



## هیدرولیک جریان بر روی سرریزهای کلیدپیانویی تحت هندسه متفاوت پایه‌ها

\* جواد احدیان<sup>۱</sup> و علیرضا افضلیان<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار گروه سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشجوی کارشناسی ارشد گروه سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز  
تاریخ دریافت: ۹۳/۱۰/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۹۴/۸/۱۷

### چکیده

**سابقه و هدف:** با توجه به افزایش طول مؤثر و به دنبال آن افزایش راندمان تخلیه در سرریزهای کلیدپیانویی می‌توان از آن‌ها در سرریز سدها و یا سازه‌های تنظیم آب در شبکه‌های آبیاری و زهکشی استفاده نمود. در این پژوهش تأثیر شکل هندسی پایه‌های نصب شده زیر کلیدهای خروجی بر راندمان هیدرولیکی این سرریزها بررسی شده است. استفاده از این سرریزها در مخازن سدها منجر به افزایش تراز سطح آب و افزایش حجم ذخیره در مخزن می‌شود. در مطالعات گذشته بدون در نظر گرفتن شکل پایه با استفاده از مدل فیزیکی ضریب تخلیه‌ای سرریزهای کلیدپیانویی به صورت روابط بدون بعد از پارامترهای هندسی سرریز و بار آبی ارائه شده است.

**مواد و روش‌ها:** به این منظور ابتدا دو سرریز با نسبت‌های ارتفاع به عرض یک سیکل ۱/۳۳، (مدل ۱) و ۰/۵۰، (مدل ۲)، ساخته شد. همچنین در هر مدل، از پایه‌های تخت، مثلثی و نیم‌استوانه به همراه مدل شاهد (بدون پایه)، جهت مقایسه راندمان هیدرولیکی استفاده گردید. در مجموع ۸ مدل تهیه و در دبی‌های مختلف آزمایش‌های هیدرولیکی انجام شد. محدوده تغییرات دبی به گونه‌ای انتخاب گردید، تا در ابتدا، داده‌های زیادی جمع‌آوری شود و همچنین هم شرایط آزاد و هم شرایط مستغرق برای سرریز ایجاد گردد. حداقل دبی کاربردی ۱ لیتر بر ثانیه با کنترل عدد وبر به عنوان پارامتر کشش سطحی و حداکثر ۱۳۰ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شد. آزمایش‌ها در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی هیدرولیکی دانشگاه شهید چمران اهواز و در یک فلوم آزمایشگاهی به عرض کف ۸۰ سانتی‌متر و طول ۱۲ متر انجام شد.

**یافته‌ها:** به طور کلی یافته‌های این پژوهش نشان داد که در مجموع راندمان تخلیه هیدرولیکی مدل ۱، با نسبت  $P/W_{II}$ ، برابر ۱/۳۳، بیش‌تر از مدل ۲ با نسبت  $P/W_{II}$  برابر با ۰/۵۰، می‌باشد. این موضوع مستقل از شکل پایه‌هاست. از طرفی در هر دو مدل در یک بار آبی یکسان، دبی تخلیه سرریز با پایه مثلثی از سایر حالات بیش‌تر است. بر اساس نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های این پژوهش مشخص گردید که در هر دو مدل سرریز کلید پیانویی تغییرات دبی - اشل خطی بوده و این به مفهوم قدرت مناسب تنظیم‌کنندگی سطح آب بالادست سرریزهای می‌باشد. جهت مقایسه راندمان هیدرولیکی سرریزهای کلیدپیانویی از معادله عمومی سرریزها، استفاده شد. در این بخش نتایج نشان داد که راندمان هیدرولیکی پایه مثلثی از دیگر شکل‌های بررسی شده بیش‌تر است؛ پایه نیم‌استوانه در جایگاه دوم قرار دارد و همچنین

\* مسئول مکاتبه: [j.ahadiyan@scu.ac.ir](mailto:j.ahadiyan@scu.ac.ir) & [ja\\_ahadiyan@yahoo.com](mailto:ja_ahadiyan@yahoo.com)

تفاوتی میان پایه تخت و مدل شاهد (بدون پایه) وجود ندارد. در پایه استوانه‌ای از نظر هیدرودینامیکی خطوط جریان به صورت تدریجی دارای انحنا گشته و افت انرژی کم‌تری به وقوع می‌پیوندد. از این‌رو در مدل‌های ۱ و ۲، بیشینه ضریب دبی محاسبه شده نسبت به حالت تخت و بدون پایه به ترتیب ۱۵ و ۱۷ درصد بیش‌تر است.

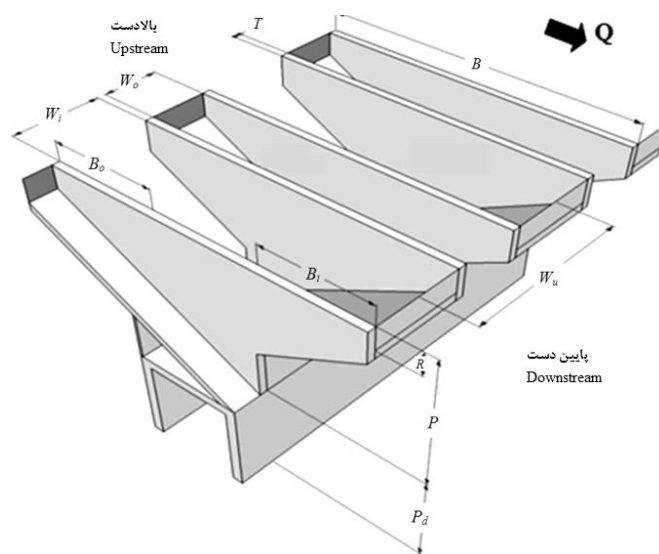
**نتیجه‌گیری:** استفاده از پایه با شکل‌های مختلف اثر معنی‌داری بر راندمان تخلیه سرریزهای کلیدپیانویی دارد. به نحوی که در مدل ۱، بیشینه ضریب دبی برای پایه‌های مثلثی، نیم‌استوانه، تخت و مدل شاهد، به ترتیب برابر ۰/۶۱، ۰/۵۴، ۰/۴۸ و ۰/۴۶ به دست آمد که این مقادیر در نسبت‌های استغراق (نسبت هد جریان بالادست سرریز،  $H_1$ ، به ارتفاع سرریز،  $P$ ) حدود ۰/۱ به وقوع پیوست.

**واژه‌های کلیدی:** پایه مثلثی، پایه تخت، پایه نیم‌دایره، سرریزهای کلیدپیانویی، کلیدهای خروجی

### مقدمه

توانایی بالای سرریزهای کلیدپیانویی در تخلیه جریان یک مزیت عمده این نوع خاص از سرریزهای زیگزاگی می‌باشد. این سرریزها به مخازن سدها این امکان را می‌دهند تا با تراز بالاتری عمل کنند، که خود این موضوع باعث افزایش حجم ذخیره در مخزن می‌شود (۱۰، ۱۱). دو مزیت عمده این سرریزها نسبت به سرریزهای زیگزاگی معمولی شامل کاهش فضای سازه‌ای مورد نیاز برای احداث و ظرفیت بالای تخلیه سیلاب می‌باشد. این ویژگی‌ها اجازه می‌دهد که

این سرریزها به آسانی بر روی تاج بسیاری از سدهای وزنی موجود قابل احداث باشند (۸). همچنین هندسه خاص این سرریز (شیب کلیدها و نسبت عرض کلید ورودی به خروجی و وجود شیروانی‌های بالادست و پایین‌دست) باعث افزایش ظرفیت تخلیه، تا حدود ۴ برابر بیش‌تر از سرریزهای اوجی شده است (۱، ۲، ۷). شکل ۱ نمای سه‌بعدی سرریزهای کلیدپیانویی به همراه پارامترهای مهم سازه‌ای و هیدرولیکی نمایش می‌دهد.



شکل ۱- نمای سه‌بعدی سرریزهای کلید پیانویی به همراه پارامترهای هندسی مهم.

Figure 1. 3D representation of Piano Key weir with special geometrical parameters.

مطابق با شکل ۱ و براساس قرارداد نامگذاری سرریزهای کلیدپیانویی، ضخامت تاج جانبی، ارتفاع سرریز،  $P_d$  ارتفاع سد، عرض کلید خروجی،  $W_i$  عرض کلید ورودی،  $B_i$  طول شیروانی پایین دست،  $B_o$  طول شیروانی بالادست،  $B$  طول بالادست - پایین دست سرریز،  $R$  ارتفاع دیواره‌های سپری،  $W_{II}$  و عرض یک سیکل<sup>۶</sup> می‌باشند. افزایش دبی سیلاب و مسائل مربوط به ایمنی سدها باعث شده است که کمیته بین‌المللی سدهای بزرگ اعلام کند، که سرریز بسیاری از سدهای موجود مجدداً مورد بررسی و در صورت لزوم اصلاح شوند. از بین گزینه‌های موجود، یکی از مناسب‌ترین اقدامات ساخت و اصلاح به‌وسیله سرریزهای کلیدپیانویی است (۷، ۱۰). لمپرییر و همکاران (۲۰۱۱) انواع مختلف سرریزهای کلیدپیانویی را که از سال ۱۹۹۸ توسط مؤسسه Hydrocoop فرانسه مطالعه شده بود را به ۴ شکل مختلف دسته‌بندی نمودند. در تیپ A، شیروانی‌های بالادست و پایین دست وجود دارند؛ تیپ B و C به ترتیب فقط دارای شیروانی‌های بالادست و فقط دارای شیروانی‌های پایین دست هستند و در تیپ D هیچ کدام از شیروانی‌ها وجود ندارند (۹). لمپرییر و اومان (۲۰۰۳)، اولین آزمایش را نوع A و B انجام دادند. ایشان مطالعات خود را در سال ۲۰۰۶ برای پارامترهای بدون بعد مختلف، توسعه دادند؛ که در این بین تأثیر پارامتر بدون بعد  $L/W_{II}$  (که  $L$  طول مؤثر کل سرریز) را به‌عنوان پارامتری مهم در میزان تخلیه سرریز معرفی نمودند (۸). هین و همکاران (۲۰۰۶)، با بررسی سرریز تیپ A، به این نتیجه رسیدند که مقدار  $n=7$  (که  $n$  تعداد سیکل‌های سرریز می‌باشد) برای

مقادیر کم نسبت استغراق  $(H_i/P)$ ، و  $n=5$  و  $6$  برای مقادیر بیش‌تر این نسبت باعث افزایش بازدهی سرریز می‌شود (۵). بارکودا و همکاران (۲۰۰۶)، با بررسی تیپ‌های A و B به این نتیجه رسیدند که  $n=6$  مقدار بهینه تعداد سیکل می‌باشد. همچنین نسبت  $W_i/W_o$  را نیز،  $1/20$  پیش‌بینی نمودند. آن‌ها دریافتند که با افزایش شیب کلیدها از ۲:۱ به ۳:۲ در هر دو تیپ A و B، افزایش راندمان سرریز در حدود ۲۵ درصد می‌باشد (۳). پارالونگ و همکاران (۲۰۱۱)، جزئیات و همچنین نامگذاری پارامترهای مختلف هندسی سرریزهای کلیدپیانویی را ارائه دادند. ۲۴ مشخصه هندسی این سرریز توسط آن‌ها معرفی شد (۱۳). اندرسون و تالیس (۲۰۱۱)، با مقایسه تیپ A و D به این نتیجه رسیدند که وجود شیروانی‌ها اثر مثبتی بر تخلیه جریان دارد، همچنین با بررسی نسبت‌های مختلف،  $\frac{W_i}{W_o}$  (عرض کلید ورودی به عرض کلید خروجی) مقدار  $1/50$  را برای این نسبت عددی بهینه معرفی نمودند. بررسی‌های آن‌ها برای نسبت‌های بیش‌تر و کم‌تر از  $1/50$  نتایج نامطلوبی را بر ضریب تخلیه سرریز نشان داد (۱). لیت‌رییرو و همکاران (۲۰۱۲)، با آنالیز داده‌های آزمایشگاهی موجود ضریب تخلیه‌ای برای سرریزهای کلیدپیانویی ارائه دادند. این ضریب تابعی از نسبت پارامترهای  $\frac{W_i}{W_o}$ ،  $\frac{(L-W)P_i}{WH}$ ،  $\frac{P_0}{P_i}$  و  $\frac{B_i+B_o}{B}$  بود (۱۰، ۱۱). کبیری‌سامانی و جواهری (۲۰۱۲)، با بررسی مدل‌های آزمایشگاهی مختلف به ارائه یک ضریب دبی در حالت جریان آزاد و مستغرق پرداختند (۶). میشلز (۲۰۱۲)، پژوهش جامعی بر روی سرریزهای کلیدپیانویی انجام داد. وی با بررسی پروفیل‌های سرعت، فشار، سطح آب و ساخت مدل‌های آزمایشگاهی به‌صورت غیرمتمقان، در نهایت معادلاتی جهت برآورد دبی کلید ورودی، خروجی و تاج جانبی دست یافت (۱۲). به‌طور کلی

- 1- Outlet Key Width
- 2- Inlet Key Width
- 3- Outlet Overhang
- 4- Inlet Overhang
- 5- Parapet Wall
- 6- Width of one cycle ( $W_u=[W_i+W_o+2T]$ )

نظر گرفته شدند. مقدار پارامتر  $L/W$  بر اساس عرض فلوم و محدودیت در این زمینه و مقدار  $W_i/W_o$  نیز با توجه به بهینه معرفی شده در بیش‌تر منابع از جمله میشلز (۲۰۱۲) در نظر گرفته شد. از طرفی از آنجایی که نوع سرریز در این پژوهش تیپ  $A$  می‌باشد، بنابراین نسبت  $B_i/B_o$  برابر با  $1/0$  می‌باشد. همچنین پارامتر  $Gp_i$ ، معرف شکل هندسی پایه می‌باشد؛ که برای مدل شاهد، پایه تخت، مثلثی و نیم‌استوانه به ترتیب برابر  $Gp_{i0}$ ،  $Gp_{i1}$ ،  $Gp_{i2}$  و  $Gp_{i3}$  معرفی شدند. در نهایت رابطه ۲ مبنای تجزیه و تحلیل‌های داده‌های آزمایشگاهی قرار گرفت.

$$C_{DS} = f\left(\frac{P}{W_u}, \frac{H_t}{P}, Gp_i\right) \quad (2)$$

**تجهیزات آزمایشگاهی:** آزمایش‌ها در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. در کل محدوده تغییرات دبی از ۱ لیتر بر ثانیه تا ۱۳۰ لیتر بر ثانیه متغیر در نظر گرفته شد. فلوم مورد استفاده دارای طول ۱۰ متر، عرض ۸۰ سانتی‌متر، ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر و شیب کف صفر و همچنین، دیواره‌ها از جنس شیشه و کف از نوع فولاد ضدزنگ می‌باشد. به جهت ساختار ویژه فلوم که جهت آزمایش‌های با دبی‌های بالا ساخته شده است، در ابتدا برای آرام نمودن جریان و کنترل نوسانات سطح آب روی سرریز، از یک شبکه لوله موازی همراه با توری فلزی استفاده شد. مدل‌ها به صورت کامل از صفحات پلکسی‌گلاس با ضخامت ۱ سانتی‌متر ساخته شدند. پس از برش لیزری قطعات از چسب قطره‌ای جهت اتصال و از چسب سیلیکون آنتیا به منظور آب‌بندی آن‌ها استفاده شد. جهت قرائت سطح آب از یک عمق‌یاب نقطه‌ای مستقر روی فلوم استفاده شد. از طرفی به دلیل حساسیت در اندازه‌گیری دبی جریان، از

پپچیدگی جریان بر روی سرریزهای کلیدپیانویی و نیز پارامترهای متعدد تأثیرگذار هندسی این سازه، آزمایش‌های گوناگون مدل‌های فیزیکی را می‌طلبد (۷، ۴، ۱۳).

با توجه به مروری بر منابع صورت گرفته مشخص می‌شود تاکنون اثر شکل پایه در راندمان سرریز، کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین در این پژوهش اثر شکل پایه بر هیدرولیک سرریزهای کلیدپیانویی مدنظر قرار گرفته است؛ از این‌رو به منظور بررسی راندمان هیدرولیکی سرریزهای کلیدپیانویی و تأثیر ورود جریان به کلیدهای ورودی از پایه‌هایی به شکل تخت، مثلثی و نیم‌استوانه، در زیرشیروانی‌های بالادست استفاده شد. همچنین به منظور مقایسه نتایج، از مدل شاهد (بدون پایه) نیز بهره گرفته شد.

## مواد و روش‌ها

**تحلیل ابعادی:** بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر دبی خروجی از سرریزهای کلیدپیانویی نشان می‌دهد که می‌توان با تکنیک آنالیز ابعادی پارامترهای بی‌بعد مؤثر بر ضریب تخلیه جریان را به صورت رابطه ۱ تقسیم‌بندی نمود:

$$C_{DS} = f\left(\frac{W_i}{W_o}, \frac{L}{W}, \frac{P}{W}, \frac{H_t}{P}, \frac{B_i}{B_o}, Gp_i\right) \quad (1)$$

در رابطه ۱ پارامتر  $H_t$  متغیر هیدرولیکی و در برگیرنده ارتفاع آب روی تاج و هد معادل انرژی جنبشی (سرعت) در بالادست سرریز می‌باشد. همچنین ضریب دبی ( $C_{DS}$ ) به نحوی معرف عدد فرود و مشخصه هیدرولیکی جریان می‌باشد. از آنجا که در این پژوهش بنابر محدودیت‌های آزمایشگاهی و همچنین از آنجا که تمامی مدل‌ها بر اساس نوع  $A$  ساخته شدند، بنابراین نسبت‌ها  $L/W$ ،  $W_i/W_o$  و  $B_i/B_o$  ثابت و به ترتیب برابر  $4/98$ ،  $1/50$  و  $1/00$  در

با ماندگار شدن جریان عبوری از روی سرریز، ابتدا پروفیل سطح آب از فاصله حدود ۴/۰۰ متری بالادست سرریز برداشت می‌گردید. از طرفی شرایط جریان عبوری به لحاظ آزاد یا مستغرق بودن نیز در هر آزمایش کنترل می‌شد. شرایط مستغرق هنگامی به‌وقوع می‌پیوندد که جریان عبوری از کلیدهای ورودی در اثر تداخل شدید تیغه‌ها باعث پرشدن آنها شود. جدول ۱، برخی از ابعاد اصلی سرریزهای ساخته شده را نشان می‌دهد.

یک دبی سنج آلتراسونیک دیجیتالی استفاده شد که با برداشت ارتفاع آب روی یک سرریز مستطیلی به عرض ۱ متر، مستقر در انتهای فلوم، کنترل می‌گردید. تمام مدل‌های سرریز کلیدپیانویی، با تعداد ۳/۵۰ سیکل ساخته شدند. سرریز کلید پیانویی در فاصله ۲/۵۰ متری از انتهای پایین دست فلوم و تقریباً در فاصله ۵/۵۰ متری از سیستم لوله‌های آرام‌کننده جریان قرار داده شد. اندازه‌گیری‌ها به این صورت انجام می‌شد که پس از تنظیم دبی در یک مقدار مشخص،

جدول ۱- برخی از ابعاد سرریزهای کلید پیانویی ساخته شده.

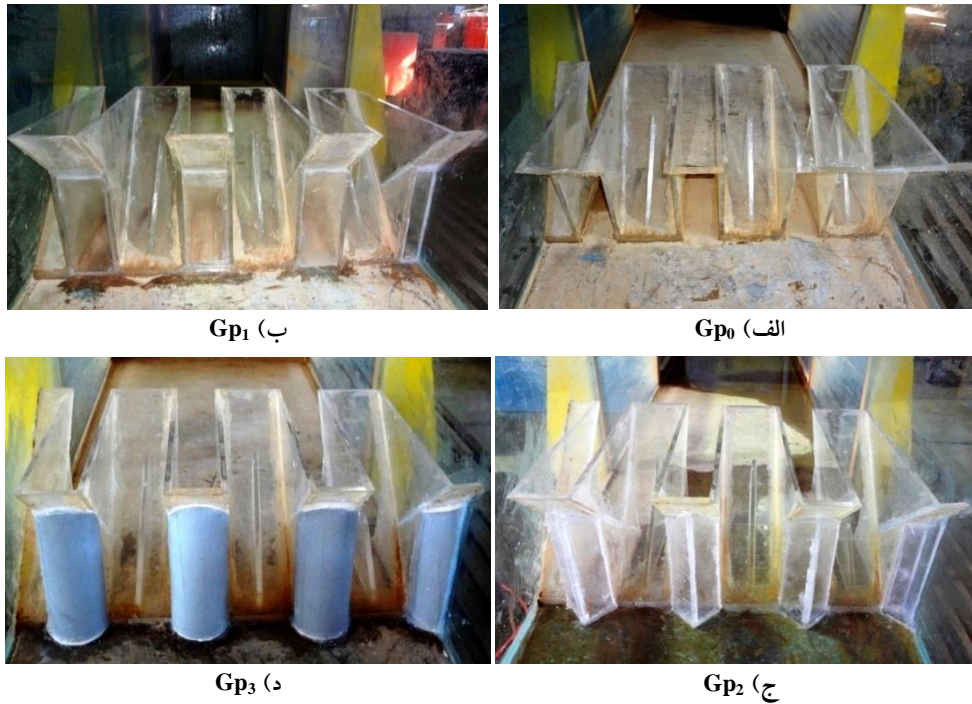
Table 1. Some dimensions of built Piano Key weir.

قطر پایه‌های استوانه‌ای cm	$B_i=B_o$ cm	L cm	P cm	W cm	$W_u$ cm	$W_o$ cm	$W_i$ cm	مدل
Diameter of Cylindrical Pier	$B_i=B_o$ cm	L cm	P cm	W cm	$W_u$ cm	$W_o$ cm	$W_i$ cm	model
8.30	10.75	398	$\frac{30.50}{11.20}$	80.00	22.80	8.30	12.50	$\frac{1}{2}$

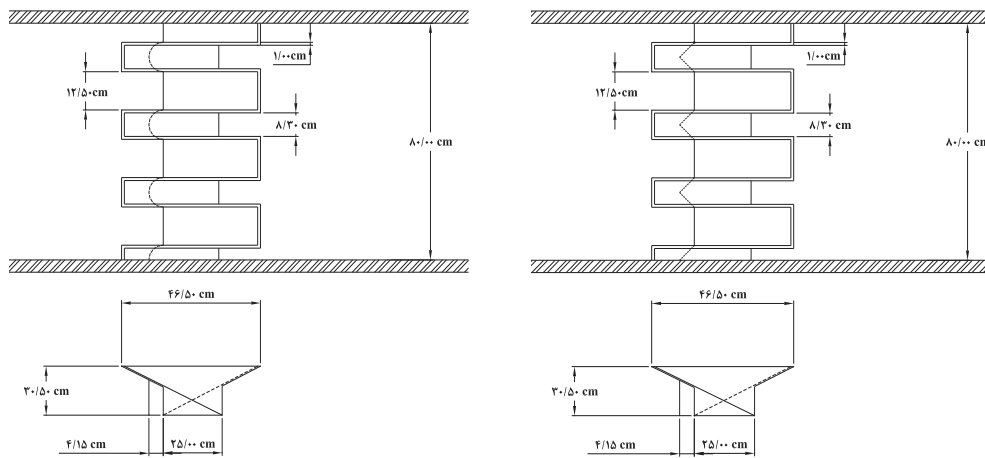
هیدرولیکی صحیح، در یک سمت کلید خروجی و در سمت دیگر کلید ورودی نصف گردید. از طرفی به دلیل این‌که عرض کلید خروجی و ورودی با یکدیگر متفاوت می‌باشد؛ در شکل هندسه سرریز به صورت نامتقارن مشاهده می‌شود. یادآور می‌شود که قطر بیرونی پایه‌های نیم‌استوانه و همچنین قاعده پایه‌های مثلثی، برابر عرض کلیدهای خروجی در نظر گرفته شد. همچنین پایه‌های استوانه‌ای از جنس PVC می‌باشند. پایه‌های مثلثی با اتصال دو قطعه پلکسی‌گلاس به یکدیگر ایجاد شدند. شکل ۳ پلان و پروفیل طولی مدل‌های  $Gp_2$  و  $Gp_3$  را نشان می‌دهد.

بر اساس جدول ۱، مدل ۱ همان مدل سرریز ۳۰ سانتی‌متری و مدل ۲ سرریز ۱۰ سانتی‌متری می‌باشد که ارتفاع دقیق آنها در جدول آورده شده است. برای مدل ۱، نسبت  $P/W_u$ ، ۱/۳۳ و برای مدل ۲، این نسبت، ۰/۵۰، می‌باشد. بنابراین در مدل ۱ نسبت ۱/۳۳، بهینه اقتصادی و در مدل ۲ نسبت ۰/۵۰، بهینه هیدرولیکی می‌باشد (میشلز، ۲۰۱۲). شکل ۲، پایه‌های قرار داده شده زیرشیروانی‌ها بالادست در مدل ۱، نمایان می‌باشند.

مطابق با شکل ۲ و از آنجایی که هندسه سرریز بر اساس مطالعات میشلز (۲۰۱۲) با ۳/۵ سیکل طراحی و ساخته شد، برای رعایت اصول هندسی و



شکل ۲- پایه‌های نصب‌شده زیر کلیدهای خروجی در مدل ۱.  
**Figure 2. Installed piers under outlet keys in model 1.**

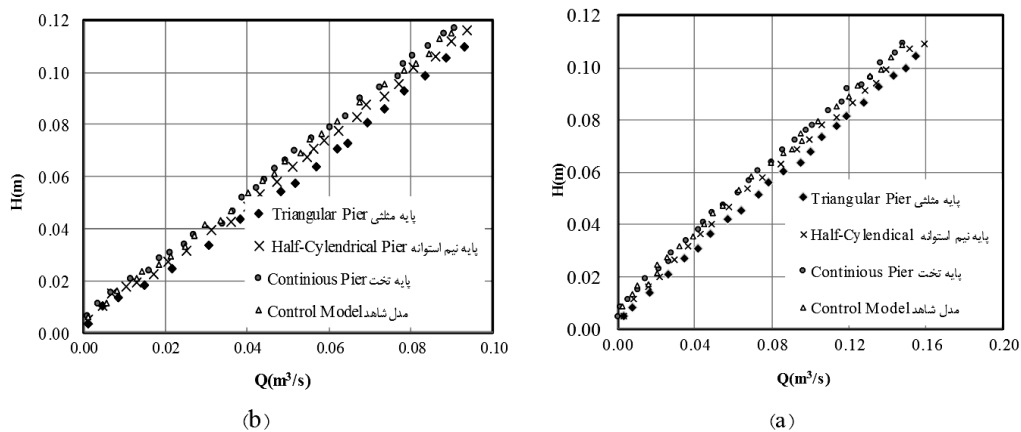


شکل ۳- پلان و مقطع طولی مدل‌های Gp2 و Gp3.  
**Figure 3. Plan and section of Gp2 and Gp3 models.**

منحنی‌های دبی-اشل و ضریب دبی براساس شکل پایه‌ها: شکل ۴ نمودارهای دبی-اشل را برای مدل‌های ۱ و ۲ و نیز تمامی پایه‌های بررسی شده، نشان می‌دهد. در این شکل هد آب بر حسب متر و دبی بر حسب مترمکعب بر ثانیه می‌باشد.

### نتایج و بحث

در این بخش نتایج به‌دست آمده در خصوص شرایط هیدرولیکی هر یک از پایه‌های نصب در زیر کلید خروجی ارائه می‌شود.



شکل ۴- نمودارهای دبی- اشل سرریزهای کلیدپیانویی با پایه‌های مختلف (الف- مدل ۱، ب- مدل ۲).

Figure 4. Discharge-head water Graph of Piano Key weir with various piers (a) Model 1 (b) Model 2.

رابطه ۳ برای هر دو جریان آزاد و مستغرق با تفاوتی که در ادامه به آن اشاره می‌شود صدق بوده و در آن،  $Q$ ، دبی جریان،  $L$ ، طول تاج سرریز،  $H_t$ ، بار کل تیغه جریان روی سرریز شامل بار معادل انرژی جنبشی،  $g$  شتاب ثقل،  $n$  تعداد سیکل و  $C_{DS}$  ضریب تخلیه جریان می‌باشند. شکل‌های ۵ و ۶، ضریب تخلیه جریان ( $C_{DS}$ ) در مقابل نسبت استغراق  $\frac{H_t}{P}$  را نشان می‌دهد. مطابق با شکل‌های ۵ و ۶، در ابتدا با افزایش نسبت استغراق ضریب دبی افزایش یافته است. این موضوع برای هر دو مدل در پایه‌های مختلف مشاهده می‌شود؛ ولی، پس از رسیدن به مقدار اوج ضریب دبی، با افزایش بیش‌تر  $\frac{H_t}{P}$ ، ضریب تخلیه جریان کاهش می‌یابد. این موضوع به دلیل تداخل تیغه‌های جریان و استغراق ورودی سرریز (بالادست تاج جانبی) به وقوع می‌پیوندد.

همان‌طوری که در شکل ۴ نشان داده شده است، صرف‌نظر از شکل پایه‌ها، راندمان مدل ۱، با نسبت  $P/W_u$  برابر  $1/33$ ، بیش‌تر از مدل ۲ (با نسبت  $P/W_u$  برابر با  $0/50$ )، می‌باشد. همچنین به‌ازای هد یکسان، دبی عبوری از سرریز با پایه مثلثی بیش‌تر از سایر شکل‌های بررسی شده است (برای هر دو مدل). همچنین نکته حائز اهمیت دیگری که از نمودارهای فوق برداشت می‌شود، قدرت تنظیم‌کنندگی بالای سطح آب بالادست در سرریزهای کلیدپیانویی است. که این نتیجه را در واقع می‌توان از خطی بودن نمودار دبی- اشل نیز برداشت نمود. جهت مقایسه راندمان هیدرولیکی سرریزهای زیگزاگی و کلیدپیانویی از معادله عمومی سرریزها، رابطه ۳، استفاده می‌شود.

$$Q = \frac{2}{3} C_{DS} \sqrt{2g} L H_t^{1.5} \quad (3)$$

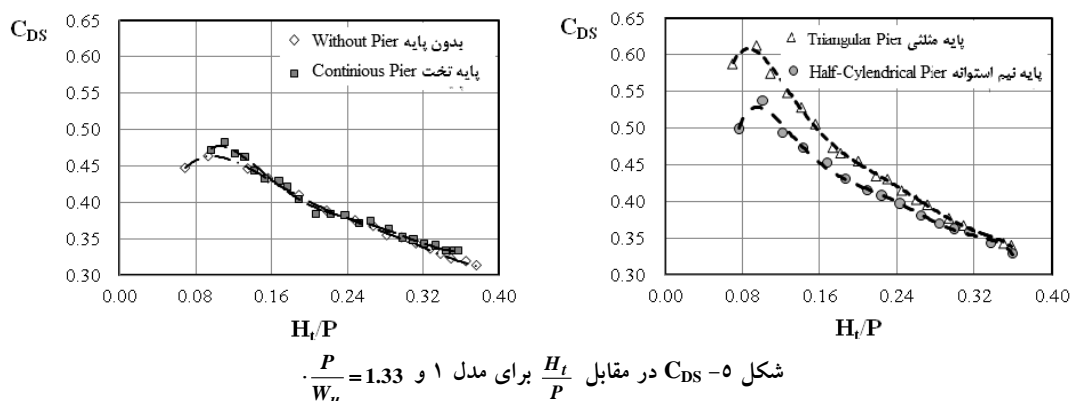


Figure 5. Variation of  $C_{DS}$  versus  $\frac{H_t}{P}$  in model 1 and  $\frac{P}{W_u} = 1.33$ .

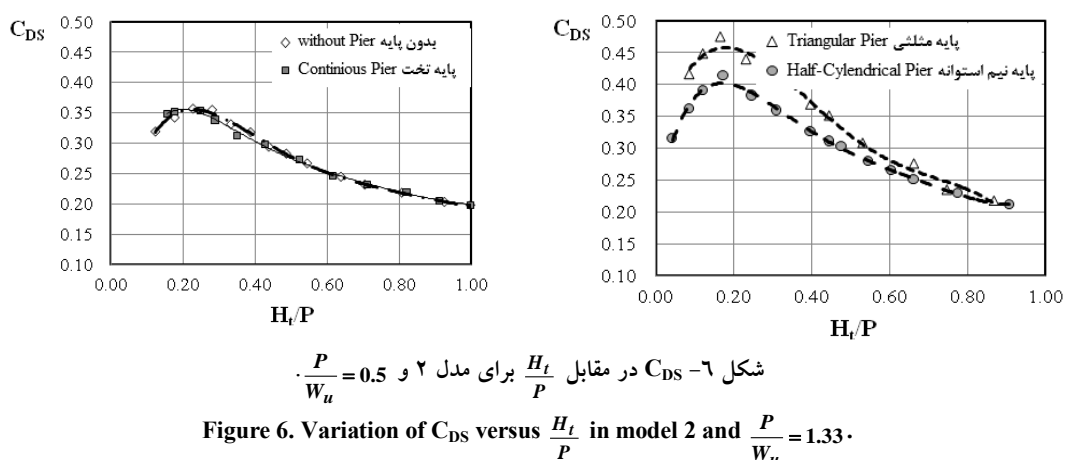


Figure 6. Variation of  $C_{DS}$  versus  $\frac{H_t}{P}$  in model 2 and  $\frac{P}{W_u} = 1.33$ .

انرژی کم‌تری به وقوع می‌پیوندد. از این‌رو در مدل‌های ۱ و ۲، بیشینه ضریب دبی محاسبه شده نسبت به حالت تخت و بدون پایه به ترتیب ۱۵ و ۱۷ درصد بیش‌تر است. از طرفی در مدل مثلثی به دلیل جداشدگی حداقل خطوط جریان از پایه‌ها، اختلاف فشار هیدرواستاتیکی ناچیز بوده و افت انرژی ناچیزی در بدو ورود جریان به سرریز ایجاد می‌شود. این عمل باعث می‌شود که این حالت سرریز از سایر حالات، راندمان بیش‌تری داشته و ضریب دبی آن برای مدل ۱، ۱۳ درصد و برای مدل ۲، ۱۵ درصد از پایه استوانه بیش‌تر باشد. همچنین بیشینه ضریب دبی پایه مثلثی نسبت به حالات بدون پایه و پایه تخت به ترتیب برای مدل ۱ و مدل ۲، ۳۰ و ۳۴ درصد بیش‌تر می‌باشد. جدول ۲، مقادیر بیشینه ضریب دبی را برای تمامی مدل‌ها و انواع پایه‌ها در برابر نسبت  $\frac{H_t}{P}$  نشان می‌دهد.

شکل‌های ۵ و ۶ به نحوی بیانگر بازدهی سرریزهای کلیدپیانویی در هدهای کم آب نیز می‌باشد. همچنین می‌توان به این نکته نیز اشاره داشت که، راندمان پایه مثلثی بیش‌تر از نیم‌استوانه و نیم‌استوانه بیش‌تر از پایه تخت می‌باشد. از طرفی تفاوت چشم‌گیری میان پایه تخت و مدل شاهد (بدون پایه) مشاهده نمی‌گردد. در پایه تخت و بدون پایه به دلیل این‌که خطوط جریان در محل برخورد با پایه به نقطه سکون می‌رسند، بخش زیادی از انرژی جنبشی به انرژی پتانسیل مبدل گشته و باعث مقداری افزایش عمق آب در نزدیکی پایه‌ها خواهند شد. از آنجایی‌که هر دو مدل یاد شده همانند یکدیگر عمل می‌نمایند، بنابراین اختلاف اندکی در ضریب تخلیه جریان دیده می‌شود. این در حالی است که در پایه استوانه‌ای از نظر هیدرودینامیکی خطوط جریان به صورت تدریجی دارای انحنا گشته و افت



جدول ۲- مقادیر بیشینه ضریب دبی با توجه به شکل پایه‌ها.

**Table 2. The maximum of discharge coefficient affect of piers shape.**

(C <sub>DS</sub> )	(H <sub>t</sub> /P)	شکل پایه‌ها	پارامتر معرف	مدل آزمایشگاهی
(C <sub>DS</sub> )	(H <sub>t</sub> /P)	Pier Shape	Identification Parameter	Experimental Model
0.46	0.10	بدون پایه Without Pier	Gp <sub>0</sub>	1 ( $\frac{P}{W_u} = 1.33$ )
0.48	0.11	پایه تخت Continues Pier	Gp <sub>1</sub>	
0.61	0.09	پایه مثلثی Triangular Pier	Gp <sub>2</sub>	
0.54	0.10	پایه نیم‌استوانه Half cylindrical pier	Gp <sub>3</sub>	
0.35	0.25	بدون پایه Without Pier	Gp <sub>0</sub>	2 ( $\frac{P}{W_u} = 0.5$ )
0.35	0.25	پایه تخت Continues Pier	Gp <sub>1</sub>	
0.47	0.16	پایه مثلثی Triangular Pier	Gp <sub>2</sub>	
0.41	0.17	پایه نیم‌استوانه Half cylindrical pier	Gp <sub>3</sub>	

می‌باشد. لازم به توضیح است که در پژوهش ایشان تمامی آزمایش‌ها به صورت بدون پایه انجام شده است. بنابراین با در نظر گرفتن پایه مثلثی (پژوهش حاضر) با یک نسبت عرض کلید ورودی به خروجی ثابت (برابر با ۱/۵) امکان افزایش ضریب تخلیه تا حدود ۱۷ درصد وجود دارد.

### نتیجه‌گیری

نتایج نشان می‌دهد که تفاوت چشم‌گیری بین پایه تخت و سرریز بدون پایه وجود ندارد. به نحوی که متوسط بیش‌ترین ضریب تخلیه جریان، C<sub>DS</sub>، در مدل ۱، (با نسبت  $P/W_u$  برابر با ۱/۳۳)، برای پایه تخت و مدل بدون پایه، برابر ۰/۴۷ و در نسبت استغراق H<sub>t</sub>/P حدود ۰/۱ می‌باشد. همچنین برای مدل ۲، (با نسبت

مطابق با این جدول و توضیحات ارائه شده در بندهای قبلی، ملاحظه می‌شود که بیش‌ترین ضریب دبی مربوط به پایه مثلثی است. این ضریب برای مدل ۱ (با پایه مثلثی) برابر ۰/۶۱ و برای مدل ۲ با همان پایه برابر ۰/۴۷ به دست آمد. همچنین سایر ضرایب در این جدول مؤید نمودارهای ارائه شده در شکل‌های ۵ و ۶ می‌باشند. در مقایسه با پژوهش سایر پژوهشگران می‌توان به پژوهش اندرسون (۲۰۱۱) برای هندسه کلیدپیانویی با نسبت‌های  $W_i/W_o$  برابر ۰/۶۷، ۰/۸۰، ۱/۰، ۱/۲۵ و ۱/۵۰ اشاره نمود. در پژوهش وی تغییرات ضریب تخلیه در مقابل نسبت استغراق بررسی شده است. مطالعات وی نشان می‌دهد که حداکثر مقدار ضریب تخلیه در حدود ۰/۵۲ برای نسبت  $W_i/W_o = 1/5$  در نسبت استغراق حدود ۰/۱

۰/۴۱ و در  $H_t/P$  برابر با ۰/۱۷ مشاهده شده است. همچنین به طور کلی پایه مثلثی در هر دو مدل ۱ و ۲، بیش‌ترین بازدهی در بین همه پایه‌های بررسی شده داراست. بیشینه ضریب دبی برای پایه مثلثی در مدل ۱، ۰/۶۱ (در نسبت  $H_t/P$  برابر با ۰/۰۹) و برای مدل ۲، ۰/۴۷ (در  $H_t/P$  برابر با ۰/۱۶) می‌باشد.

$P/W_u$  برابر با ۰/۵)، این ضریب ۰/۳۵ و در  $H_t/P$  برابر با ۰/۲۵ اتفاق می‌افتد. علاوه بر نتیجه فوق مشاهده شد که پایه نیم‌استوانه‌ای دارای راندمان بیش‌تری نسبت به پایه‌های تخت و سرریز بدون پایه می‌باشد. به‌نحوی که بیش‌ترین ضریب تخلیه جریان،  $C_{DS}$  در مدل ۱، برای پایه نیم‌استوانه‌ای، برابر ۰/۵۴ و در نسبت استغراق ۰/۱ و برای مدل ۲، این ضریب

### منابع

1. Anderson, R.M., and Tullis, B. 2011. Influence of Piano Key weir geometry on discharge. Proc. Intl. Conf. Labyrinth and Piano Key Weirs, Liège B, 75-80. CRC Press, Boca Raton FL.
2. Anderson, R.M., and Tullis, B. 2012. Comparison of Piano Key and rectangular Labyrinth weir hydraulics. J. Hydr. Engin. 138: 4. 358-361.
3. Barcouda, M., Cazaillet, O., Cochet, P., Jones, B.A., Lacroix, S., Laugier, F., Odeyer, C., and Vigny, J.P. 2006. Cost effective increase in storage and safety of most dams using fuse gates or Piano Key weirs. Proc. 22<sup>nd</sup> ICOLD congress, CIGB/ICOLD, Barcelona, Spain.
4. Cicero, G.M., Menon, J.M., Luck, M., and Pinchard, T. 2011. Experimental study of side and scale effects on hydraulic performances of a Piano Key weir. Proc. Intl. Conf. Labyrinth and Piano Key Weirs, Liège B, 167-172. CRC Press, Boca Raton FL.
5. Hien, T.C., Son, H.T., and Khanh, M.H.T. 2006. Results of some Piano Key weirs hydraulic model tests in Vietnam. Proc. 22<sup>nd</sup> ICOLD congress, CIGB/ICOLD, Barcelona, Spain.
6. Kabiri-Samani, A., and Javaheri, A. 2012. Discharge coefficient for free and submerged flow over Piano Key weirs. J. Hydr. Res. 50: 1. 114-120.
7. Laugier, F., Lochu, A., Gille, C., Leite Ribeiro, M., and Boillat, J.L. 2009. Design and construction of a labyrinth PKW spillway at St-Marc Dam. J. Hydropower Dams. 15: 5. 100-107.
8. Lempérière, F., and Ouamane, A. 2003. The Piano Keys weir: a new cost-effective solution for spillways. J. Hydropower Dams. 10: 5. 144-149.
9. Lempérière, F., Vigny, J.P., and Ouamane, A. 2011. General comments on Labyrinth and Piano Key weirs: The past and present. Proc. Intl. Conf. Labyrinth and Piano Key Weirs, Liège B, 17-24. CRC Press, Boca Raton FL.
10. Leite Ribeiro, 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.
11. Leite Ribeiro, M., Pfister, M., Boillat, J.L., Schleiss, A.J., and Laugier, F. 2012. Piano key weirs as efficient spillway structure. Proc. 24<sup>th</sup> ICOLD congress on Large Dams, Kyoto, Japan, Q.94, R.13.
12. Machiels, O. 2012. Experimental study of the hydraulic behavior of Piano Key weirs. PhD Thesis ULgetd, University of Liège (B).
13. Pralong, J., Vermeulen, J., Blancher, B., Laugier, F., Erpicum, S., Machiels, O., Piroton, M., Boillat, J.L., Leite Ribeiro, M., and Schleiss, A.J. 2011. A naming convention for the Piano Key weirs geometrical parameters. Proc. Intl. Conf. Labyrinth and Piano Key Weirs, Liège B, 271-278. CRC Press, Boca Raton FL.



Gorgan University of Agricultural  
Sciences and Natural Resources

*J. of Water and Soil Conservation, Vol. 23(2), 2016*  
<http://jwsc.gau.ac.ir>

## Effect of piers geometric on the hydraulic properties of Piano Key weirs

\*J. Ahadiyan<sup>1</sup> and A.R. Afzalian<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Associate Professor of the Department of Hydraulics Structures, Water Engineering, and Environmental Issues Faculty, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran,

<sup>2</sup>M.Sc. Student at Department of Hydraulics Structures, Water Engineering, and Environmental Issues Faculty, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Received: 01.02.2015; Accepted: 11.08.2015

### Abstract

**Background and Objectives:** Piano Key weirs (PKW) are used in spillway of dams and regulating structures in irrigation and drainage network because of increasing the discharge efficiency. In the present study, the effect of geometric shape of piers, where are placed under outlet keys, have been evaluated on hydraulic efficiency. These structures increase the water level and water storage volume in the reservoirs of dam. In the previous study physical model has been used to extract discharge coefficient of Piano key weirs without any research on pier shape. Also some dimensionless relationships have been derived for discharge coefficient.

**Materials and Methods:** To achieve these purposes two weirs built with the ratio of height to width of one cycle,  $P/W_u$ , 1.33 (Model 1) and 0.50 (Model 2). As a comparison to the hydraulic efficiency the different piers were constructed including of continues, Triangular, half cylindrical and without piers. However, eight models were made and the hydraulics experiments with various discharges were performed. Both of the free and submergence flow on the weirs could be considered with the variation of discharge. The minimum and maximum discharge in all of experiments were 1 L/S and 130 L/S, respectively. The Weber Number as surface tension was controlled in the minimum of discharge. All of tests were performed at a flume with 0.8 m width and 12 m length in physical and hydraulical models laboratory of Shahid Chamran University (SCU).

**Results:** Generally, the results of this study showed that hydraulic discharge efficiency in model 1 with  $P/W_u=1.33$  is more than model 2 with  $P/W_u=0.5$ . So this condition is independent of piers shape. However, discharge of weir with triangular pier was more than the other states in the same heads of both models. In addition, the results of analysis of experiments in both models showed that head-discharge curve of weirs is linear trend which specifies this structure and have an appropriate regulating of upstream water level. The general discharge equation of weirs was used for hydraulic efficiency analysis. In this stage results showed that the hydraulic efficiency of triangular pier is more than other piers. In addition, the half cylindrical piers is placed at second rank and there are no significant difference between continues and without piers. The streamlines with smooth trends become curved at the half cylindrical pier and friction head losses decreased. Hence, the maximum of measured discharge coefficients in models 1 and 2 are more than continues and without any piers, 15 and 17 percents, respectively.

**Conclusions:** Using the piers with various forms has a significant effect on the efficiency of the discharge Piano Key weirs. So that the maximum discharge coefficients are 0.61, 0.54, 0.48 and 0.46 for triangular, half cylindrical, continues and without piers at model 1, respectively. However, these coefficients obtained in the constant  $H_t/P$  ( $H_t$  is upstream head water and  $P$  is weir height) which was about 0.1.

**Keywords:** Triangular pier, Continuous pier, Semi-circular pier, Piano Key weir, Outlet keys

---

\* Corresponding Author; Email: ja\_ahadiyan@yahoo.com & j.ahadiyan@scu.ac.ir

