

**M. Jamshidi**

Department of Water  
Engineering, College of  
Aburairhan, University of  
Tehran, Tehran, Iran.

**e-mail:** Mehdi.jamshidi@ut.ac.ir

**J. Soltani\***

Department of Water  
Engineering, College of  
Aburairhan, University of  
Tehran, Tehran, Iran.

**e-mail:** jsoltani@ut.ac.ir

**M. Rostami**

Department of River  
Engineering, Soil  
Conservation and Watershed  
Management Research  
Institute, Iran.

**e-mail:**

Mrostami2001@yahoo.com

**M. Saneie**

Department of River  
Engineering, Soil  
Conservation and Watershed  
Management Research  
Institute, Iran.

**e-mail:**

Drsaneie2001@gmail.com

## **Clear Water Scour around at a Piano Key Side Weir of the Type A at 120° Section of a 180° Curved Channel**

*A side weir is a hydraulic control structure used in irrigation and drainage systems and combined sewer systems. The Piano Key Weir (PKW) is a new type of long crest weirs that have a relatively simple structure and high economic efficiency structures. Due to the advantages of this weirs, it is necessary to study and investigate the Scour around of these structures as a side-weir. The present study focuses on investigate the scouring around the piano key Side weirs of the Type A at a 30° Section of a 180° Alluvial curved channel for clear water conditions. The results showed that at the end of the Side weir, longitudinal bar in the middle of the main channel and a scour hole close to the outer bank are formed because of the changes in shear stress field. The depth of clear-water scour increases by time and approaches the equilibrium state asymptotically depending on approach flow velocity. The equilibrium depth of scour depends on the dimensionless parameters of flow intensity, flow shallowness, weir crest height, side weir length and the maximum value of scour depth occurs at a depth when the approach flow intensity is equal to 1.0. Also, the scour equilibrium depth in the dimensionless ratio increased  $L/r_c = 0.175$  compared to  $L/r_c = 0.125$  in different flow velocity of 12 to 35%, 10 to 39% and 18 to 26%, respectively.*

**Keywords:** Scour, Side Weir, Piano Key Side Weir, clear water, Curved Channel.

---

\* Corresponding author

Received 14 December 2021, Revised 18 March 2022, Accepted 30 April 2022.

DOI: 10.22091/cer.2022.7627.1338

## آبشستگی آب‌زال در اطراف سرریز جانبی کلیدپیانویی تیپ A در زاویه ۱۲۰ درجه یک کانال قوسی ۱۸۰ درجه

سرریز جانبی یک سازه کنترل هیدرولیکی است که در سیستم‌های آبیاری و زهکشی و سیستم‌های فاضلاب ترکیبی استفاده می‌شود. سرریزهای کلیدپیانویی نوع جدیدی از سرریزهای چند وجهی هستند که می‌توانند با ایجاد طول بیشینه تاج سرریز در عرض محدود به عبور بهتر جریان کمک کنند. این سازه‌ها دارای شکل جدیدی از تاج سرریز، با راندمان بالا سازه‌های اقتصادی هستند. به دلیل مزیت‌های این سرریز لزوم مطالعه و تحقیق روی آبشستگی اطراف این سرریزها بعنوان سرریز جانبی الزامی می‌باشد. مطالعه حاضر بر روی آبشستگی اطراف سرریز جانبی کلید پیانویی تیپ A در شرایط آب‌زال در یک کانال قوسی ۱۸۰ درجه و در زاویه ۱۲۰ درجه تمرکز دارد. نتایج حاکی از آن بود که در انتهای پایین دست سرریز جانبی حفره‌هایی بصورت متوالی در وسط کانال و چاله آبشستگی نزدیک به قوس بیرونی به دلیل تغییرات تنش برشی و سرعت تشکیل شد. عمق آبشستگی در شرایط آب‌زال ابتدا به سرعت افزایش می‌یابد، سپس با گذشت ۲۰۰ دقیقه به صورت تقریبی به شرایط تعادل می‌رسد و به شدت جریان وابسته است. عمق تعادل آبشستگی به پارامترهای بی‌بعد شدت جریان، ارتفاع آب بر روی سرریز جانبی، ارتفاع تاج سرریز و طول سرریز جانبی وابسته است و بیشترین مقدار عمق آبشستگی زمانی که نسبت بی‌بعد شدت جریان نزدیک به یک است بدست می‌آید. همچنین عمق تعادل آبشستگی در نسبت بی‌بعد  $L/TC=0/175$  در مقایسه با  $L/TC=0/125$  در شدت جریان‌های متفاوت به ترتیب ۱۲ تا ۳۵ درصد، ۱۰ تا ۳۹ درصد و ۱۸ تا ۲۶ درصد افزایش یافته است.

**واژگان کلیدی:** آبشستگی، سرریز جانبی، سرریز کلیدپیانویی، آب‌زال، کانال قوسی.

### مهدی جمشیدی

گروه مهندسی آب، پردیس  
ابوریحان، دانشگاه تهران.  
پست الکترونیک:  
mehdi.jamshidi@ut.ac.ir

### جابر سلطانی\*

گروه مهندسی آب، پردیس  
ابوریحان، دانشگاه تهران.  
پست الکترونیک:  
jsoltani@ut.ac.ir

### محمد رستمی

پژوهشکده حفاظت خاک و  
آبخیزداری، سازمان تحقیقات،  
آموزش و ترویج کشاورزی،  
تهران.  
پست الکترونیک:  
mrostami2001@yahoo.com

### مجتبی صانعی

پژوهشکده حفاظت خاک و  
آبخیزداری، سازمان تحقیقات،  
آموزش و ترویج کشاورزی،  
تهران.  
پست الکترونیک:  
drsaneie2001@gmail.com

### ۱- مقدمه

سرریزها در جلو یا کنار کانال اصلی ساخته می‌شوند اندازه‌گیری جریان، عبور سیلاب، تنظیم عمق و دبی جریان و غیره در کانال‌های روباز استفاده می‌شوند [۱].

سرریزهای چندوجهی با هدف افزایش طول سرریز و ظرفیت تخلیه در یک عرض ثابت توسعه پیدا کرده‌اند [۲]. سرریزهای کلیدپیانویی نوع جدید و توسعه‌یافته سرریزهای چندوجهی هستند. این سرریزها در مقابل سرریزهای چندوجهی دارای ساختگاه کوچک‌تر و از لحاظ

سرریزها از قدیمی‌ترین سازه‌های هیدرولیکی هستند به طور وسیعی برای اندازه‌گیری جریان، تنظیم سطح آب و تنظیم دبی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۰۹/۲۳، بازنگری ۱۴۰۰/۱۲/۲۷، پذیرش ۱۴۰۱/۰۲/۱۰.  
DOI: 10.22091/cer.2022.7627.1338 شناسه دیجیتال

انتهایی آن، تغییرات قابل ملاحظه‌ای در پروفیل بستر شکل می‌گیرد که عمدتاً با افزایش تراز بستر در پایین-دست سرریز همراه می‌باشد. رخداد چنین پدیده‌هایی منجر به پس‌زدگی جریان و تغییر الگوی جریان در محدوده سرریز جانبی می‌گردد که افزایش میزان آگیری سرریز جانبی یکی از آثار آن می‌باشد [۱۰].

آن و آگاجچی اوغلو مطالعه‌ای در شرایط آب‌زالال به بررسی عمق آب تعادل آبشستگی اطراف سرریز جانبی مستطیلی در یک کانال مستقیم با بستر رسوبی پرداختند. مشخص شد که سرعت جریان یک پارامتر موثر در عمق آبشستگی است. و همچنین عمق تعادل آبشستگی با افزایش سرعت جریان، نسبت ارتفاع آب و طول سرریز جانبی افزایش می‌یابد [۱۱].

آگاجچی اوغلو و آن در مطالعه‌ای موقعیت آبشستگی را در شرایط آب‌زالال و در حضور سرریز جانبی در کانال قوسی به صورت چاله‌های در طول کانال و محدود به قوس خارجی مشاهده کردند و همچنین سرعت جریان پارامتر موثر در عمق آبشستگی معرفی گردید که بیش‌ترین عمق آبشستگی در مقطع ۳۰ درجه و کم‌ترین در مقطع ۱۲۰ و ۱۵۰ درجه رخ می‌دهد [۱۲].

آگاجچی اوغلو و همکاران در یک پژوهش مرتبط با آبشستگی موضعی در دهانه سرریز جانبی مستطیلی در زاویه ۳۰ درجه در یک قوس ۱۸۰ درجه، ارتباط و همبستگی بین عمق آبشستگی و پارامترهای بدون بعد نسبت سرعت تقریبی جریان به سرعت بحرانی آستانه حرکت بستر، نسبت هد آب روی سرریز به عمق آب در کانال و نسبت عرض کانال به ارتفاع سرریز بررسی کردند. نتایج نشان دهنده این بود که عمق آبشستگی با نسبت سرعت جریان به صورت خطی افزایش می‌یابد و حداکثر عمق آبشستگی زمانی اتفاق می‌افتد که این نسبت به مقدار یک برسد و موقعیت حداکثر عمق آبشستگی در پایین‌دست مقطع سرریز و نزدیک به قوس بیرونی خم در کانال اتفاق می‌افتد همچنین ۸۰ درصد آبشستگی در ۳۰ درصد زمان تعادل رخ می‌دهد [۱۳].

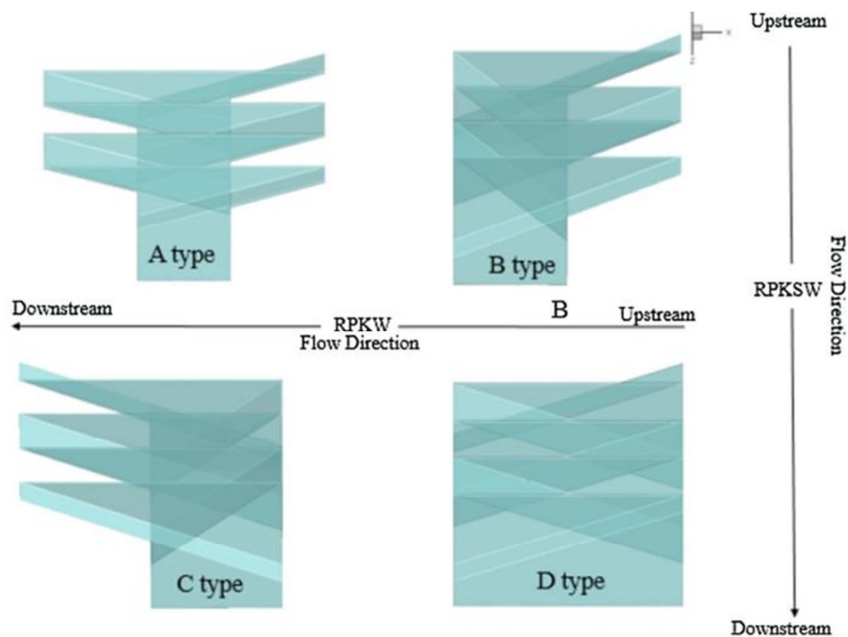
اقتصادی بصره‌تر می‌باشند همچنین نسبت به سرریزهای خطی، ظرفیت تخلیه را تا سه برابر افزایش می‌دهند [۳] و [۴]. به‌طور کلی سرریزهای کلیدپیانویی را می‌توان به چهار تیپ تقسیم کرد (شکل ۱). وقتی که یک سرریز در کنار کانال جانمایی می‌شود سرریز جانبی نامیده می‌شود و هنگامی که سطح آب در کانال اصلی بالا بیاید جریان از روی تاج سرریز عبور می‌کند. سرریزهای جانبی به صورت گسترده در هیدرولیک، مهندسی محیط زیست، کنترل سیلاب و تنظیم سطح آب کاربرد دارند. این سرریزها همچنین قسمت مهمی از کانال‌های پخش‌کننده در شبکه‌های آبیاری، زهکشی و فاضلاب هستند. سرریزهای جانبی همچنین بعنوان سازه‌های اضطراری در بعضی از سازه‌های هیدرولیکی استفاده می‌شوند [۵-۷]. هنگامی که این سازه‌های هیدرولیکی در مقابل جریان قرار می‌گیرند آبشستگی اطراف این سازه‌ها ممکن است توسعه پیدا کند و در نهایت باعث تخریب آنها شود [۸].

امامی و همکاران با توجه به اهمیت سرریزهای کنگره‌ای منقاری مثلثی که از جمله سرریزهای غیرخطی مهم جهت تنظیم سطح آب و کنترل جریان در کانال‌ها، رودخانه‌ها و مخازن سدها محسوب می‌شوند، مطالعه‌ای جهت برآورد مقدار ضریب دبی در راستای استفاده بهینه از این نوع سرریزها انجام دادند. مقایسه نتایج حاصل از اجرای الگوریتم‌های GWO و EA و نرم‌افزار FLUENT با کسب مقادیر  $R^2=0.96$  و  $NRMSE=0.052$  در مقایسه با مقادیر مشاهداتی، نشان‌دهنده تطابق مناسب بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی در این نوع سرریزها برای ضریب دبی می‌باشد [۹].

بررسی‌ها نشان می‌دهد مطالعات اندکی بر روی آبشستگی اطراف سرریزهای غیرخطی جانبی در کانال‌های مستقیم و قوسی انجام شده است.

روزیب اثر تغییرات بستر بر میزان جریان خروجی از سرریزهای جانبی در یک کانال مستطیلی با بستر رسوبی مورد بررسی قرار داد و عنوان کرد که به دلیل شکل‌گیری الگوی خاصی از جریان در محدوده سرریز به ویژه بخش

نتایج نشان داد عمق حفره آبستگي به دبی و ارتفاع سرریز بستگی دارد و در شرایط مشابه، عمق آبستگي پایین دست مدل مستطیلی بیشتر از مدل ذوزنقه‌ای می‌باشد [۱۵]. فرسایش بالادست سرریز کلیدپیانویی و استفاده از این سرریز بعنوان گذرگاه رسوب مورد بررسی قرار گرفت و محققان معادله‌ای برای ظرفیت عبور رسوبات از روی سرریز کلیدپیانویی ارائه کردند [۱۶].



شکل ۱- انواع سرریز کلیدپیانویی [۱۷].

کلیدپیانویی نوع A در زاویه ۱۲۰ درجه در یک کانال قوسی شکل همراه با بستر فرسایش‌پذیر و در شرایط آب زلال است.

## ۲- مواد و روش‌ها

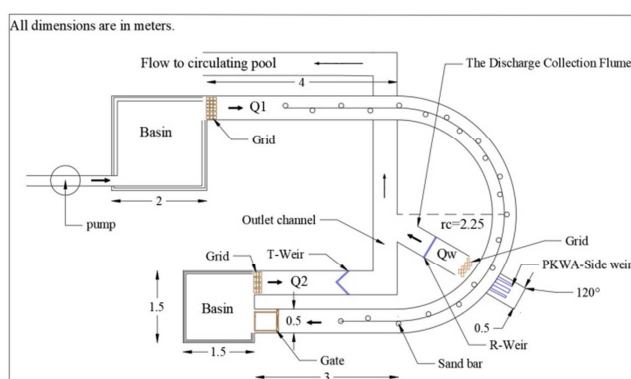
مطالعات آزمایشگاهی این تحقیق در ادامه یک طرح جامع، برای بررسی آبستگي اطراف سرریز جانبی کلیدپیانویی در آزمایشگاه هیدرولیک پژوهشکده حفاظت و آبخیزداری کشور و بر روی فلومی که سامانه تامین آب به صورت مدار بسته عمل می‌کند، انجام گردید. آزمایش‌ها در فلوم منحنی شکل از جنس پلاکسی گلاس و با کف فلزی به طول ۱۷ متر، عمق ۰/۵ متر، عرض ۰/۵ متر، قطر ۴ متر و با شیب بستر ۰/۰۰۱ انجام شد (شکل ۲- الف).

محققانی به بررسی آبستگي اطراف سرریز کلیدپیانویی نوع C در مقاطع ۳۰ و ۱۲۰ درجه از یک کانال قوسی پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد آبستگي در مقطع ۳۰ درجه ۲۵-۳۰ درصد بیشتر از زاویه ۱۲۰ درجه می‌باشد [۱۴]. آبستگي پایین دست سرریز کلیدپیانویی با هندسه ذوزنقه‌ای و مستطیلی مورد بررسی قرار گرفت.

اکثر مطالعات مربوط به سرریز جانبی به صورت کلی بر روی خصوصیات جریان و ضریب تخلیه برای انواع مختلف سرریز در کانال‌های مستقیم [۵، ۶، ۱۸-۲۳]، در کانال‌های قوسی [۱۷ و ۲۴-۲۷] متمرکز هستند و مطالعات بسیار کمی بر روی آبستگي اطراف سرریزهای جانبی غیرخطی در کانال قوسی انجام شده است و مطالعات در این زمینه کافی نیست. بررسی‌های گذشته موید این است که مطالعاتی بر روی آبستگي اطراف سرریزهای جانبی چند وجهی از نوع کلیدپیانویی در کانال قوسی فرسایش‌پذیر انجام نشده است. از طرفی در سال‌های اخیر، کاربرد گسترده سرریزهای کلیدپیانویی برای آگیری و انحراف آب پیشنهاد شده‌اند. در نتیجه هدف اصلی این تحقیق بررسی آبستگي اطراف سرریز جانبی

عبوری در انتهای فلوم اصلی ( $Q_2$ ) توسط یک سرریز مثلثی (T-Weir) کالیبره شده اندازه‌گیری می‌شد. جزئیات فلوم آزمایشگاهی در شکل ۲- (ب) مشاهده می‌شود. در این تحقیق دبی کل فلوم اصلی در بالادست ( $Q_1$ ) با استفاده از رابطه (۱) بدست می‌آید:

$$Q_1 = Q_W + Q_2 \quad (1)$$



(ب)



(الف)

شکل ۲- (الف) کانال قوسی آزمایشگاهی مورد مطالعه در این تحقیق و (ب) شماتیک کانال اصلی و تجهیزات آن

که آبشستگی در شرایط آب‌زال حالتی است که رسوبات در آستانه حرکت باشند و این زمانی اتفاق می‌افتد که سرعت متوسط جریان ( $V$ ) کمتر از سرعت بحرانی آستانه حرکت ذرات ( $V_c$ ) باشد ( $V < V_c$ ) و برای حالتی که ( $V > V_c$ ) باشد رسوبات شروع به حرکت می‌کنند و شرایط بستر متحرک اتفاق می‌افتد. بیشترین عمق آبشستگی در  $V = V_c$  اتفاق می‌افتد [۲۸]. در شرایط آب‌زال، عمق آبشستگی موضعی در رسوبات یکنواخت تقریباً بصورت خطی افزایش می‌یابد و در حالت بستر متحرک، عمق آبشستگی به صورت دوره‌ای با زمان نوسان دارد و مقدار تعادل آن به حرکت فرم بستر بستگی دارد. روند آبشستگی موضعی در حالت آب‌زال به زمان وابسته است. زمان تعادل بستگی به قابلیت فرسایش جریان و مقاومت در برابر حرکت مواد بستر دارد. عمق تعادل آبشستگی در شرایط آب‌زال با گذشت زمان تغییرات کمی دارد و می‌تواند مدت زمانی طولانی را برای تعادل حفره آبشستگی بگیرد [۱۲].

جدول ۱- مشخصات فلوم استفاده شده در پژوهش حاضر

مقدار	واحد	علامت	متغیر
17	M	-	طول فلوم
0.5	M	b	عرض فلوم
2	M	$R_1$	شعاع داخلی فلوم
2.25	M	$R_c$	شعاع از وسط کانال اصلی
2.5	M	$R_1$	شعاع بیرونی فلوم
0.5	M	-	عمق کانال
0.001	-	S	شیب کانال
	Lit/s	$Q_1$	دبی در بالادست
	Lit/s	$Q_W$	دبی عبوری از سرریز جانبی
120	-	$\alpha$	زاویه

## ۱-۲- آبشستگی اطراف سازه‌های آبی

در شکل ۳ توسعه عمق آبشستگی با زمان در شرایط بستر متحرک و آب‌زال مشاهده می‌شود. در شرایط بستر متحرک، عمق تعادل به سرعت بدست می‌آید. اما در شرایط آب‌زال، زمان رسیدن به عمق تعادل آهسته‌تر بدست می‌آید. ملیو و چپو (۱۹۹۹) ذکر کردند

با استفاده از نمودار شیلدز و با مجموعه‌ای از آزمایش‌ها تعیین می‌شود و طبق معادله (۲) تعیین می‌شود [۲۹]:

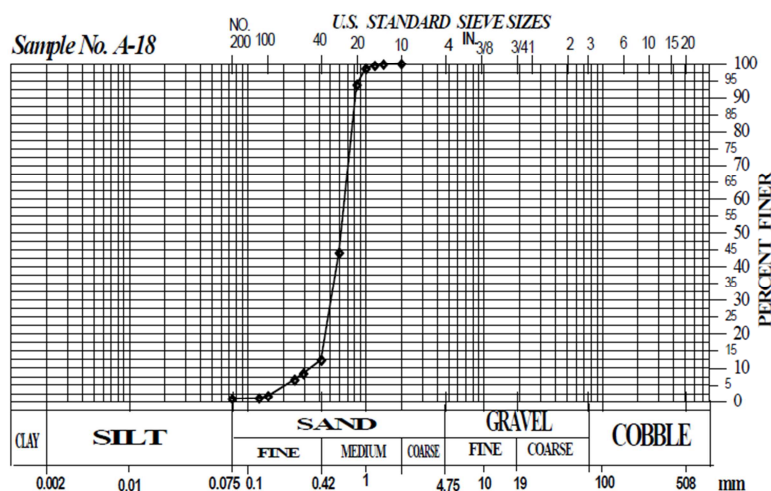
$$\frac{V_C}{U_C} = 5.75 \log \left( 5.53 \frac{h_1}{d_{50}} \right) \quad (2)$$

در معادله (۲)  $h_1$  عمق آب در بالادست سرریزجانبی در فلوم اصلی می‌باشد، با جایگزین کردن مقدار  $d_{50}$  و مقدار  $(U_C)$  برای این اندازه میانی رسوب محاسبه شده و معادله (۳) بدست می‌آید:

$$V_C = 0.1556 \log(9217h_1) \quad (3)$$

پس از نصب کلیه سرریزها و تجهیزات مورد نیاز آزمایش در فلوم، با روشن کردن پمپ، آب در بالادست  $(Q_1)$  به سمت یک مخزن آرام‌کننده هدایت می‌شود و برای اینکه آشفتگی جریان از بین برود از صفحات آرام‌کننده جریان در ابتدای فلوم استفاده شده است. در ابتدای هر آزمایش آب با دبی پایین در کانال رها می‌گردد که باعث شسته شدن مواد بستر نگردد و هیچ رسوبی از بالادست به پایین دست انتقال پیدا نکند و شرایط انجام آزمایش در حالت آب زلال به دست آید. عمق آب توسط دریچه‌ای که در انتهای فلوم قرار دارد کنترل می‌شود.

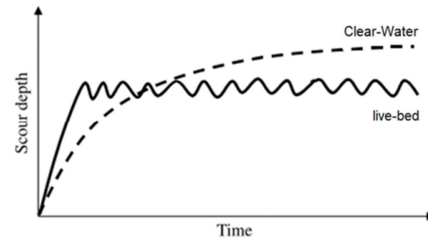
#### Soil Conservation and Watershed Management Research Institute Lab



شکل ۴- منحنی دانه‌بندی رسوبات مورد استفاده در این مطالعه آزمایشگاهی

شکل ۵ شماتیک، مشخصات و جانمایی سرریز جانبی کلیدپیانویی تیپ A و محدوده تغییرات پارامترهای

#### ۲-۲- مشخصات سرریز کلیدپیانویی

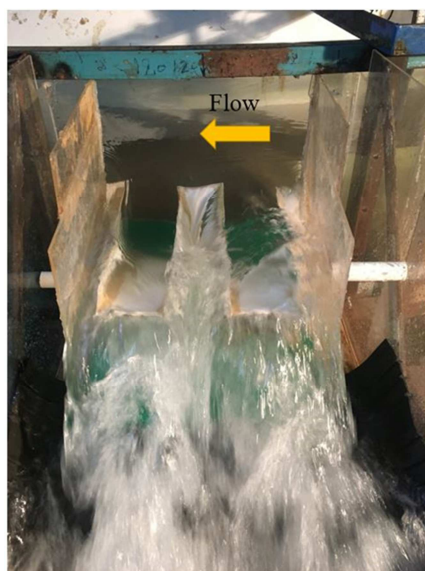
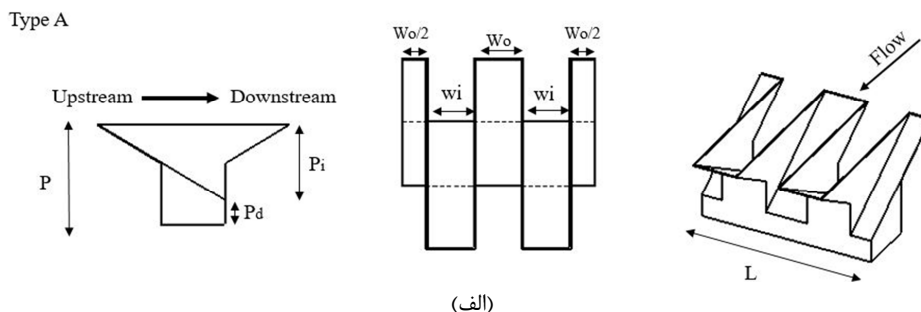


شکل ۳- توصیف مفهومی توسعه آبشستگی در زمان برای شرایط آب زلال (خط بریده) و بستر زنده (خط ممتد) [۳۰].  
در این تحقیق رسوبات با ضخامت ۱۵ سانتی‌متر و میانگین اندازه میانی ذرات مواد بستر  $(d_{50})$ ، ۰/۶ میلی-متر می‌باشد و مطابق منحنی دانه‌بندی ارائه شده در شکل ۴ در کف کانال قرار داده شد و قبل از هر آزمایش به صورت یکنواخت پهن و صاف گردیده است. در این پژوهش پروفیل کف بستر توسط یک پروفایلر الکترومغناطیسی با دقت نزدیک به ۰/۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. همچنین عمق چاله آبشستگی در انتهای پایین دست سرریز جانبی در کانال اصلی و نزدیک به مرکز ناحیه جریان معکوس اندازه‌گیری شد.

آزمایش‌های این تحقیق در شرایط جریان زیربحرانی انجام گردیده است. سرعت برشی بحرانی  $(U_C)$

در جدول ۲ ارائه شده است. در جدول ۲،  $L_e$  طول تاج موثر سرریز کلیدپیانویی،  $rc$  شعاع کانال قوسی و  $hd$  عمق تعادل آبشستگی می‌باشند.

آزمایش را نمایش می‌دهند. در این شکل،  $P$  ارتفاع سرریز،  $P_d$  ارتفاع پایه سرریز،  $W_i$  عرض کلید ورودی،  $W_o$  عرض کلید خروجی،  $L$  طول سرریز است. مشخصات هندسی و محدوده تغییرات پارامترهای مورد آزمایش در این تحقیق



شکل ۵- (الف) شماتیک سرریز و (ب) سرریز کلیدپیانویی استفاده شده در این تحقیق

جدول ۲- مشخصات هندسی سرریز جانبی کلیدپیانویی تیپ A و محدوده تغییرات پارامترهای مورد آزمایش

$P_i$ (cm)	$L$ (cm)	$P_d$ (cm)	$h_1$ (cm)	$(h_1-p)/h_1$	$V$ (m/s)	$V_c$ (m/s)	$b/p$	$L/rc$	$W_i=W_o$ (cm)	$L_e$ (cm)	$hd$ (cm)
15	35	0	21-25	0.28-0.4	0.2-0.33	0.33-0.35	3.33	0.175	8.45	175	4.25-8.76
15	35	3	25-29	0.29-0.38	0.21-0.33	0.34-0.35	2.77	0.175	8.45	175	3.61-6.99
15	35	5	29-33	0.31-0.39	0.22-0.34	0.34-0.36	2.5	0.175	8.45	175	2.35-6.12
10	25	0	16-22	0.37-0.54	0.2-0.32	0.32-0.34	5	0.125	6.05	125	3.42-6.49
10	25	3	22-26	0.4-0.49	0.21-0.33	0.33-0.35	3.84	0.125	6.05	125	3.16-4.9
10	25	5	26-29	0.42-0.49	0.21-0.33	0.34-0.35	3.33	0.125	6.05	125	1.54-4.62

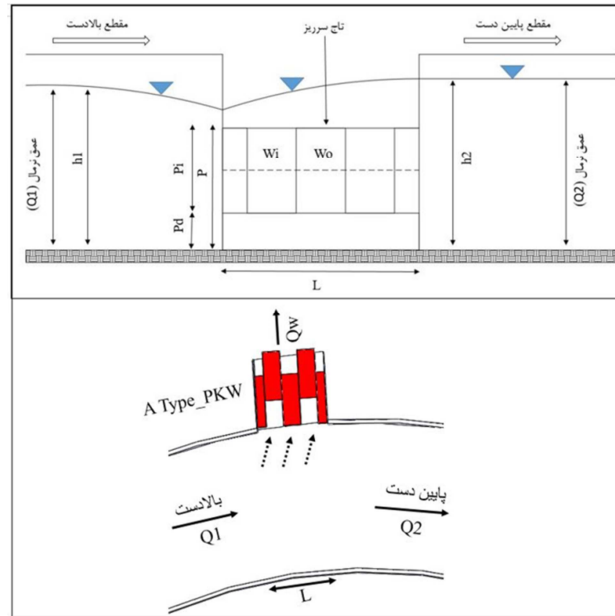
بعداً برای کانال‌های مستطیلی، افقی، بدون اصطکاک و منشوری طبق رابطه ۴ اصلاح شد [۱۲]:

۳-۲ ساختار جریان بر روی سرریز جانبی معادله کلی دینامیکی برای انحراف پروفیل سطح آب با فرض انرژی ثابت توسط چاو (۱۹۵۹) ارائه شد و

عمق جریان در هر مقطع،  $S$  فاصله از شروع سرریز جانبی و  $dQ/dx$  تغییرات دبی عبوری از هر واحد طول سرریز جانبی است (شکل ۶).

$$\frac{dy}{dx} = \frac{Qy \left(-\frac{dQ}{dx}\right)}{gb^2y^3 - Q^2} \quad (۴)$$

در معادله ۴،  $dy/dx$  تغییرات تراز سطح آب،  $Q$  دبی در واحد طول کانال،  $b$  عرض کانال اصلی،  $g$  شتاب گرانش،



شکل ۶- شماتیک جریان بر روی سرریز جانبی مستطیلی در شرایط جریان زیربحرانی

محققان ذکر کردند که اندازه و محل منطقه جداسازی و جریان معکوس به عدد فرود بالادست سرریز جانبی و طول سرریز جانبی بستگی دارد. منطقه جداسازی و جریان معکوس با افزایش عدد فرود افزایش به سمت پایین دست حرکت می کند [۱۲].

#### ۴-۲- پارامترهای بی بعد

آنالیز ابعادی عمق تعادل آبشستگی در سرریز جانبی برای شرایط جریان در قوس از طریق معادله ۵ تعیین می شود:

$$\frac{h_d}{p} = \left( \frac{v_1}{v_c}, \frac{(h_1 - p)}{h_1}, \frac{b}{p}, \frac{L}{rc} \right) \quad (۵)$$

در معادله ۵،  $(h_1 - p)/h_1$  نسبت بی بعد عمق آب بر روی سرریز جانبی،  $b/p$  نسبت بی بعد ارتفاع تاج سرریز،  $L/rc$  نسبت بی بعد طول سرریز، و  $v/v_c$  نسبت بی بعد سرعت جریان می باشد.

همان طور که در شکل ۶ مشاهده می شود، سطح آب در انتهای بالادست سرریز جانبی به سمت انتهای پایین دست در کانال اصلی افزایش می یابد و این با معادله ۴ برای شرایط جریان زیربحرانی در کانال اصلی مطابقت دارد. محققانی مانند [۲۴، ۲۵ و ۳۱] به افت کم سطح آب در انتهای بالادست به دلیل تاثیر جریان جانبی اشاره کردند، سپس سطح آب به سرعت به سمت انتهای پایین دست سرریز جانبی افزایش می یابد و در محدوده وسط تاج سرریز نرخ افزایش سطح آب بصورت قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. سطح آب در یک سوم انتهایی بالای تاج سرریز جانبی دارای تغییرات اندکی است تا جایی که سطح آب بصورت افقی است. این رفتار تراز سطح آب با توجه به اثر جریان ثانویه ناشی از جریان جانبی نزدیک انتهای پایین دست سرریز جانبی قابل توجیه است و مطابقت دارد. با این حال، همین محققان یک منطقه جداسازی و جریان معکوس در انتهای پایین دست سرریز جانبی برای جریان زیربحرانی را مشاهده کردند. این



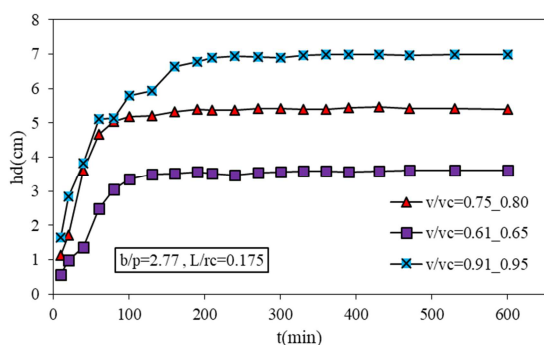
### ۳- بحث و بررسی نتایج

دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود در ۵۰ دقیقه اول، تمایل افزایشی در عمق آبشستگی زیاد است. یعنی عمق آبشستگی در ابتدا با گذشت زمان به سرعت افزایش می‌یابد. تمایل فزاینده در عمق آبشستگی پس از ۲۰۰ دقیقه کاهش پیدا می‌کند. در نهایت، بسته به شدت جریان، عمق آبشستگی آب زلال به عمق تعادل آبشستگی ( $hd$ )، به صورت تقریبی با زمان نزدیک می‌شود. هر چه شدت جریان بیشتر باشد زمان رسیدن به عمق تعادل نیز بیشتر است. در نسبت بی‌بعد طول سرریز  $L/rc=0.175$ ، بیش‌ترین عمق آبشستگی در نسبت  $b/p=3/33$  و در نسبت  $b/p=2/5$  کم‌ترین مقدار را دارد که به این معنی است عمق آبشستگی به سرعت جریان و نسبت بی‌بعد ارتفاع تاج سرریز بستگی دارد. در ارتفاع‌های بالاتر نسبت بی‌بعد تاج سرریز، مومنتم جریان به سمت سرریز جانبی افزایش یافته و باعث قوی‌تر شدن جریان ثانویه در انتهای سرریز جانبی در کانال اصلی می‌گردد، که نتیجه آن افزایش عمق آبشستگی می‌باشد.

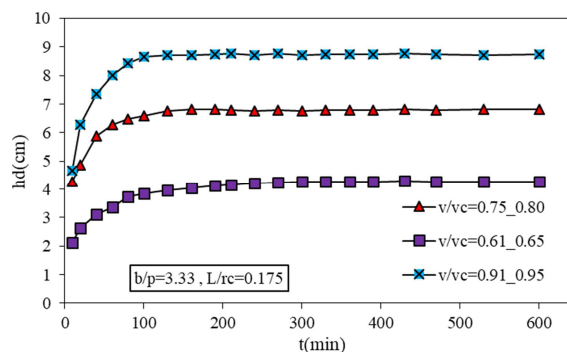
همان‌طور که شناخته شده است، سازه‌های آبرگیری در رودخانه‌های قوسی بصورت کلی در نیمه دوم قوس جانمایی می‌شوند. بنابراین، آزمایش‌ها برای بررسی آبشستگی اطراف سرریز جانبی کلیدپیانویی تیپ A در زاویه ۱۲۰ درجه انجام شد.

#### ۳-۱- مقایسه توسعه عمق آبشستگی با زمان در شدت جریان‌های مختلف

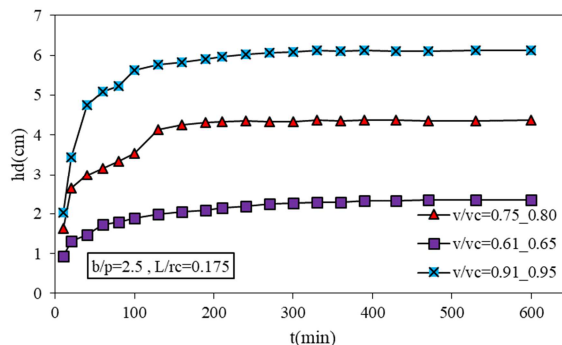
آزمایش‌ها برای تعیین توسعه عمق آبشستگی با زمان در شدت جریان‌های مختلف انجام شد. هر آزمایش به مدت ۱۰ ساعت تا زمانی که تغییرات چاله آبشستگی تقریباً به صفر برسد، انجام شد. نمودار شکل ۷ توسعه عمق آبشستگی برای سرریزهای جانبی کلیدپیانویی تیپ A در زاویه ۱۲۰ درجه را در طول زمان و سرعت جریان به عنوان پارامتر سوم و پارامتر بی‌بعد  $b/p$  در مقادیر ۲/۵، ۳/۳۳ و ۲/۷۷ وقتی که  $L/rc=0.175$  است، را نشان می‌-



(ب)



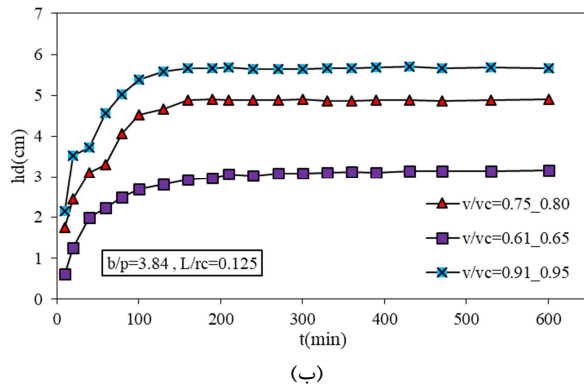
(الف)



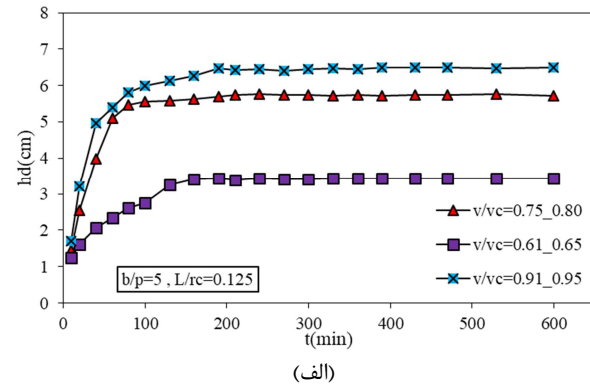
(پ)

شکل ۷- توسعه  $hd$  با زمان در  $v/vc$  های مختلف برای (الف)  $b/p=3.33$ ,  $L/rc=0.175$ . (ب)  $b/p=2.77$ ,  $L/rc=0.175$  و (پ)  $b/p=2.5$ ,  $L/rc=0.175$

داده‌ها نشان داد ۵۰ درصد عمق تعادل آبشستگی برای پارامتر بی‌بعد نسبت  $b/p$  در مقادیر ۵،  $۳/۸۴$  و  $۳/۳۳$  به ترتیب  $۱۲/۵$ ،  $۱۴/۵$  و ۱۰ درصد از زمان تعادل بدست می‌آید. همچنین نمودار شکل ۸ نشان می‌دهد در یک طول بی‌بعد یکسان سرریز جانبی بیشترین عمق آبشستگی در نسبت بی‌بعد ارتفاع تاج سرریز کمتر بدست می‌آید. همچنین عمق تعادل آبشستگی در نسبت بی‌بعد  $L/rc=۰/۱۷۵$  در مقایسه با  $L/rc=۰/۱۲۵$  در شدت جریان‌های متفاوت به ترتیب ۱۲ تا ۳۵ درصد، ۱۰ تا ۳۹ درصد و ۱۸ تا ۲۶ درصد افزایش یافته است.



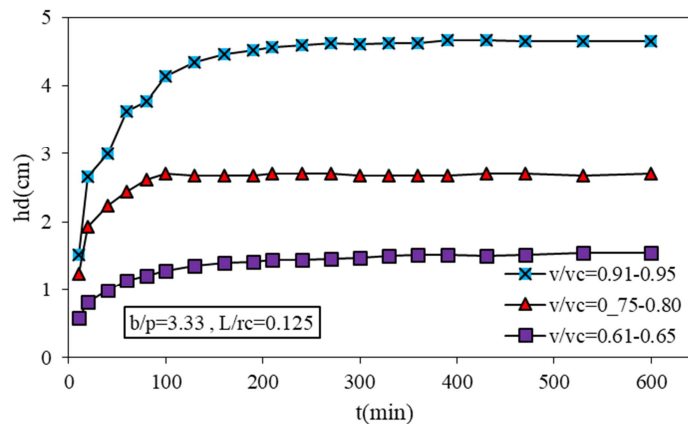
نمودار شکل های ۸ و ۹ توسعه عمق آبشستگی برای سرریزهای جانبی کلیدپیانویی تیپ A در زاویه  $۱۲۰$  درجه را در طول زمان و سرعت جریان به عنوان پارامتر سوم و پارامتر بی‌بعد نسبت  $b/p$  در مقادیر ۵،  $۳/۸۴$  و  $۳/۳۳$  وقتی که  $L/rc=۰/۱۲۵$  می‌باشد، را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود عمق آبشستگی در ابتدا با گذشت ۵۰ دقیقه به سرعت افزایش پیدا می‌کند و سپس بصورت تقریبی بین ۱۵۰ تا ۲۰۰ دقیقه که بستگی به شدت جریان دارد به مقدار ثابتی می‌رسد. این بدین معنا می‌باشد که عمق آبشستگی به تعادل رسیده است. بررسی



شکل ۸- توسعه  $hd$  با زمان در  $v/vc$  های مختلف برای (A)  $b/p=5$ ,  $L/rc=0.125$  (B)  $b/p=3.84$ ,  $L/rc=0.125$

افزایش طول سرریز، آبشستگی نیز افزایش پیدا می‌کند، و این ناشی از افزایش جریان ثانویه در طول بیشتر سرریز جانبی است که سبب آبشستگی بیشتر در اطراف سرریز جانبی می‌شود.

تفاوت نمودار ۷-الف با نمودار ۹ در نسبت بی‌بعد طول سرریز می‌باشد. در نمودارهای ۷-الف و ۹ ارتفاع سرریز پارامتر ثابت می‌باشد و طول سرریز متفاوت است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در یک ارتفاع ثابت با

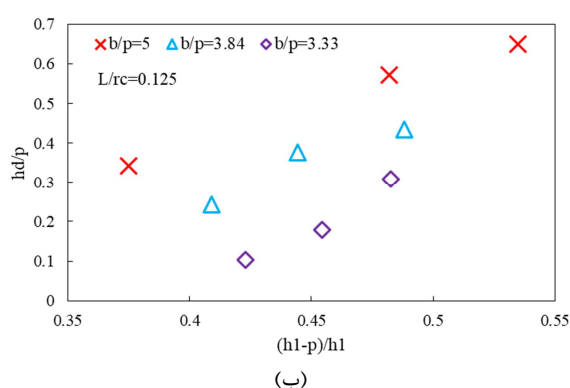


شکل ۹- توسعه  $hd$  با زمان در  $v/vc$  های مختلف برای  $b/p=3.33$ ,  $L/rc=0.125$

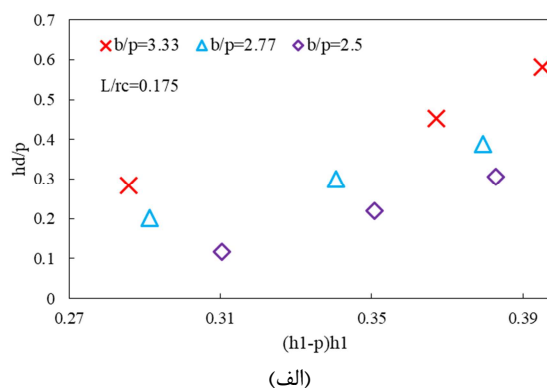
تغییرات پارامتر بی‌بعد عمق تعادل آبشستگی برای سرریز جانبی کلیدپیانویی تیپ A در مقابل عمق آب روی

۲-۳- توسعه عمق تعادل آبشستگی با عمق آب روی سرریز چندوجهی کلیدپیانویی

$(h1-p)/h1$  افزایش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در نسبت‌های بی‌بعد  $L/rc=0/175$  و  $L/rc=0/125$  به ترتیب، بیش‌ترین افزایش عمق آبشستگی برای نسبت بی‌بعد  $b/p=5$  و  $b/p=3/33$  می‌باشد. گردش ثانویه جریان در کنار مرز پایین دست سرریز، باعث آبشستگی در جلوی سرریز جانبی می‌شود. شدت این گردش ثانویه به ارتفاع سرریز جانبی وابسته است و با افزایش ارتفاع سرریز جانبی کاهش می‌یابد.



سرریز جانبی  $(h1-p)/h1$  در نسبت‌های بی‌بعد  $b/p=3/33$ ،  $b/p=2/5$  و  $b/p=2/77$  و نسبت بی‌بعد  $L/rc=0/175$  در نمودار ۱۰-الف نشان داده شده است. همچنین در نمودار ۱۰-ب تغییرات پارامتر  $hd/p$  در مقابل  $(h1-p)/h1$  برای نسبت‌های  $b/p=3/33$ ،  $b/p=3/84$  و  $b/p=5$  و  $L/rc=0/125$  ارائه شده است. همان‌طور که از نمودار ۱۰ به وضوح دیده می‌شود عمق تعادل آبشستگی  $(hd/p)$ ، با افزایش عمق آب روی سرریز



شکل ۱۰-  $hd/p$  در برابر  $(h1-p)/h1$  در  $\alpha=120^\circ$  برای  $L/rc=0.175$  (A) و  $L/rc=0.175$  (B)

اندازه ناحیه جریان معکوس بستگی دارد. موقعیت ناحیه جریان معکوس به شدت جریان  $V1/Vc$ ، عمق آب روی سرریز  $(h1-p)/h1$ ، ارتفاع بی‌بعد سرریز  $b/p$  و طول بی‌بعد سرریز  $L/rc$  بستگی دارد و زمانی که شدت جریان افزایش پیدا کند، ناحیه جریان معکوس و محل آبشستگی به سمت انتهای پایین دست سرریز جانبی انتقال پیدا می‌کند. با این حال، با افزایش عمق آب روی سرریز  $(h1-p)/h1$ ، ارتفاع بی‌بعد سرریز  $b/p$  و طول بی‌بعد سرریز  $L/rc$  موقعیت آبشستگی و ناحیه جریان معکوس به سمت بالادست انتقال پیدا می‌کند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری ایران برای بررسی آبشستگی اطراف سرریز جانبی کلیدپیانویی تیپ A در زاویه ۱۲۰ درجه از یک کانال قوسی ۱۸۰ درجه همراه با بستر فرسایش‌پذیر در شرایط آب‌زال صورت گرفت. نتایج

#### ۳-۳- موقعیت حفره آبشستگی

موقعیت حفره آبشستگی و بیش‌ترین عمق آبشستگی در کانال قوسی ۱۸۰ درجه در حضور سرریز جانبی کلیدپیانویی تیپ A در زاویه ۱۲۰ درجه به طور خلاصه در این بخش توضیح داده شده است. بیش‌ترین عمق حفره آبشستگی تقریباً نزدیک انتهای سرریز جانبی کلیدپیانویی تیپ A یا پایین‌تر از موقعیت انتهای سرریز جانبی اتفاق می‌افتد.  $V1/Vc$  مهم‌ترین پارامتر تاثیرگذار بر روی ابعاد حفره آبشستگی و موقعیت بیش‌ترین عمق آبشستگی بود. همان‌طور که قبلاً ذکر شد با افزایش  $V1/Vc$ ، عمق آبشستگی نیز افزایش می‌یابد. در انتهای پایین دست سرریز جانبی کلیدپیانویی تیپ A، حفره‌های پشت سر هم در وسط کانال اصلی و چاله آبشستگی نزدیک به قوس بیرونی به دلیل تغییرات تنش برشی و سرعت شکل می‌گیرد. بیش‌ترین عمق آبشستگی در مرکز ناحیه جریان معکوس اتفاق می‌افتد. محل بیش‌ترین عمق آبشستگی و حفره‌های آبشستگی پشت سر هم به مکان و

در یک ارتفاع ثابت از سرریز جانبی با افزایش عمق آب بر روی سرریز به دلیل افزایش جریان ثانویه به سمت سرریز جانبی، عمق آبشستگی نیز افزایش پیدا می‌کند.

### تقدیر و تشکر

بدین وسیله از زحمات و تلاش‌های صادقانه کلیه مدیران، کارشناسان و کارکنان آزمایشگاه هیدرولیک پژوهشکده حفاظت و آبخیزداری کشور بابت فراهم نمودن تجهیزات و تسهیلات انجام این تحقیق صمیمانه قدرانی و سپاسگزاری می‌نمایم.

حاصل از مطالعه این تحقیق نشان می‌دهد که بیشترین عمق تعادل آبشستگی تقریباً در انتهای سرریز جانبی در کانال اصلی اتفاق می‌افتد، عمق آبشستگی در ابتدا به سرعت افزایش پیدا می‌کند و پس از مدتی تقریباً به مقدار ثابتی می‌رسد. عمق تعادل آبشستگی به پارامترهای بی‌بعد شدت جریان  $V1/Vc$ ، ارتفاع سرریز  $b/p$  و طول سرریز  $L/TC$  وابسته است بدین صورت که با افزایش شدت جریان و طول سرریز، آبشستگی نیز به دلیل افزایش جریان ثانویه بیشتر می‌شود همچنین با ارتفاع سرریز، به دلیل اینکه قدرت جریان گردشی ثانویه در انتهای سرریز جانبی کاهش می‌یابد، عمق آبشستگی نیز کاهش پیدا می‌کند.

### مراجع

- [1] Karimi, M., Attari, J., Saneie, M., Jalili Ghazizadeh, M.R., 2018. Side Weir Flow Characteristics : Comparison of Piano Key, Labyrinth, and Linear Types. *Journal of Hydraulic Engineering* 144, 04018075.
- [2] Saleh, O.K., Elnikhely, E.A., Ismail, F., 2019. Minimizing the hydraulic side effects of weirs construction by using labyrinth weirs. *Flow Measurement and Instrumentation* 66, 1-11.
- [3] Ribeiro, M.L., Pfister, M., Schleiss, A.J., Boillat, J.-L., 2012. Hydraulic design of A-type piano key weirs. *Journal of Hydraulic Research* 50, 400-408.
- [4] Mehboudi, A., Attari, J., Hosseini, S., 2016. Experimental study of discharge coefficient for trapezoidal piano key weirs. *Flow Measurement and Instrumentation* 50, 65-72.
- [5] Pathirana, K., Munas, M., Jaleel, A., 2006. Discharge coefficient for sharp-crested side weir in supercritical flow. *J. Institution Eng* 39, 17-24.
- [6] Emiroglu, M.E., Kaya, N., Agaccioglu, H., 2009. Discharge capacity of labyrinth side weir located on a straight channel. *Journal of irrigation and drainage engineering* 136, 37-46.
- [7] Onen, F., Agaccioglu, H., 2013. Live bed scour at a side-weir intersection located on an alluvial channel. *Irrigation and Drainage* 62, 488-500.
- [8] Al-Husseini, T.R., Al-Madhachi, A.-S.T., Naser, Z.A., 2019. Laboratory experiments and numerical model of local scour around submerged sharp crested weirs. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*.
- [9] Emami, S., Parsa, J., Emami, H. and Abbaspour, A., 2021. Investigation of Discharge Coefficient of Triangular Duckbill Labyrinth Weirs Using Fluent Software and Gray Wolf and Elections Algorithms. *Journal of Civil Infrastructure Researches*, 6, 2, 11, 107-121.
- [10] Rosier, B., 2007. Interaction of side weir overflow with bed-load transport and bed morphology in a channel. *Laboratoire de constructions hydrauliques*.
- [11] Önen, F., Ağaçoğlu, H., 2007. Scour at a side-weir intersection located on an alluvial river. *Hydrology Research* 38, 165-176.
- [12] Ağaçoğlu, H., Önen, F., 2005. Clear-water scour at a side-weir intersection along the bend. *Irrigation and drainage* 54, 553-569.
- [13] Ağaçoğlu, H., Önen, F., Toprak, Z.F., 2007. Scour around a side-weir at a 30° section of a 180° alluvial curved channel. *Irrigation and Drainage* 56, 423-438.
- [14] Mikaeeli, H. Soltani, J. Rostami, M. And Saneie. (2018). "Study of Hydraulic Performance side piano keys weir in erodible curved channels (Experimental and Numerical)", MSc Thesis, College of Aburairhan, University of Tehran.
- [15] Yazdi, A.M., Hoseini, S.A., Nazari, S., Amanian, N., 2021. Effects of weir geometry on scour development in the downstream of Piano Key Weirs. *Water Supply* 21, 289-298.
- [16] Nosedá, M., Stojnic, I., Pfister, M., Schleiss, A.J., 2019. Upstream erosion and sediment passage at piano key weirs. *Journal of Hydraulic Engineering* 145, 04019029.
- [17] Mehri, Y., Esmaeili, S., Soltani, J., 2020. Experimental study and performance comparison on various types of rectangular piano key side weirs at a 120° section of a 180° curved channel. *Applied Water Science* 10, 1-13.

- [18] Singh, R., Manivannan, D., Satyanarayana, T., 1994. Discharge coefficient of rectangular side weirs. *Journal of irrigation and drainage engineering* 120, 814-819.
- [19] Borghei, S., Jalili, M., Ghodsian, M., 1999. Discharge coefficient for sharp-crested side weir in subcritical flow. *Journal of Hydraulic Engineering* 125, 1051-1056.
- [20] Bagheri, S., Heidarpour, M., 2011. Characteristics of flow over rectangular sharp-crested side weirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 138, 541-547.
- [21] Emin Emiroglu, M., Cihan Aydin, M., Kaya, N., 2014. Discharge characteristics of a trapezoidal labyrinth side weir with one and two cycles in subcritical flow. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 140, 04014007.
- [22] Nezami, F., Farsadzadeh, D., Nekooie, M.A., 2015. Discharge coefficient for trapezoidal side weir. *Alexandria Engineering Journal* 54, 595-605.
- [23] Karimi, M., Jalili Ghazizadeh, M., Saneie, M., Attari, J., 2020. Experimental and numerical study of a piano key side weir with oblique keys. *Water and Environment Journal* 34, 444-453.
- [24] Agaccioglu, H., Yüksel, Y., 1998. Side-weir flow in curved channels. *Journal of irrigation and drainage engineering* 124, 163-175.
- [25] Coşar, A., Agaccioglu, H., 2004. Discharge coefficient of a triangular side-weir located on a curved channel. *Journal of irrigation and drainage engineering* 130, 410-423.
- [26] Mehri, Y., Soltani, J., Saneie, M., Rostami, M., 2018. Discharge Coefficient of a C-Type Piano Key Side Weir at 30° and 120° Sections of a Curved Channel. *Civil Engineering Journal* 4, 1702-1713.
- [27] Saghari, A., Hosseini, K., Saneie, M., 2019. Experimental study of trapezoidal piano key side weirs in a curved channel. *Flow Measurement and Instrumentation* 70, 101640.
- [28] Melville, B.W., Chiew, Y.-M., 1999. Time scale for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering* 125, 59-65.
- [29] Melville, B., Sutherland, A., 1988. Design method for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering* 114, 1210-1226.
- [30] Manes, C., Brocchini, M., 2015. Local scour around structures and the phenomenology of turbulence. *Journal of Fluid Mechanics* 779, 309-324.
- [31] Subramanya, K., Awasthy, S.C., 1972. Spatially varied flow over side-weirs. *Journal of the Hydraulics Division* 98, 1-10.