴) و (موسوی خندان، ۲۰۰۲) نیز گزارش شده است. آن‌ها دلیل غیریکنواختی پروفیل در عرض حفره را به آشفته بودن جریان در پایاب و تصادفی بودن بردارهای سرعت در این ناحیه نسبت دادند. شکل (۶ تا ۸) پروفیل آب‌شستگی در عرض کانال در هر دو مدل سرریز کلید پیاپویی و سرریز لبه‌تیز در دبی‌های مختلف و عمق پایاب‌های مختلف را نشان می‌دهد.

بررسی پروفیل‌های عرضی آب‌شستگی در پایین‌دست سرریزهای کلیدهای پیاپویی و لبه‌تیز: با توجه به آزمایش‌های انجام‌شده در این پژوهش، مشخص شد که پروفیل آب‌شستگی در عرض کانال متغیر و به‌صورت سه‌بعدی است. متغیر بودن پروفیل حفره در عرض کانال ممکن است دلایل زیادی داشته باشد از جمله این دلایل می‌توان عدم تقارن هندسی کانال، انحراف مسیر جت ریزشی از روی سرریز به دیواره‌های کانال و سپس منحرف شدن به وسط کانال یا وجود جریان‌های ثانویه ناشی از پرش هیدرولیکی



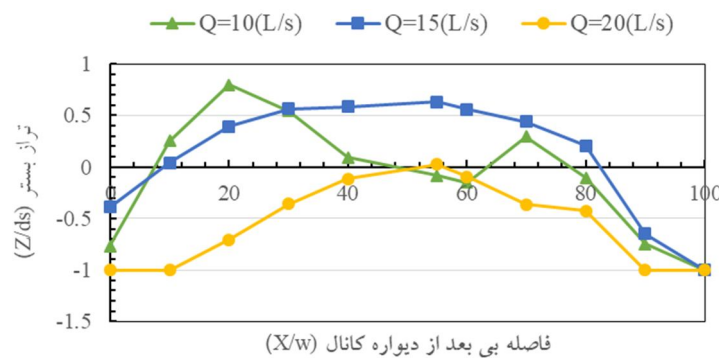
شکل ۶- پروفیل آب‌شستگی در عرض کانال در دبی‌های مختلف در سرریز ۵ کلیدی.

Figure 6. Scour profiles in channel cross at different discharges in 5 key weir.



شکل ۷- پروفیل آب‌شستگی در عرض کانال در دبی‌های مختلف در سرریز ۹ کلیدی.

Figure 7. Scour profiles in channel cross at different discharges in 9 key weir.



شکل ۸- پروفیل آب‌شستگی در عرض کانال در دبی‌های مختلف در سرریز لبه تیز (خطی).

Figure 8. Scour profiles in channel cross at different discharges in sharp crested (linear) weir.

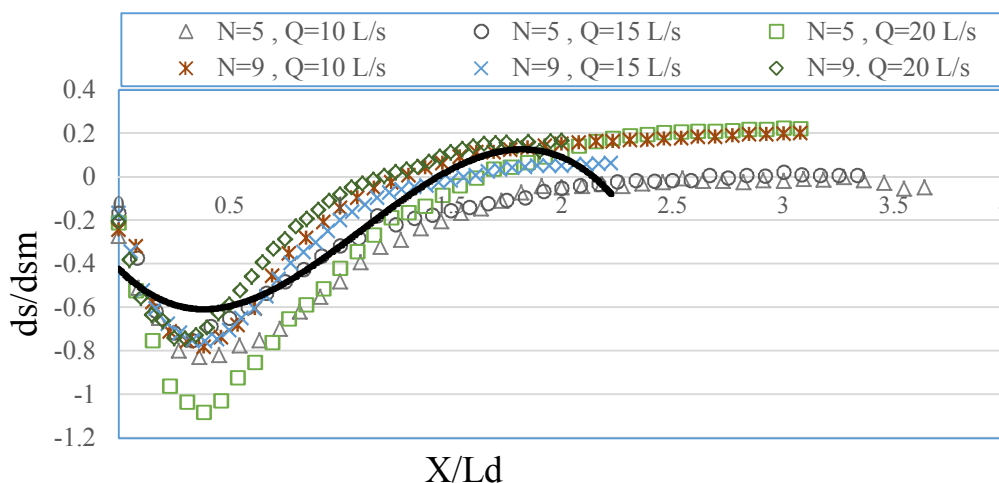
آب‌شستگی (ds_m) برای بی‌بعد کردن گسترش عمقی و پارامتر (L_d) که فاصله افقی انتهای کف‌بند تا تاج تلماسه است را برای بی‌بعد کردن گسترش طولی حفره در نظر بگیریم شکل حفره‌های آب‌شستگی تقریباً مشابه هم می‌باشند (شکل ۹). پروفیل بی‌بعد به‌دست‌آمده در این پژوهش براساس رگرسیون غیرخطی (دی و سرکار، ۲۰۰۶) از معادله درجه ۳ به‌صورت زیر پیروی می‌کند:

$$\frac{ds}{ds_m} = -0.4224 - 1.0379 \left(\frac{X}{L_d}\right) + 1.6378 \left(\frac{X}{L_d}\right)^2 - 0.4955 \left(\frac{X}{L_d}\right)^3 \quad (6)$$

که در آن، d_s عمق آب‌شستگی در فاصله x از انتهای کف‌بند است و ضریب همبستگی رابطه ۶ برابر $R^2=0/9$ است.

بررسی تشابه پروفیل‌های آب‌شستگی: با مشاهده و بررسی پروفیل‌های حفره آب‌شستگی در آزمایش‌های مختلف، مشاهده شد که شکل پروفیل‌ها با یکدیگر مشابه می‌باشند. در صورت به‌دست آمدن تشابه بین پروفیل‌های بی‌بعد حفره آب‌شستگی می‌توان شکل گودال را در شرایط مختلف تعیین کرد و برای کاهش خسارات احتمالی اقدامات لازم را انجام داد.

تشابه بین پروفیل‌های آب‌شستگی را پیش از این پژوهشگرانی مانند فرهودی و اسمیت (۱۹۸۵) و راجاراتنام (۱۹۸۱) تأیید کرده بودند. نکته مهمی که در مورد بستر فرسایش یافته باید اشاره نمود این است که اگر پروفیل‌ها براساس یک پارامتر مناسب بی‌بعد گردند، شکل آن‌ها از نظر هندسی مشابه و مستقل از زمان خواهد بود و همچنین اندازه ذرات بر روی آن‌ها تأثیرگذار نیست. در این صورت اگر حداکثر عمق



شکل ۹- پروفیل بی بعد آب شستگی در رسوبات غیر چسبنده.

Figure 9. Dimensionless profiles at non-cohesive sediments.

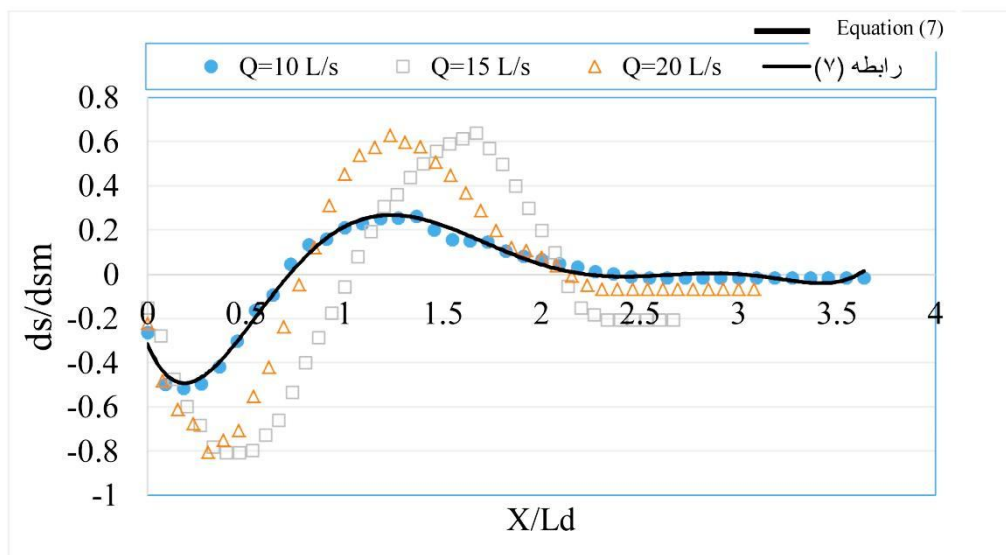
$$- 7.82 \left(\frac{X}{L_d}\right)^3 + 3.6 \left(\frac{X}{L_d}\right)^4$$

$$- 0.77 \left(\frac{X}{L_d}\right)^5 + 0.06 \left(\frac{X}{L_d}\right)^6$$

ضریب همبستگی رابطه ۷ برابر $R^2=0.9$ است.

اما پروفیل بی بعد به دست آمده برای سرریز لبه تیز از معادله درجه ۶ به صورت (شکل ۱۰) زیر پیروی می کند:

$$\frac{ds}{ds_m} = -0.31 - 2.1 \left(\frac{X}{L_d}\right) + 7.57 \left(\frac{X}{L_d}\right)^2 \quad (7)$$



شکل ۱۰- پروفیل بی بعد آب شستگی در سرریز لبه تیز.

Figure 10. Dimensionless profiles at linear weir.

۱۱ نمودار بی بعد حداکثر عمق آبشستگی را به ازای عدد فرود ذره مختلف برای هر ۳ مدل سرریز نشان می‌دهد. با افزایش عدد فرود ذره مقدار حداکثر عمق آبشستگی افزایش پیدا می‌کند. با افزایش عدد فرود ذره، قدرت جریان تقویت شده و می‌تواند عمق آبشستگی را تحت تأثیر قرار دهد. جدول ۲ نیز خلاصه نتایج رگرسیون و معادلات به دست آمده برای حداکثر عمق آبشستگی در هر سه مدل سرریز را نشان می‌دهد. به ازای افزایش تعداد کلیدهای سرریز، این مقدار افزایش می‌یابد و در سرریز ۹ کلیدی مقدار حداکثر عمق آبشستگی بیش‌تر از سرریز ۵ کلیدی است. شکل ۱۲ نیز تغییرات حداکثر عمق آبشستگی را به ازای تغییرات عرض کلیدهای سرریز نشان می‌دهد. با کاهش تعداد کلیدهای سرریز عرض آنها افزایش پیدا می‌کند که در این صورت، در یک شرایط هیدرولیکی یکسان، آبشستگی کم‌تری رخ می‌دهد. شکل ۱۳ تغییرات محل وقوع حداکثر عمق آبشستگی را به ازای عدد فرود ذره نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود که با افزایش عدد فرود ذره پارامتر بدون بعد محل وقوع حداکثر عمق آبشستگی $(\frac{L_s}{H})$ افزایش پیدا می‌کند. با افزایش سرعت جریان و همچنین افزایش مقدار عدد فرود ذره کاهش می‌یابد و محل وقوع حداکثر عمق آبشستگی به سازه سرریز نزدیک‌تر شده که می‌تواند پایداری سازه را با خطر مواجه نماید.

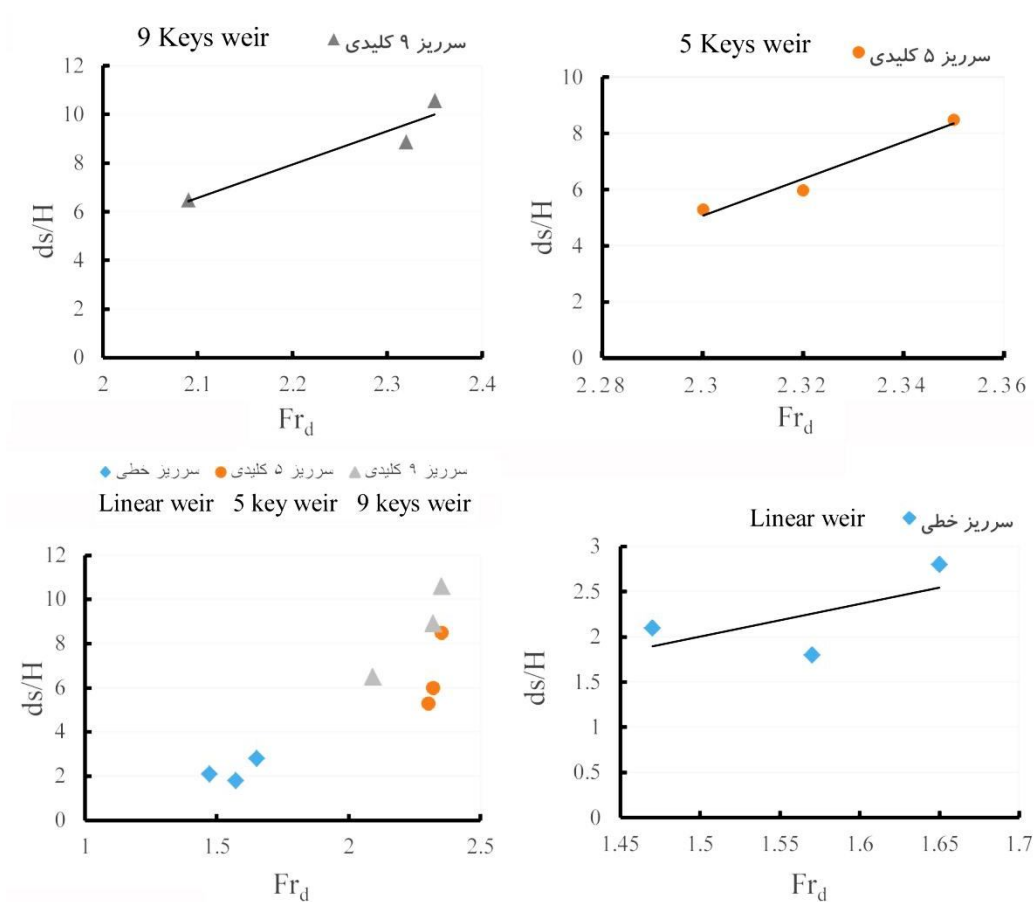
همان‌طور که پیش‌ازین ذکر شد جریان برگشتی درون حفره، رسوبات را از مقطع با حداکثر عمق آبشستگی به سمت بالادست جابجا می‌کند. این جریان برگشتی، در هنگام برخورد با دیواره عمودی کف‌بند، رسوبات را از این ناحیه جدا کرده و منجر به از بین رفتن پوشش خاکی و آشکار شدن دیواره می‌شود که می‌تواند پایداری سازه را به خطر اندازد. به همین دلیل در هنگام طراحی سازه، مقدار آبشستگی در مجاورت کف‌بند را پیش‌بینی کرد. با جایگزینی $x=0$ در رابطه ۶، آبشستگی در مجاورت کف‌بند که در شکل ۴ با a نشان داده شده است، به دست می‌آید:

$$x = 0 \rightarrow ds = a \rightarrow \frac{d_s}{ds_m} = \frac{a}{ds_m} \quad (8)$$

$$= -0.4224 \rightarrow a = -0.4224 ds_m$$

بنابراین زمانی که شرایط تعادل برقرار شود، تراز اولیه بستر رسوبی دقیقه بعد از کف‌بند به اندازه $0/4224$ برابر حداکثر عمق آبشستگی در سرریز کلید پانویسی پایین می‌افتد.

بررسی تأثیر عدد فرود ذره: حداکثر عمق حفره آبشستگی d_s فاصله عمودی از سطح اولیه بستر تا عمیق‌ترین نقطه از پروفیل حفره آبشستگی است. برای این‌که بدانیم چه عمقی از بستر پایین‌دست سرریز کلید پانویسی به حفاظت نیاز دارد لازم است عمق آبشستگی و محل وقوع آن برآورد شود. شکل



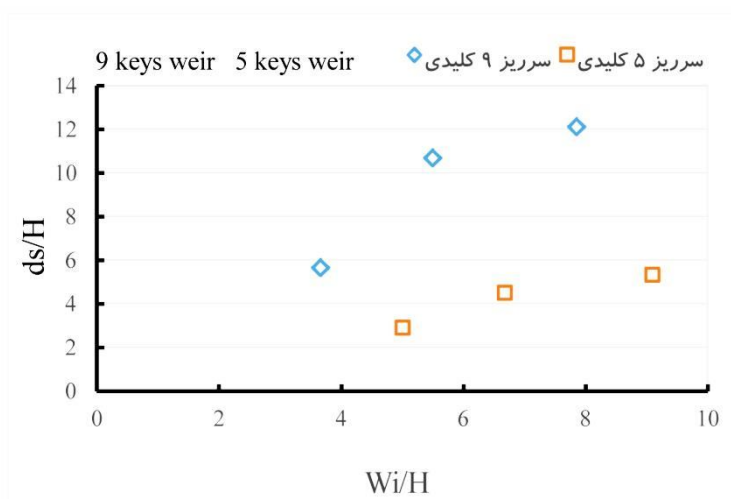
شکل ۱۱- تغییرات حداکثر عمق آبشستگی در مقابل عدد فرود ذره در هر سه مدل سرریز.

Figure 11. Maximum scour depth variation versus particle Froude number in three weir models.

جدول ۲- خلاصه نتایج رگرسیون و معادلات به دست آمده برای هر سه نوع سرریز.

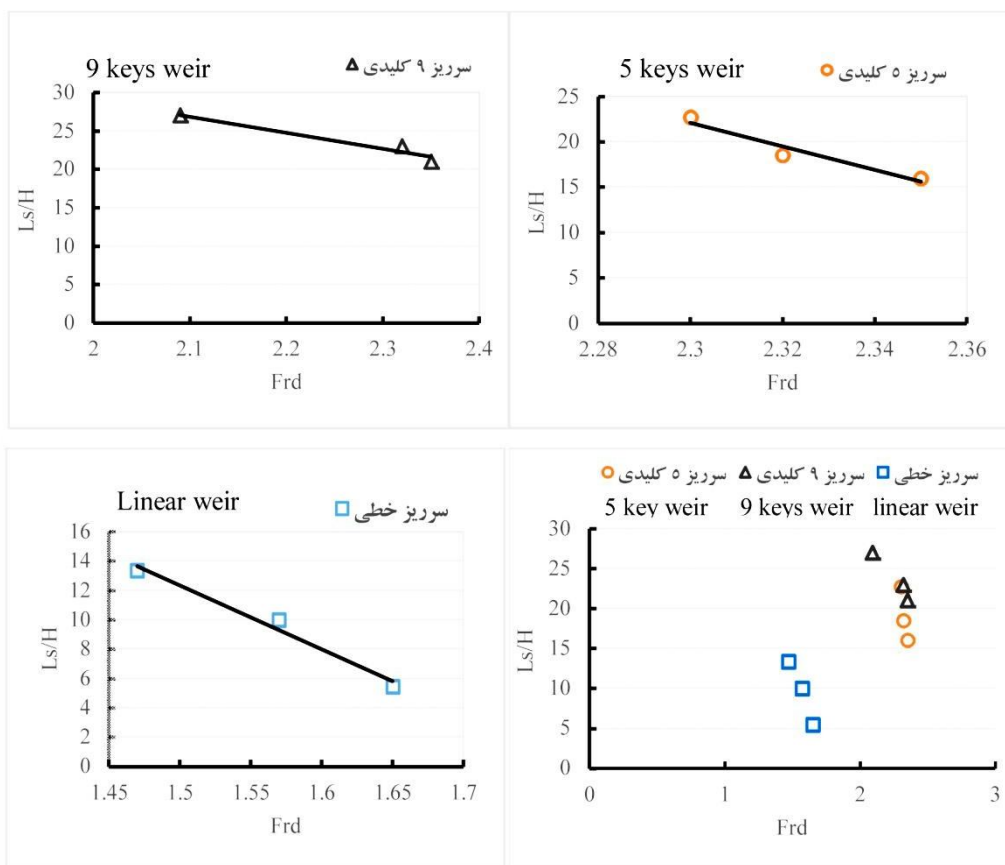
Table 2. Summary of regression results and equations for three types of weirs.

رابطه Formula	نوع سرریز Weir type
$\frac{ds}{H} = 65.526Fr_d - 145.64$	سرریز ۵ کلیدی 5 keys weir
$\frac{ds}{H} = 13.74Fr_d - 22.312$	سرریز ۹ کلیدی 9 keys weir
$\frac{ds}{H} = 4E - 8Fr_d^{22.35}$	سرریز خطی Linear weir
$\frac{ds}{H} = 0.41Fr_d^{3.72}$	
$\frac{ds}{H} = 3.6Fr_d - 3.404$	
$\frac{ds}{H} = 0.81Fr_d^{2.236}$	



شکل ۱۲- تغییرات حداکثر عمق آبشستگی به ازای تغییرات عرض کلیدهای سرریز.

Figure 12. Maximum scour depth versus weir keys width.

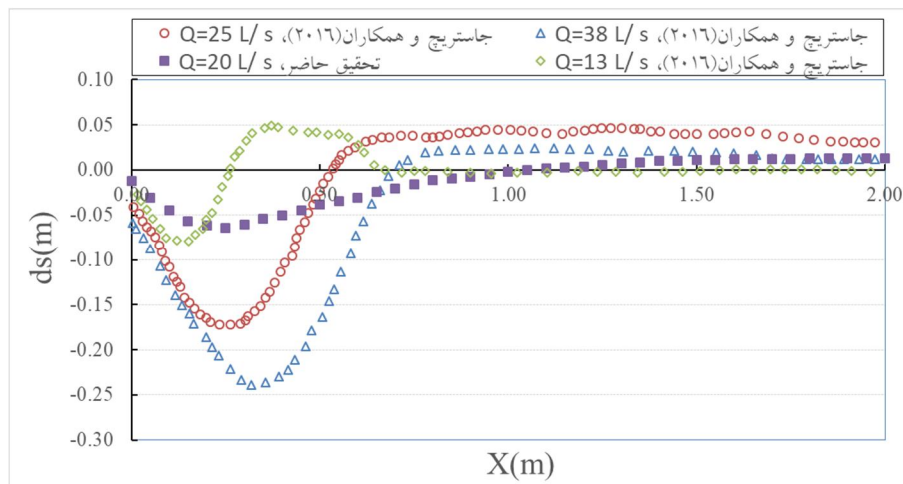


شکل ۱۳- تغییرات محل وقوع حداکثر عمق آبشستگی در مقابل عدد فرود ذره در هر سه مدل سرریز.

Figure 13. Changes in the location of the maximum scour depth versus the particle number in all three weir models.

محدودی در ارتباط با میزان آبستنگی در پایین دست سرریز کلید پیاپویی صورت گرفته است. در شکل ۱۴ مقایسه میزان آبستنگی در پژوهش حاضر با پژوهش جاستریچ و همکاران (۲۰۱۶) آورده شده است. در پژوهش آن‌ها قطر رسوبات بستر ۱/۶ میلی‌متر و سرریز کلید پیاپویی دارای ۱۴ کلید ورودی و خروجی بوده است. روند کلی انتقال نقطه حداکثر عمق آبستنگی به پایین دست با افزایش دبی در پژوهش آن‌ها نیز همانند پژوهش حاضر مشاهده می‌شود. همچنین با افزایش دبی و در نتیجه افزایش قدرت جریان مقدار حداکثر عمق آبستنگی افزایش یافته است. پروفیل آبستنگی در سرریزهای کلید پیاپویی نسبت به سرریزهای معمولی کشیده‌تر است.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که در دبی یکسان ۱۰ لیتر بر ثانیه میزان حداکثر عمق آبستنگی در سرریز کلید پیاپویی ۹ کلیدی ۳۰/۶ درصد بیش‌تر از سرریز ۵ کلیدی و ۱۰/۵ درصد کم‌تر از سرریز لبه تیز است. در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه مقدار این پارامتر در سرریز ۹ کلیدی ۳۱/۶ بیش‌تر از سرریز ۵ کلیدی و ۵ درصد کم‌تر از سرریز لبه تیز می‌باشد. در دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه میزان حداکثر عمق آبستنگی در سرریز ۹ کلیدی ۳۰ درصد بیش‌تر از سرریز ۵ کلیدی و ۵/۷ درصد کم‌تر از سرریز لبه تیز شده است. افزایش عمق آبستنگی با افزایش تعداد کلیدها در مطالعات ماچیلز و همکاران (۲۰۱۱) نیز تأیید شده است. از جمله پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش عمق آبستنگی بوده است. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته پژوهش‌های بسیار



شکل ۱۴- مقایسه میزان آبستنگی در پژوهش حاضر با تحقیق جاستریچ و همکاران (۲۰۱۶).

Figure 14. Comparison of Scouring value in the present study with Jastrich et al. (2016).

جت‌های ریزشی از تاج‌های کناری با جریان خروجی بالادست، بالازدگی سطح آب رخ داده و زمانی که جریان خروجی به صورت یک جت ریزشی وارد ناحیه کف‌بند شده، ناحیه چرخشی شدید در مقابل کلید خروجی شکل می‌گیرد. به همین دلیل رسوباتی از بستر که در مقابل کلید خروجی قرار گرفته بیش‌تر

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش به بررسی تأثیر خصوصیات هیدرولیکی سرریز کلید پیاپویی و تأثیر عدد فرود ذره بر روی میزان حداکثر عمق آبستنگی و محل وقوع آن پرداخته شد. آزمایش‌ها نشان داد که در کلید خروجی سرریز به خاطر تلاقی جریان ناشی از

هیدرولیکی از این روابط برای حفاظت بستر در برابر آبشستگی استفاده کرد. با توجه به نمودارهای رسم شده، حداکثر عمق آبشستگی در سرریز ۹ کلیدی در دبی‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۵ لیتر بر ثانیه به‌طور متوسط ۳۰/۷ درصد بیش‌تر از سرریز ۵ کلیدی و ۷ درصد کم‌تر از سرریز لبه‌تیز بوده است. در هر دو سرریز کلید پیاپی این مقدار کم‌تر از سرریز خطی می‌باشد.

شسته می‌شوند و از کناره‌ها کنده شده و در وسط بستر روی هم انباشته می‌شوند. با رسم پروفیل‌های بی‌بعد گودال آبشستگی، رابطه‌ای برای تعیین پروفیل گودال در شرایط مختلف تعیین شد. همچنین پارامترهای حداکثر عمق آبشستگی و محل وقوع آن به‌صورت نمودارهایی برحسب پارامترهای بدون بعد آورده شده است که می‌توان در طراحی‌های سازه‌های

منابع

- Anderson, R.M., and Tullis, B.P. 2013. Piano Key weir hydraulics and labyrinth weir comparison. *J. Irrig. Drain. Engin.* 139: 3. 246-253.
- Bey, A., Faruque, M.A.A. and Balachandar, R. 2007. Two- Dimensional Scour Hole Problem: Role of Fluid Structures. *J. Hydr. Engin.* 133: 4. 414-430.
- Bradley, J.N., and Peterka, A.J. 1957. Hydraulic design of stilling basins. *J. Hydr. Div. ASCE.* 83: 1-24. Comm. Irrig. Drain. Beijing, China.
- Dey, S., and Sarkar, A. 2006. Scour downstream of an apron due to submerged horizontal jets. *J. Hydr. Engin.* 132: 3. 246-857.
- Farhoudi, J., and Smith, K. 1985. Local scour profiles downstream of hydraulic jump. *J. Hydr. Engin.* 23: 4. 343-359.
- Hamidifar, H., and Omid, M.H. 2010. Experimental investigation of scouring of non-cohesive sediments at apron downstream. *J. Agric. Engin.* 11: 2. 17-28 (In Persian)
- Jüstrich, S., Pfister, M., and Schleiss, A.J. 2016. Mobile Riverbed Scour Downstream of a Piano Key Weir. *ISH J. Hydr. Engin.* 142: 11. 04016043.
- Lempérière, F., and Ouamane, A. 2003. The Piano Keys weir: a new cost-effective solution for spillways. *Int. J. Hydropower Dams.* 10: 5. 144-149.
- Machiels, O., Erpicum, S., Archambeau, P., Dewals, B.J., and Piroton, M. 2011b. 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.
- Machiels, O., Piroton, M., Pierre, A., Dewals, B., and Erpicum, S. 2014. Experimental parametric study and design of Piano Key Weirs. *J. Hydr. Rese.* 52: 3. 326-335.
- Pfister, M., Capobianco, D., Tullis, B. and Schleiss, A. 2013. Debris-blocking sensitivity of Piano Key weirs under reservoir-Type approach flow. *J. Hydr. Engin.* 139: 11. 1134-1141.
- Rajaei, A., Esmaeili Varaki, M., and Shafei Sabet, B. 2018. Experimental investigation on local scour at the downstream of grade control structures with labyrinth planform. *J. Hydr. Engin.* Published online: 05 Aug 2018.
- Rajaratnam, N. 1981. Erosion by plane turbulent jets. *J. Hydr. Res.* 19: 4. 339-358.
- Riberio, M., Pfister, M., Schleiss, A.J., and Boillat, J.L. 2012. Hydraulic design of A-type Piano Key weirs. *J. Hydr. Res.* 50: 4. 400-408.
- Safarzadeh, A., and Noroozi, B. 2015. 3D hydrodynamics of trapezoidal piano key weirs. *Inter. J. Civil Engin.* 136: 345-358.
- Saifi, A., Hossein Zadeh Delir, A., and Farsadi Zadeh, D. 2014. Scouring at the downstream of the broad crested weir with two sloped side. *J. Water Soil Sci.* 23: 177-188. (In Persian)
- Sarathi, P., and Faruque, M.A.A., and Balachandar, R. 2008. Influence of Tailwater Depth, Sediment Size and Densimetric Froude Number on Scour by Submerged Square Wall Jets. *J. Hydr. Res.* 46: 2. 158-175.



Experimental Study of Downstream Scour of Piano Keys Weirs

F. Ahmadi Dehrashid¹ and *S. Gohari²

¹M.Sc. Graduate, Dept. of Water Science and Engineering, University of Bu Ali Sina, Hamedan,

²Assistant Prof., Dept. of Water Science and Engineering, University of Bu Ali Sina, Hamedan

Received: 01.31.2018; Accepted: 12.02.2018

Abstract

Background and Objectives: Spillways are a simple and practical hydraulic structure in water conveyance systems and irrigation drainage channels which used to measure the flow, transfer excess water and control the water surface of the reservoir. The Piano Key Weir (PKW) is a rectangular-labyrinth-type weir that used to maximize the allowable weir length that can fit in a given weir channel width, while reducing the required structural footprint. Piano key weirs is a new form of long crest weirs that have a relatively simple structure and high economic efficiency structures. Due to the advantages of this weirs, we need to study and investigate the downstream scouring of this structures. In this research, the downstream scour of piano key weir has been studied.

Materials and Methods: To study the downstream scouring, two different physical models of piano key weirs in different hydraulic conditions have been used. The experiments were carried out in a flume with a 10 meters length and 50 cm width and height. Two type of piano key weir with 5 and 9 keys were used in this experiments. In order to compare the scour hole area a linear weir with a height of 20cm and a width of 50 cm were used in comparison with linear weirs, the corresponding hydraulic conditions was also studied. The scour hole dimensions were measured with a point gauge with ± 1 millimeter reading accuracy which has located on top of the channel that can moving along to the channel. The effect of the particle number on the maximum scour depth and location of maximum scour hole was investigated.

Results: The results show that in piano key weirs, with increasing effective crest length, water depth decreases over weir crest and so on decreases the amount of scour depth by decreasing the flow velocity at downstream of weir. Bed profile shape at eroded area is completely three dimensional. Increasing rate of Scour hole depth is related to number the of piano keys. By increasing the number of keys the maximum depth, length and location of the scour hole as well increased. The results show that even at the low level downstream water depth, scouring of this weir is less than the sharp crested linear weirs. The profile of the scour hole in the piano key weir is almost similar to the linear weir but the only difference is in the height of the dune at the downstream of scour hole. The height of the dune generated at higher downstream water depth of piano key weir is even lower than sharp crested linear weir and also, with increasing the particle Froude number, the maximum scour depth parameter and length of occurrence was increased. The maximum scour depth at the 9 key spillway and in 10, 15 and 25 l/s were 30.7% more than the 5-key spillway and 7% less than the sharp linear spillway.

* Corresponding Author; Email: s.gohari@basu.ac.ir

Conclusion: In piano key weirs reducing downstream water depth increases scour depth and far it away from downstream apron. Also, by increasing the particle Froude number, the maximum scour depth, the location of the maximum scour depth and the maximum length of the scour hole was increased. The rate of increase in the scour depth is also dependent on the number of overflow keys, and in a fixed Froude number and downstream water depth, increasing the number of keys, the maximum depth and location of maximum scour depth also increase.

Keywords: Experimental Study, Froude Number, Piano Key Weir, Scour Hole, Water Depth

