

## بررسی آزمایشگاهی ضریب شدت جریان در سرریزهای کلید پیانویی دو سیکل

بیژن کمایی عباسی<sup>۱</sup>، سعیدرضا خداشناس<sup>۲\*</sup>، محمد حیدرنژاد<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۸/۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۲۱

### چکیده

سرریز کلید پیانویی حالت توسعه یافته سرریزهای غیرخطی است که ظرفیت تخلیه دبی بسیار بالایی دارد. با توجه به افزایش طول موثر و به دنبال آن افزایش راندمان تخلیه در این گونه سرریزها می‌توان از آن‌ها در سرریز سدها و یا سازه‌های تنظیم آب استفاده نمود. در این تحقیق که بر روی سرریزهای دوسیکل کلید پیانویی با دماغه مثلثی انجام شده، آزمایشات متعددی برای تعیین تاثیر پارامترهای هندسی نسبت عرض کلید ورودی به کلید خروجی سرریز ( $W_i/W_o$ ) و نسبت طول سرریز به طول شیروانی پایین دست ( $B/B_i$ ) بر ضریب شدت جریان، انجام گردید. نتایج نشان داد که با افزایش بار هیدرولیکی، ضریب شدت جریان ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش نسبت عرض کلید ورودی به کلید خروجی از ۰/۸ تا ۱/۲۵ ضریب جریان در سرریز کلید پیانویی به مقدار ۲۶ درصد افزایش یافت. استفاده از دماغه مثلثی بر ضریب شدت جریان تاثیر مثبت داشته و مقایسه با تحقیقات سایر محققین نشان داد که رابطه بدست آمده از این تحقیق خطای کمتری نسبت به سایر روابط دارد.

**واژه‌های کلیدی:** سرریز کلید پیانویی، ضریب شدت جریان، مدل هیدرولیکی، نسبت عرض کلید ورودی به کلید خروجی

### مقدمه

بر هیدرولیک سرریزهای کلید پیانویی سبب گردیده تا در مطالعات، طراحی و کاربرد این گونه سرریزها در سطح وسیعی از مدل‌های فیزیکی استفاده شود. انتظار می‌رود در سرریزهای کلید پیانویی، بازدهی ظرفیت تخلیه با تغییر هندسی در طول آن تغییر یابد. اما به دلیل تداخل جریان در قسمت خروجی سرریز، ضریب جریان کمتری از سرریز خطی با طول یکسان خواهند داشت (Hay and Taylor, 1970). یک راه حل مناسب، طراحی سرریز کلید پیانویی است. سرریزهای کلید پیانویی شکل جدیدی از سرریزهای زیگراگی هستند که توسط موسسه هیدرو کوپ<sup>۴</sup> فرانسه و آزمایشگاه هیدرولیک و محیط زیست دانشگاه بیسکرا<sup>۵</sup> الجزایر مورد بررسی قرار گرفتند (Laugier, 2007). از جمله مزیت‌های سرریزهای کلید پیانویی می‌توان به مواردی همچون: افزایش ظرفیت مخزن، قابلیت احداث روی سدها و کانال‌های موجود، افزایش دبی عبوری از سرریز تا ۱۰۰ مترمکعب بر ثانیه، ۴ برابر بودن دبی عبوری از این سرریزها نسبت به سرریزهای معمولی و در نهایت دارا بودن صرفه اقتصادی بالا و هزینه نگهداری کمتر اشاره نمود (Anderson and Tullis, 2011). شکل ۱ سرریز کلید پیانویی دو سیکل را به همراه پارامترهای آن نشان می‌دهد.

تخلیه آب از سرریزها معمولاً با دو مشکل اساسی، خطر ناکافی بودن ظرفیت تخلیه سرریز و اثرات مخرب رسوب‌گذاری همراه است. گزارش‌های اعلام شده از خرابی سدها نشان می‌دهند که یک سوم از خرابی سدها بر اثر کم بودن ظرفیت تخلیه سرریزها رخ داده است (کریمی چهارطاقی و همکاران، ۱۳۹۳). به همین دلیل ICOLD<sup>۶</sup> توصیه کرده که سرریزهای سدهای بلند برای اطمینان از امنیت آن‌ها مورد بررسی قرار گیرند. به همین دلیل باید برای طراحی سرریز، سیلاب‌ها با دوره بازگشت بزرگ‌تر در نظر گرفت که این امر سبب افزایش عرض سرریز و به تبع آن بالا رفتن قیمت ساخت سرریز می‌شود. همچنین در رودخانه‌ها و کانال‌ها به علت محدودیت عرض، استفاده از سرریزهای مستقیم با مشکل روبرو می‌شود. محققین با انجام مطالعات متعدد به این نتیجه رسیدند، برای دست‌یابی به سازه‌ای اقتصادی با کارایی بالا، سرریزها باید به صورت غیرخطی (کنگره‌ایی) ساخته شوند. پیچیدگی الگوی جریان و تاثیر عوامل مختلف و نامعین

۱- دانشجوی دکتری رشته مهندسی آب - سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

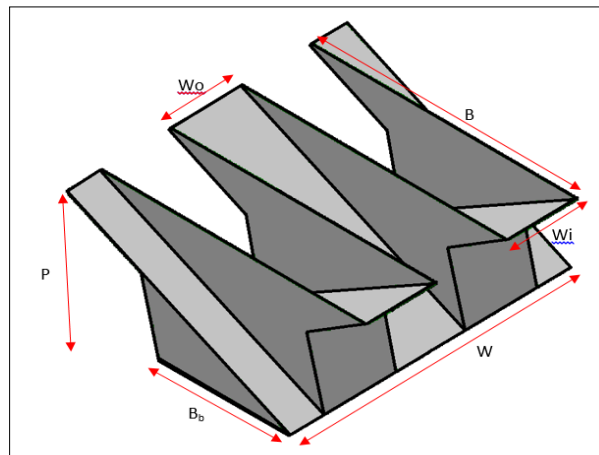
۳- استادیار گروه مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز

\*- نویسنده مسئول: (Email: khodashenas@ferdowsi.um.ac.ir)

4- International Commission On Large Dams

5- Hydrocoop

6- Biskra



شکل ۱ - سرریز کلیدپیانویی به همراه پارامترهای آن (تحقیق حاضر)

سرریزهای کلید پیانویی بهره گرفتند. نتایج حاصل از تحقیق آن‌ها نشان داد که حساسیت به استغراق در سرریزهای زیگزاگی دوزنقه‌ای و مستطیلی نسبت به کلید پیانویی و سرریز زیگزاگی مثلثی بیش‌تر است اما سرریز زیگزاگی مثلثی راندمان هیدرولیکی کم‌تری دارد. ریبریو و همکاران به مطالعه بر روی سرریزهای کلید پیانویی پرداختند. آن‌ها در نهایت با ارایه ضرایب کاهشی و مقایسه رابطه عمومی سرریزها، ضریبی را برای جریان تعریف کردند. در رابطه آن‌ها ضریب جریان به نسبت طول کل تاج به عرض کل تاج  $(L-W/WH)$ ، نسبت عرض کلید ورودی به خروجی  $(W_i/W_o)$ ، نسبت ارتفاع کلید خروجی به ورودی  $(P_o/P_i)$ ، نسبت بین شیروانی‌های بالادست و پایین‌دست با طول پایه سرریز  $(B_o+B_i/B)$  و ارتفاع پاراپت وال  $(R_o/R_i)$  بستگی داشت. طبق تحقیقات ایشان از رابطه ۱ می‌توان ضریب دبی سرریز کلید پیانویی را بدست آورد (Ribeiro et al., 2011)

$$C_d = 1 + 0.24 \left( \frac{L-W}{WH} P_i \right)^{0.9} \left( \frac{W_i}{W_o} \right)^{0.05} \left( \frac{P_o}{P_i} \right)^{0.25} + \left( \frac{R_o}{R_i} \right)^2 \left( 0.3 + \frac{B_o+B_i}{B} \right)^{-0.05} \quad (1)$$

همچنین ریبریو و همکاران (۲۰۱۱) بیان داشتند که بیش‌ترین راندمان سرریز در نسبت عرض کلید ورودی به خروجی با مقادیر بزرگ‌تر از ۱ صورت می‌گیرد که در همین راستا موثرترین بخش در نسبت ذکر شده را کلید ورودی سرریز دارا می‌باشد. جواهری و کبیری سامانی (۱۳۹۱) برای تعیین تاثیر پارامترهای هندسی و هیدرولیکی موثر بر ضریب دبی جریان در سرریزهای کلید پیانویی، آزمایشات متعددی بر روی ۲۰ مدل آزمایشگاهی با هندسه متفاوت انجام دادند. در تحقیق آن‌ها تاثیر پارامترهای هندسی موثر شامل طول سرریز  $(L)$ ، عرض یک سیکل سرریز  $(w)$ ، ارتفاع بار هیدرولیکی در بالادست سرریز  $(H)$ ، ارتفاع سرریز  $(P)$ ، عرض دهانه ورودی  $(W_i)$  و خروجی  $(W_o)$ ، طول کل دیواره سرریز  $(B)$ ، طول شیروانی

تاکنون مطالعات کمی بر روی سرریز کلید پیانویی صورت گرفته است. اومانه و لمپرییر (۲۰۰۶) و های و همکاران (۲۰۰۶) نشان دادند که اگر دهانه ورودی بزرگ‌تر از دهانه خروجی در نظر گرفته شود، باعث افزایش دبی عبوری سرریز می‌شود مطالعات آزمایشگاهی امانه و لمپرییر نشان داد که در سرریزهای کلید پیانویی دو نوع جریان وجود دارد. در نوع اول، کلید ورودی، جریان‌های نزدیک شونده را به سمت خود کشیده و مشابه سرریزهای لبه تیز با بدنه شیب‌دار، جریان از روی تاج ورودی بصورت ریزشی به سمت پایین‌دست تخلیه می‌شود. در نوع دوم، بر روی کلیدهای خروجی شکل می‌گیرد. در این حالت، جریان عبوری از روی تاج خروجی، مشابه یک جت به سمت پایین‌دست بخش شیب‌دار کلید، تخلیه می‌شود (Ouamane and Lemperiere., 2006). گبهاردت و همکاران (۲۰۱۷) به مقایسه سرریزهای جانبی و زیگزاگی در رودخانه ایلمونا پرداختند. آنان رابطه دبی اشل را برای سرریزهای جانبی و سرریزهای زیگزاگی دوزنقه‌ای، مستطیلی و مثلثی بصورت تجربی برای شرایط جریان آزاد و مستغرق مورد ارزیابی قرار دادند. براساس نتایج حاصل از این تحقیق، سرریز زیگزاگی به دلیل داشتن طول تاج بیش‌تر می‌تواند جریان بیش‌تری را به ازای بار هیدرولیکی کم‌تر عبور دهد و در مقابل، هد بالادست سرریز زیگزاگی در مواقع سیلابی بیش‌تر از یک سرریز جانبی است. ضمن آن‌که سرریز جانبی در شرایط جریان مستغرق بهتر عمل می‌کند. لی دیوسن و همکاران (۲۰۰۹) با انجام مطالعاتی بر روی سرریزهای کلید پیانویی بیان داشتند که استفاده از عرض بیش‌تر برای کلید ورودی نسبت به کلید خروجی موجب بهبود عملکرد هیدرولیکی این سرریزها می‌شود. بلزنر و همکاران (۲۰۱۷) به مطالعه سرریزهای کلید پیانویی و زیگزاگی با در نظر گرفتن شرایط جریان آزاد و مستغرق این سرریزها در آبراه آلمان پرداختند. آنان در تحقیق خود از مدل فیزیکی سرریزهای زیگزاگی مستطیلی، مثلثی و دوزنقه‌ای و

عرض ۰/۶ متر و ارتفاع ۰/۶ متر انجام شد. دیواره‌های فلوم شفاف و از جنس شیشه بوده و در نتیجه پروفیل سطح آب و شرایط جریان قابل مشاهده بود. مخزن تامین آب فلوم، دبی سنج دیجیتالی به‌منظور اندازه‌گیری دبی جریان با دقت ۰/۲ لیتر در ثانیه، آرام کننده جریان ورودی به فلوم، الکترو پمپ شناور آب با دبی حداکثر ۴۰ لیتر در ثانیه، هد تانک با هد ثابت از تجهیزات مورد استفاده در این فلوم بود. کف فلوم به صورت بستر ثابت و افقی (با شیب صفر) در نظر گرفته شد. شکل ۲- پلان و پروفیل طولی فلوم آزمایشگاهی در تحقیق را نشان می‌دهد.

جریان آب ابتدا توسط پمپ از مخزن زمینی به سمت تانک هوایی هدایت و سپس از طریق لوله، آب به ابتدای فلوم حرکت کرده و در این محل که توسط شیر فلکه کنترل شد، جریان به آرامی و با دبی کم وارد کانال شده و از روی سرریز که در بستر فلوم نصب شده بود، عبور کرد و با تغییر در میزان دبی، شرایط هیدرولیکی گذرنده از سرریز (بالادست سرریز، روی سرریز و پایین دست سرریز)، بررسی و ثبت گردید و در نهایت جریان آب پس از عبور از سرریز از طریق کانال پایین دست، وارد مخزن پمپاژ شده و دوباره به چرخه باز گشت. سرریز کلید پیانویی با دبی‌های مختلف در نسبت عرض‌های کلید متفاوت، مورد آزمایش قرار گرفت. سرریزهای مورد استفاده در این تحقیق از جنس پلکسی گلاس بودند (شکل ۳).

مطالعات نشان داد که اثر استغراق سرریزهای کلید پیانویی نیز شبیه سرریزهای مستقیم می‌باشد، بدین ترتیب که اگر عمق آب پایین دست از ارتفاع تاج تجاوز نکند، تاثیری روی عملکرد سرریز نخواهد داشت و تنها در صورتی که عمق پایاب بیش تر از ارتفاع تاج گردد، میزان آب‌گذری شروع به کاهش می‌کند. باید توجه داشت که استفاده از سرریزهای کلید پیانویی در شرایط استغراق شدید توصیه نمی‌گردد (Tullis et al., 2007). مطالعات فالوی و تریل (1995) بر روی فیوزگیت‌ها نتایج مشابهی داشت. همچنین های و تیلور توصیه کردند که از طرح سرریزهای کلید پیانویی در شرایط استغراق شدید اجتناب گردد (Hay and Taylor., 1970). اندرسون و تولیس پارامترهای مهم در طراحی سرریز کلید پیانویی را مطابق شکل ۴ معرفی کردند.

این پارامترها عبارتند از: w عرض هر سیکل، p ارتفاع سرریز، L طول کل سرریز، t ضخامت سرریز، B طول سرریز، B<sub>i</sub> طول شیروانی پایین دست (B<sub>i</sub>=B<sub>o</sub>)، W<sub>i</sub> عرض کلید ورودی و W<sub>o</sub> عرض کلید خروجی (Anderson and Tullis., 2011).

پایین دست (B<sub>i</sub>) و طول شیروانی بالادست (B<sub>o</sub>) بر ضریب دبی عبوری از سرریز کلید پیانویی بررسی شد. در نهایت با استفاده از معادله عمومی سرریزها، معادله‌ای که کمترین خطا را دارا بود، به عنوان بهترین رابطه برای تعیین ضریب دبی سرریز در حالت جریان آزاد بدست آمد که بصورت معادله ۲ بود.

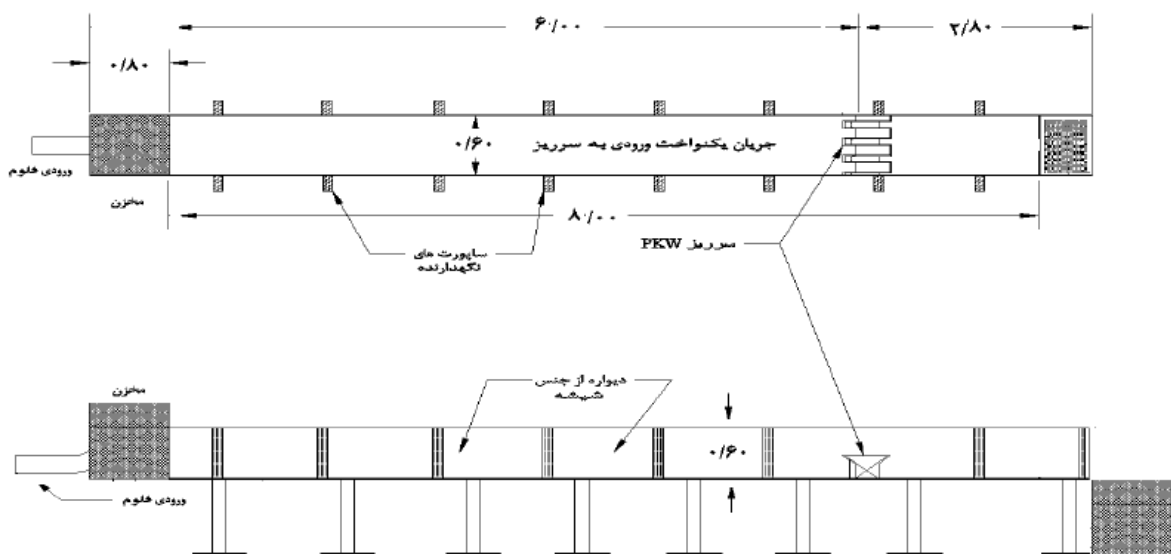
$$\left[ \left( \frac{W_i}{W_o} \right)^{0.426} \left( \frac{B_o}{B_i} \right)^{0.306} \text{EXP} (1.504 \frac{B_o}{B_i} + 0.093 \frac{B_i}{B_o}) \right] + 0.606$$

$$C_d = 0.212 \left( \frac{H}{P} \right)^{-0.675} \left( \frac{L}{W} \right)^{0.377} \quad (2)$$

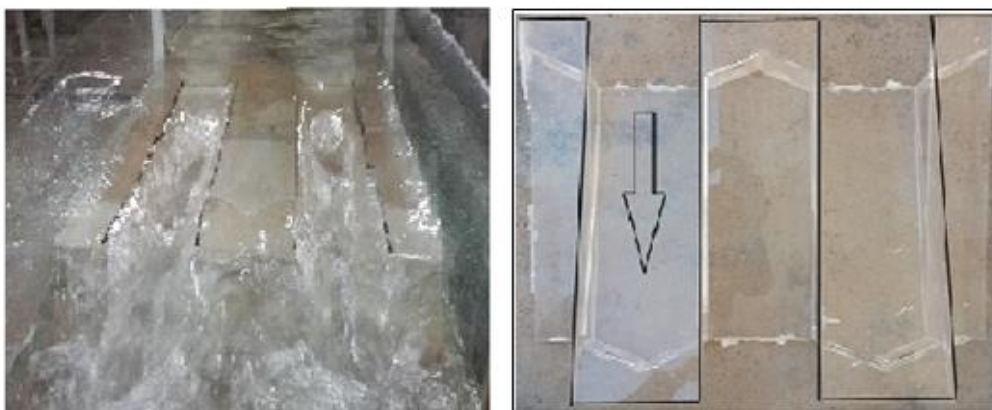
اندرسون و تولیس (۲۰۱۳) آزمایشاتی با نسبت‌های مختلف عرض کلید ورودی به خروجی (۱/۵، ۱/۲۵، ۱، ۰/۸ و ۰/۶۵) انجام دادند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد در مقدار بهینه نسبت (W<sub>i</sub>/W<sub>o</sub>=1.25) حداکثر ضریب شدت جریان حدود ۰/۵۴ می‌باشد. احمدی و همکاران (۱۳۹۳) به مطالعه عددی هیدرولیک جریان در Flow 3D پرداختند. روند تغییرات ضریب دبی به ازای نسبت‌های مختلف بار هیدرولیکی را دنبال کردند. نتایج حاصل از مدل عددی آن‌ها نشان داد محدوده بهینه (W<sub>i</sub>/W<sub>o</sub>) برای ضریب جریان تقریباً بین ۱/۲۵ تا ۱/۵ است. در این محدوده، نتایج نزدیک به هم بوده و این امر ناشی از تعادل و موازنه بین نسبت عرض کلید ورودی به خروجی با رابطه ظرفیت هیدرولیکی بود. مهبودی و همکاران (۱۳۹۳) به بررسی آزمایشگاهی ضریب دبی برای سرریزهای کلید پیانویی پرداختند. ایشان به مقایسه ضریب دبی در دو سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای و مستطیلی پرداختند و نتایج نشان داد که سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای کارایی بهتری نسبت به سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی دارند. دابلینگ (۲۰۱۴) به بررسی آزمایشگاهی تاثیر استغراق در پایین دست سرریز کلید پیانویی پرداخت. نتایج نشان داد که در استغراق‌های کم، سرریز کلید پیانویی نسبت به سرریز زیگزآگی عملکرد بهتری دارد و در استغراق‌های بالا، سرریز زیگزآگی نسبت به سرریز کلید پیانویی عملکرد بهتری دارد (Dabling, 2014). با وجود مطالعاتی که تاکنون در این زمینه صورت گرفته است، هنوز برای دستیابی به یک معادله مناسب که بتواند ضریب شدت جریان را تعیین نماید نیاز به تحقیقات بیش تری است. هدف اصلی این تحقیق بررسی ضریب جریان، تحت تاثیر تغییر نسبت عرض کلید ورودی به کلید خروجی و بدست آوردن بهترین ضریب دبی برای سرریزهای کلید پیانویی در حالت جریان آزاد است. همچنین اثر دماغه مثلثی بر ضریب شدت جریان نیز مورد بررسی قرار گرفت.

## مواد و روش‌ها

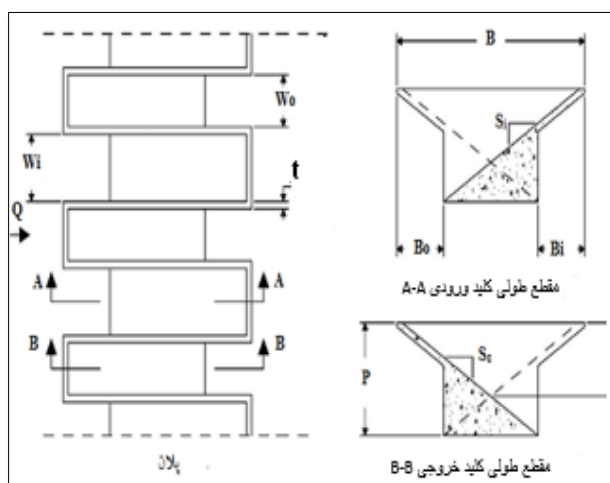
آزمایشات تحقیق حاضر بر روی فلوم آزمایشگاهی در آزمایشگاه هیدرولیک سازمان آب و برق خوزستان انجام گرفت. در این تحقیق مدل‌های آزمایشگاهی سرریز، در داخل فلوم مستطیلی به طول ۸ متر،



شکل ۲- پلان و پروفیل طولی فلوم آزمایشگاهی در تحقیق حاضر



شکل ۳- نمایی از سرریز کلید پیانویی



شکل ۴- پارامترهای هندسی سرریزهای کلید پیانویی

تعداد ۱۲۰ آزمایش با استفاده از ۴ مدل فیزیکی از سرریزهای کلیدپیانویی با پارامترهای ثابتی هم‌چون عرض ثابت سیکل (W) ۳۰ سانتی‌متر، طول کل تاج (L) ۳۰۰ سانتی‌متر، ضخامت (t) ۵ میلی‌متر، نسبت بزرگ‌نمایی ارتفاعی (w/p) ۳، تعداد سیکل (N) ۲ و پارامترهای متغیری هم‌چون نسبت عرض کلید ورودی به خروجی (W<sub>i</sub>/W<sub>o</sub>) ۰/۸، ۰/۹، ۱، ۱/۱، ۱/۲۵ و نسبت طول کل بال جانبی به طول شیروانی پایین دست (B/B<sub>i</sub>) ۱ و ۵/۵ انجام شد.

$$C_d = f(H_d/P, W_i/W_o, B/B_i) \quad (۶)$$

## نتایج و بحث

در این تحقیق عملکرد هیدرولیکی سرریز کلید پیانویی با نسبت‌های کلید ورودی به خروجی مختلف بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است سرریزهای کلید پیانویی مورد آزمایش در این تحقیق دارای ارتفاع مساوی بودند. تعداد سیکل‌های سرریز در این تحقیق ۲ سیکل در نظر گرفته شد. شکل ۵ تغییرات ضریب شدت جریان را نسبت به (H<sub>d</sub>/P) در حالت (B/B<sub>i</sub>=1) برای مقادیر مختلف (W<sub>i</sub>/W<sub>o</sub>) نشان می‌دهد.

نتایج شکل ۵ نشان می‌دهد در سرریز کلید پیانویی با نسبت (B/B<sub>i</sub>=1)، با افزایش نسبت عرض کلید ورودی به کلید خروجی از ۰/۸ به ۱/۲۵، ضریب جریان حدود ۱۸/۵ درصد افزایش می‌یابد. هم‌چنین این شکل نشان می‌دهد در تمامی نسبت‌های (W<sub>i</sub>/W<sub>o</sub>)، با افزایش نسبت بار آبی به ارتفاع سرریز (H<sub>d</sub>/P)، ضریب جریان ابتدا افزایش و پس از رسیدن به بیشینه خود در (H<sub>d</sub>/P=0.11)، روند کاهشی را در پیش می‌گیرد. بیش‌ترین ضریب جریان با مقدار حدود ۰/۷۶ در سرریز کلید پیانویی در نسبت بار هیدرولیکی (H<sub>d</sub>/p=0.11) در نسبت (W<sub>i</sub>/W<sub>o</sub>=1.25) اتفاق افتاد. کم‌ترین ضریب جریان در تمامی حالات سرریز کلید پیانویی در حالت جریان مستغرق اتفاق می‌افتد. آستانه استغراق در سرریز کلید پیانویی در نسبت (H<sub>d</sub>/P>0.6) اتفاق افتاد. کم‌ترین ضریب جریان مربوط به سرریز با نسبت کلید ورودی به خروجی ۰/۸ می‌باشد. نتیجه بدست آمده در این تحقیق متناسب با نتایج کورکستون و تولیس است.

بررسی‌های انجام شده توسط کورکستون و تولیس نشان دادند که در دبی‌های کم، به دلیل تداخل کم تیغه‌های ریزش، ضریب دبی جریان از سرریز خطی بیش‌تر بوده و به تدریج با افزایش دبی جریان شدت تداخل بیش‌تر می‌گردد. این موضوع منجر به کاهش ضریب دبی جریان شده و مقدار آن متمایل به ضریب دبی جریان در سرریزهای لبه پهن می‌گردد (Crookston and Tullis., 2012). شکل ۶ تغییرات ضریب شدت جریان را نسبت به (H<sub>d</sub>/P) در حالت (B/B<sub>i</sub>=5.5) برای مقادیر مختلف (W<sub>i</sub>/W<sub>o</sub>) نشان می‌دهد.

تعداد ۱۲۰ آزمایش با استفاده از ۴ مدل فیزیکی از سرریزهای کلیدپیانویی با پارامترهای ثابتی هم‌چون عرض ثابت سیکل (W) ۳۰ سانتی‌متر، طول کل تاج (L) ۳۰۰ سانتی‌متر، ضخامت (t) ۵ میلی‌متر، نسبت بزرگ‌نمایی ارتفاعی (w/p) ۳، تعداد سیکل (N) ۲ و پارامترهای متغیری هم‌چون نسبت عرض کلید ورودی به خروجی (W<sub>i</sub>/W<sub>o</sub>) ۰/۸، ۰/۹، ۱، ۱/۱، ۱/۲۵ و نسبت طول کل بال جانبی به طول شیروانی پایین دست (B/B<sub>i</sub>) ۱ و ۵/۵ انجام شد.

## آنالیز ابعادی:

معادله عمومی سرریزها بصورت رابطه ۳ توسط تولیس و همکاران برای سرریزهای کلید پیانویی بکار گرفته شد. در این معادله، (Q) دبی عبوری از سرریز، (L) طول کل تاج سرریز، (g) شتاب ثقل و (H<sub>d</sub>) بار هیدرولیکی کل، (C<sub>d</sub>) ضریب جریان بدون بعد است که از طریق انجام آزمایش تعیین گردید (Tullis et al., 1995).

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_d L H_d^{1.5} \quad (۳)$$

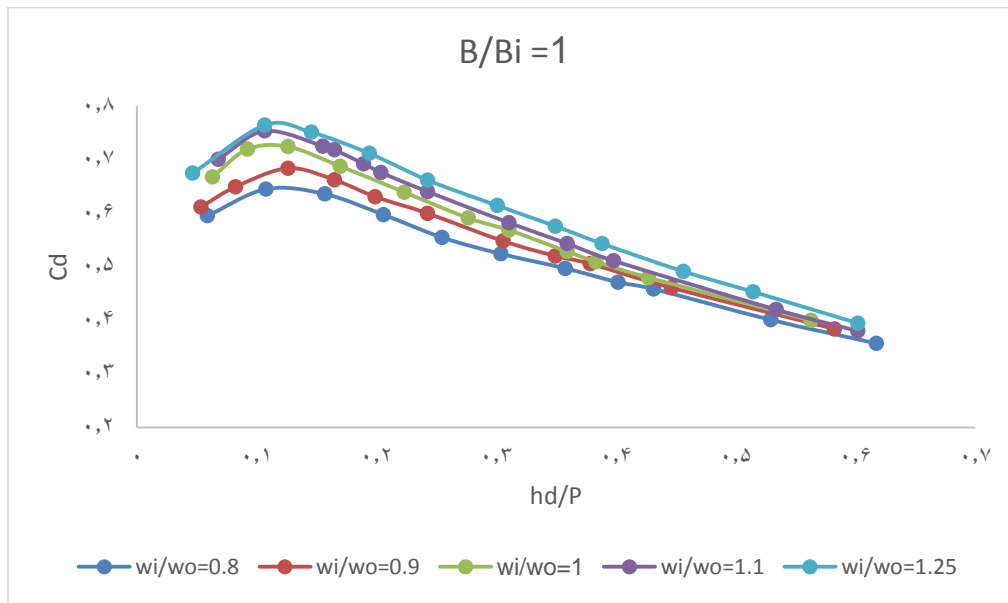
پارامترهای موثر بر ضریب جریان در سرریزهای کلید پیانویی را می‌توان به صورت رابطه ۴ عنوان کرد:

$$C_d = f(Q, B_i, B_o, B, S_i, S_o, S, W_i, W_o, W, t, P, D, N, H_d, \lambda, g, \mu, \rho, \sigma) \quad (۴)$$

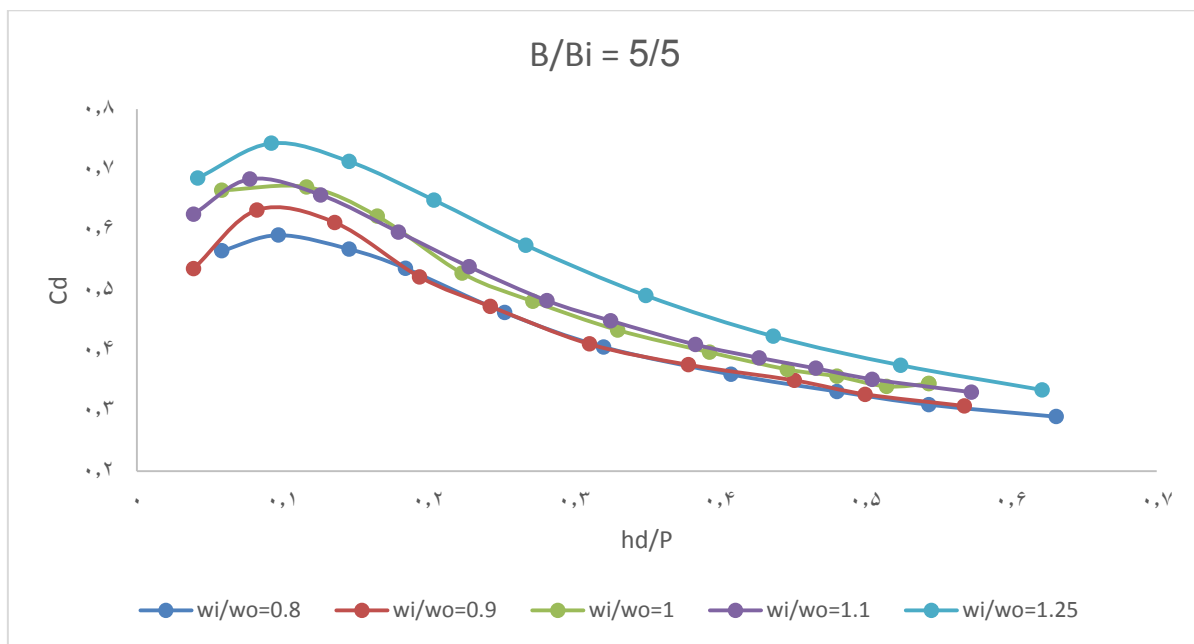
که در آن (Q) دبی جریان، (B<sub>i</sub>) طول کلید ورودی، (B<sub>o</sub>) طول کلید خروجی، (B) طول سرریز، (S<sub>i</sub>) شیب کلید ورودی، (S<sub>o</sub>) شیب کلید خروجی، (S) شیب کانال، (W<sub>i</sub>) عرض کلید ورودی، (W<sub>o</sub>) عرض کلید خروجی، (W) عرض یک سیکل، (t) ضخامت دیواره سرریز، (P) ارتفاع سرریز در بالادست، (D) ارتفاع سرریز در پایین دست، (N) تعداد سیکل‌ها، (H<sub>d</sub>) بار هیدرولیکی کل جریان بر روی بالادست سرریز، (λ) فاکتور شکل مقطع تاج، (g) شتاب ثقل، (μ) چگالی، (σ) به ترتیب لزجت دینامیکی، چگالی و کشش سطحی آب می‌باشند. برای تحلیل ابعادی، پارامترهای (Q، ρ و P) به عنوان متغیرهای تکراری در نظر گرفته شدند و پارامترهای بی‌بعد به صورت رابطه ۵ بدست آمدند.

$$C_d = f(B_i/P, B_o/P, B/P, S_i, S_o, t/P, D/P, W/P, N, \lambda, H_d/P, S, gP^5/Q^2, \mu P/\rho Q, W_i/P, W_o/P, \rho P^8/Q^2, \sigma) \quad (۵)$$

باتوجه به این‌که در تحقیق حاضر، (B<sub>o</sub>)، (S<sub>i</sub>)، (S<sub>o</sub>)، (S)، (t)، (D)، (W)، (N)، (λ) ثابت بودند، حذف شدند. هم‌چنین با توجه به آشفته بودن جریان و این‌که عمق جریان به اندازه کافی زیاد در نظر گرفته شد اثر عدد بی‌بعد رینولدز (μP/ρQ) و عدد وبر (ρP<sup>8</sup>/Q<sup>2</sup>) چشم‌پوشی گردید. لازم به ذکر است که تاثیر شتاب ثقل (σ) چشم‌پوشی گردید. لازم به ذکر است که تاثیر شتاب ثقل



شکل ۵- تاثیر دبی جریان بر ضریب دبی در سرریز کلید پیانویی با نسبت  $B/B_i=1$



شکل ۶- تغییرات ضریب شدت جریان را نسبت به  $(H_d/P)$  در حالت  $(B/B_i=5.5)$  برای مقادیر مختلف  $(W_i/W_o)$

- همانند شکل ۵، کمترین ضریب جریان در تمامی حالات سرریز کلید پیانویی در حالت جریان مستغرق اتفاق افتاد.
- آستانه استغراق در نسبت  $(H_d/P > 0.6)$  اتفاق افتاد. کمترین ضریب جریان در نسبت  $(W_i/W_o = 0.8)$  با مقدار  $0.29$  در نسبت بار هیدرولیکی بیش از  $0.6$  رخ داد. نتایج بدست آمده در این حالت با تحقیقات اندرسون و تولیس

- نتایج شکل ۶ نشان می‌دهند که در سرریز کلید پیانویی با نسبت  $(B/B_i = 5.5)$ ، با افزایش نسبت عرض کلید ورودی به کلید خروجی از  $0.8$  به  $1.25$ ، ضریب جریان حدود ۲۶ درصد افزایش یافت.
- در نسبت بار هیدرولیکی  $(H_d/P = 0.1)$  بیشترین ضریب جریان با مقدار  $0.74$  در نسبت  $(W_i/W_o = 1.25)$  و کمترین آن با مقدار  $0.59$  در نسبت  $(W_i/W_o = 0.8)$  اتفاق افتاد.

ارتباط با متغیرهای مستقل  $(H_d/P)$  و  $(B/B_i)$  و  $(W_i/W_o)$  استخراج شدند. در جدول ۲ ویژگی‌های آماری الگوهای ارایه شده نشان داده شده است.

(۲۰۱۳) مطابقت داشت. برای تعیین رابطه ضریب دبی جریان روی سرریزهای کلید پیاپویی از نرم‌افزار SPSS استفاده شد. برای بدست آوردن بهترین معادله، توابع مختلف برای  $C_d$  به‌عنوان متغیر وابسته در

جدول ۱ - الگوهای معرفی شده، نرم‌افزار SPS برای تعیین ضریب جریان

شماره رابطه (الگو)	الگوهای معرفی شده
۱	$C_d = 0.244 - 0.631(H_d/P) + 0.169(wi/wo) + 0.013 S$
۲	$C_d = 0.220 - 0.706(H_d/P)^{1/28} + 0.168 wi/wo + 0.013 S$
۳	$C_d = 0.321 - 0.707(H_d/P)^{1/28} + 0.065(wi/wo)^2 + 0.013 S$
۴	$C_d = 0.481 - 0.712(H_d/P)^{1/28} + 0.065(wi/wo)^2 + 0.14(2/7 * S)$

جدول ۲ - ویژگی‌های آماری الگوهای ارایه شده

الگو	Adjusted R Square	R	Durbin Watson	F	VIF	Std. Residual	Cook's Distance	Centered Leverage
۱	۰/۸۹۵	۹۴۶/۰	۱/۱۵۳	۴۳۶/۶	۱/۰۰۱	[-۳/۰۴۶, ۲/۴۹۲]	[۰/۰, ۰/۷۵]	[۰/۰۰۰, ۰/۰۵۷]
۲	۰/۹۰۱	۰/۹۴۹	۱/۱۵۰	۴۶۸/۷	۱/۰۰۲	[-۲/۸۰۹, ۲/۶۰۰]	[۰/۰, ۰/۸۱]	[۰/۰۰۰, ۰/۰۶۴]
۳	۰/۹۰۳	۰/۹۵۰	۱/۱۷۰	۴۷۹/۹	۱/۰۰۲	[-۲/۷۸۵, ۲/۵۶۳]	[۰/۰, ۰/۰۷۵]	[۰/۰۰۰, ۰/۰۶۶]
۴	۰/۹۰۵	۰/۹۵۱	۱/۱۱۰	۴۸۳/۳۲	۱/۰۰	[-۲/۷۹۶, ۲/۴۸۲]	[۰/۰, ۰/۰۷۵]	[۰/۰۰۰, ۰/۰۶۵]

جدول ۳ - شاخص‌های خطا برای  $\epsilon$  الگوی بدست آمده در تحقیق حاضر

	۱	۲	۳	۴
$R^2$	۰/۸۹۷	۰/۹۰۳	۰/۹۰۴	۰/۹۰۵
RMSE	۰/۰۳۶	۰/۰۳۵	۰/۰۳۵	۰/۰۳۲
NRMSE	۰/۰۶۶	۰/۰۶۴	۰/۰۶۳	۰/۰۵۸

شکل شماره ۷ مقادیر  $C_d$  اندازه‌گیری شده را در برابر مقادیر  $C_d$  محاسبه شده با استفاده از رابطه شماره ۱۲ نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که مقادیر  $C_d$  محاسباتی در محدوده‌ای با خطای کم‌تر از ۵٪ قرار می‌گیرد، که دقت مناسبی را نشان می‌دهد.

به منظور تحلیل نتایج ارایه شده، مقایسه‌ای بین نتایج این تحقیق با مطالعات صورت گرفته به‌وسیله محققین دیگر انجام شد.

مقایسه با تحقیق اندرسون و تولیس (2013):

شکل ۱ نتایج تحقیق اندرسون و تولیس را در مورد سرریز کلید پیاپویی نشان می‌دهد. حداکثر راندمان در تحقیق ایشان در  $(W_i/W_o=1.25)$  اتفاق افتاده است که  $(C_{dmax}=0.54)$  را نتیجه داده است. در مطالعه این محققین نسبت  $(B/B_i=2)$  در نظر گرفته شده است. شکل ۸ نتایج تحقیق حاضر را با تحقیق اندرسون و تولیس (2013) مقایسه می‌کند همان‌طور که ملاحظه می‌شود حداکثر ضریب شدت جریان در تحقیق حاضر برابر ۰/۸ و حدود ۶۱ درصد بیش‌تر از تحقیق اندرسون و تولیس (۲۰۱۳) است. این افزایش ضریب دبی به-علت تفاوت نسبت  $(B/B_i)$  می‌باشد. همچنین وجود دماغه مثلثی این تحقیق و تاثیر مثبت آن در زیر شیروانی‌های بالادست و پایین‌دست سرریز کلید پیاپویی دلیل دیگر آن است.

به‌منظور بررسی الگوهای ارایه شده و گزینش بهینه‌ترین الگو، ۳ پارامتر ضریب تعیین  $(R^2)$ ، جذر میانگین مجموع مربعات خطا  $(RMSE)$  و جذر میانگین مجموع مربعات خطای نرمال شده  $(NRMSE)$  مطابق روابط شماره ۹، ۱۰ و ۱۱ استفاده شد.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_o - \bar{x}_o)(x_m - \bar{x}_m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_o - \bar{x}_o)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_m - \bar{x}_m)^2}} \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_o - x_m)^2}{n}} \quad (10)$$

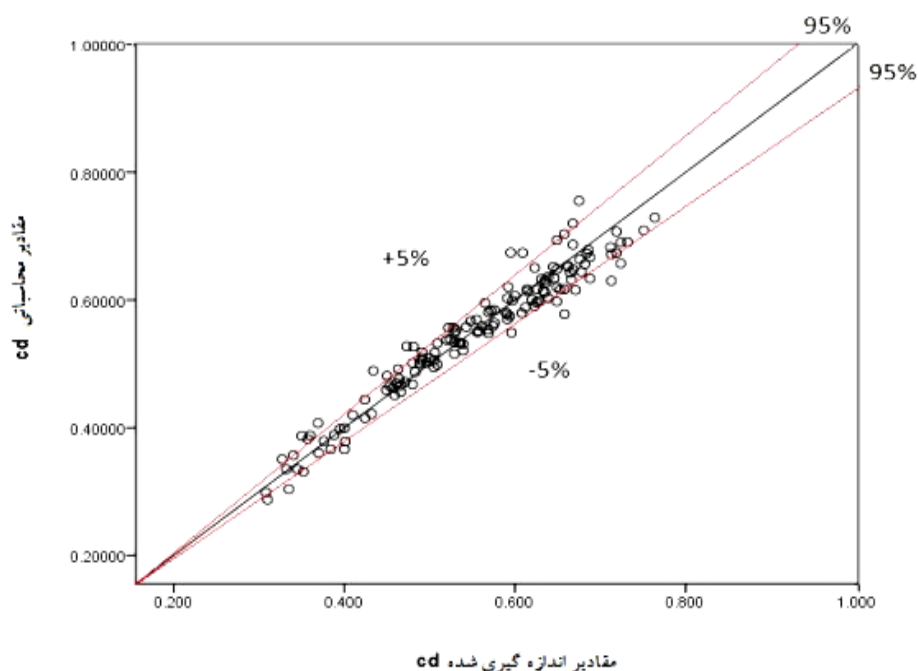
$$NRMSE = \frac{RMSE}{x_o} \quad (11)$$

که در آن  $x_0$  و  $\bar{x}_0$  به ترتیب ضریب جریان و متوسط ضریب جریان اندازه‌گیری شده و  $x_m$  و  $\bar{x}_m$  به ترتیب ضریب جریان و متوسط ضریب جریان محاسبه شده و  $n$  تعداد داده‌ها می‌باشد.

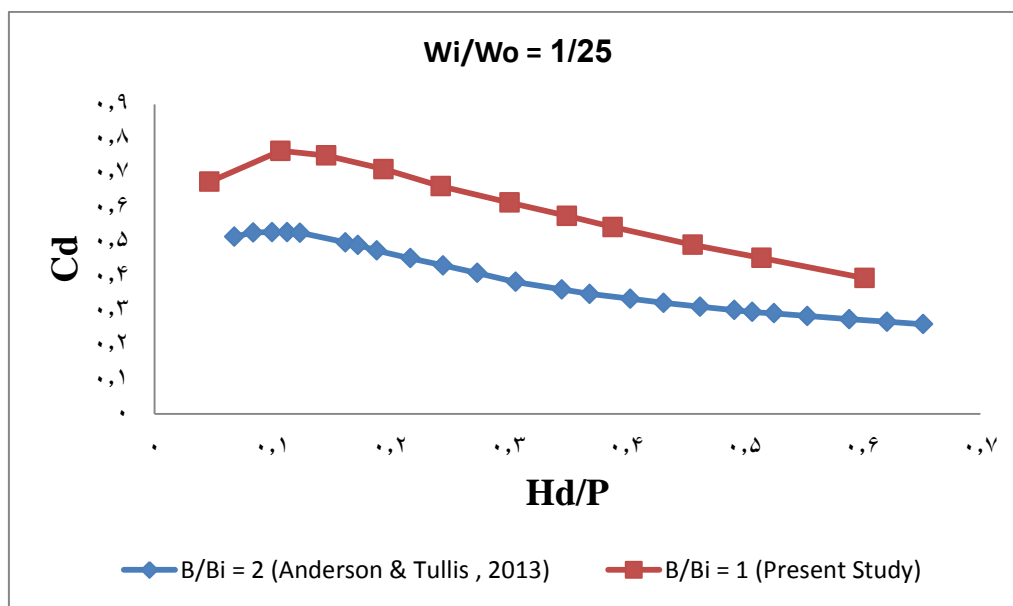
الگوی شماره ۴ با توجه به این که بیش‌ترین مقدار  $R^2$  و کم‌ترین مقادیر NRSME و RSME را به خود اختصاص داده و بهترین برازش را با داده‌ها و نمودارهای این تحقیق دارد به عنوان رابطه بهینه برای تعیین ضریب دبی عبوری از سرریزهای کلید پیاپویی ارایه شد.

$$(12)$$

$$C_d = 0.481 - 0.712(H_d/P)^{1.28} + 0.065(W_i/W_o)^2 + 0.14(\exp.1 * B/B_i)$$



شکل ۷- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسباتی  $C_d$



شکل ۸- مقایسه عملکرد هیدرولیکی سرریز کلید پیاپویی در نسبت  $(B/B_i)$  متفاوت

تحقیق حاضر، ریبیرو و همکاران سامانی (2011) و جواهری و کبیری سامانی سامانی (1391) بترتیب برابر با ۰/۰۳۲، ۰/۱۷۷ و ۰/۱۰۱ بدست آمد. از آنجا که خطای معادله تحقیق حاضر از دو روش دیگر کم تر است. البته لازم است داده‌های دیگر آزمایشگاهی نیز برای بررسی دقیق تر استفاده شود.

مقایسه با تحقیق ریبیرو و همکاران (2011) و جواهری و کبیری سامانی (1391) ریبیرو و همکاران معادله ۱ و جواهری و کبیری سامانی، معادله ۲ را برای محاسبه ضریب شدت جریان بدست آوردند. برای مقایسه نتایج تحقیقات این محققین با تحقیق حاضر، داده‌های آزمایشگاهی این تحقیق در هر سه معادله ۱، ۲ و ۱۲ قرار داده شد و RMSE برای



## نتیجه گیری

بررسی آزمایشگاهی مقایسه ضریب دبی در سرریزهای کلید پیانو با تاج‌های متغیر، هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، بابل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی. ص ۷-۱.

مهبودی، ع، عطاری، ج، حسینی، ع و جلیلی قاضی‌زاده، م. ۱۳۹۳. بررسی آزمایشگاهی مقایسه سرریز کلید پیانویی با سرریزهای کنگره‌ای و خطی، سیزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، تبریز، دانشگاه تبریز - گروه مهندسی آب.

Anderson, R.M., Tullis, B. 2012. Comparison of piano key and rectangular labyrinth weir hydraulics. *Journal of hydraulic engineering*. 138.4:358-361.

Anderson, R.M., Tullis, B. 2011. Piano key weir head discharge relationships. All graduate theses and dissertations (Utah state university). Paper 880.

Anderson, R.M., Tullis, B. 2013. Piano key weir hydraulics and labyrinth weir comparison. *Journal of irrigation and drainage engineering*. 139.3:246-253.

Belzner, F., Merkel, J., Gebhardt, M., Thorenz, C. 2017. Piano key and labyrinth weirs at German waterways: recent and future research of the Baw labyrinth and piano key weirs III - PKW 2017 - Erpicum et al. (Eds) © 2017 Taylor and Francis group, London, ISBN 978-1-138-05010-5

Crookston, B.M., Tullis, B.P. 2012. Discharge efficiency of reservoir application specific labyrinth weirs. *Journal of irrigation and drainage engineering*. 138.6: 773-776.

Dabbling, M.R. 2014. Nonlinear weir hydraulics. MSc thesis, Utah state university Logan, Utah.

Gebhardt, M., Merkel, J., Belzner, F., Thorenz, C. 2017. A comparison of side weirs and labyrinth weirs at Ilmenau river labyrinth and piano key weirs III - PKW 2017 - Erpicum et al. (eds) © 2017 Taylor and Francis group, London, ISBN 978-1-138-05010-5.

Falvey, H., Trielle, B. 1995. Hydraulics and design of fusegates. *Journal of hydraulic engineering*. 121.7: 512-518.

Hay, N. and G. Taylor, (1970), performance and design of labyrinth weirs. *Journal of Hydraulic division, ASCE* 96:2337-2357

Laugier, F. 2007. Design and construction of the first piano key weir spillway at the Goulours dam, hydropower and dams. 13.5: 94-101.

Le Doucen, O., Ribeiro, M.L., Boillat, J.L., Schleiss, A.J., Laugier, F. 2009. Etude parametrique de la capacite des piano key weir. *Modèles physiques hydrauliques - outils indispensables du XXIe siècle*, SHF, Lyon.

Leite Ribeiro, M., Pfister, M., Boillat, J.L., Schleiss, A.J., Laugier, F. 2012. piano key weirs as

در این تحقیق تاثیر پارامترهای مختلف بر ضریب جریان در سرریز کلید پیانویی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که بیشترین ضریب جریان در نسبت‌های بار هیدرولیکی کم اتفاق می‌افتد و با افزایش نسبت بار هیدرولیکی، ضریب جریان ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. بیشترین ضریب جریان در نسبت بار هیدرولیکی حدود ۰/۱ رخ داده، همچنین مشخص شد که ضریب جریان در نسبت‌های ۱/۲۵ و ۰/۸ عرض کلید ورودی به خروجی به ترتیب بیشترین (۰/۷۶) و کمترین مقدار (۰/۶۴) را دارا است که دلیل آن بیش‌تر بودن عرض کلیدها و به تبع آن خروج جریان بیش‌تر به پایین‌دست، به ازای افزایش بار هیدرولیکی روی سرریز می‌باشد. کمترین ضریب جریان در تمامی حالات در نسبت‌های هیدرولیکی بیش‌تر از ۰/۶ اتفاق افتاد که در این حالت سرریز، مستغرق شد. مقایسه ضریب جریان در تحقیق انجام شده در مقایسه با تحقیقات دیگر نشان داد که حداکثر ضریب جریان در تحقیقات دیگر ۰/۱ و در تحقیق حاضر برابر ۰/۷۴ (در نسبت عرض کلید ورودی به خروجی برابر ۱/۲۵) است که این ضریب در بیشترین حالت نسبت به کمترین آن حدود ۲۶ درصد افزایش نشان داد. نتایج این تحقیق حتی در کمترین مقدار ضریب جریان با حداکثر مقدار آن ضریب در تحقیقات دیگر برابری کرد که نشان دهنده تاثیر مثبت لبه مثلثی دماغه سرریز است. معادله بدست آمده در این تحقیق نیز دقت بیش‌تری نسبت به معادلات دیگر تحقیقات داشت.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله لازم می‌دانند از سازمان آب و برق خوزستان بابت در اختیار قرار دادن تجهیزات آزمایشگاهی تشکر و قدردانی داشته باشند.

## منابع

احمدی، ح، امین‌نژاد، ب و طاهباز عالی، ر. ۱۳۹۳. مطالعه عددی هیدرولیک جریان در سرریز کلید پیانویی، اولین کنفرانس ملی مهندسی عمران و توسعه پایدار ایران، به صورت الکترونیکی، مرکز راهکارهای دستیابی به توسعه پایدار.

کیبیری‌سامانی، ع. و ا.، جواهری، . ۱۳۹۱، تعیین ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی در حالت جریان آزاد، اولین کنفرانس بین المللی و سومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه های برق آبی. تهران. ص ۸-۱.

کریمی چهارطاقی، م، نظری، س. و م، کریمی چهارطاقی، ۱۳۹۳،

Ouamane, A., Lemperiere, F. 2006a. Design of a new economic shape of weir, international symposium on dams in the societies of the 21st century, Barcelona, Spain, 463-470.

Tullis, B., Young, J., Chandler, M. 2007. Head-discharge relationships for submerged labyrinth weirs. Journal of hydraulic engineering. 133.3: 248-254.

efficient spillway structure. 24th International Congress. Large Dams on large dams. Kyoto. J. Q.94 – R.13.

Leite Ribeiro, M., Boillat, J.L., Schleiss, A.J. 2011. Experimental parametric study for hydraulic design of pkws, labyrinth and piano key weirs-pkw. CRC press. London. 183-190.

## Experimental study of Discharge Coefficient in Two-Cycle Piano Key Weirs

B. Kamaei abbasi<sup>1</sup>, S. R. Khodashenas<sup>2\*</sup>, M. Heidarnejad<sup>3</sup>

Received: Oct.31, 2017

Accepted: Jan.11, 2017

### Abstract

The piano key weir is a developed version of nonlinear weirs with a very high discharge capacity. Due to the increase in effective length and consequently the increase in drainage efficiency of these weirs, they can be used in dam spillways or water regulation structures. This study aimed at the investigation of two-cycle piano key weir with a triangular nose. Several experiments have been conducted to determine the effect of geometric parameters of the input-to-output key widths ( $W_i/W_o$ ) and the ratio of the weir's length to the length of downstream slope ( $B/B_i$ ) on the discharge coefficient. The results of this study showed that with increasing hydraulic load, the discharge coefficient was first increased and then reduced, and by increasing the input-to-output width ratios from 0.8 to 1.25, the discharge coefficient of piano key weir increased up to 26 percent. Using triangular nose has a positive effect on the discharge coefficient. In addition, the comparison with the results of other researchers showed that have the relationship developed in this study has less error than other relationships.

**Keywords:** Flow discharge coefficient, Hydraulic model, : Piano Key Weir, Ratio of input key width to output key

1- Ph.D. Student, Water Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad

2- Professor, Water Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad

3- Assistant Professor, Department of water Science engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

(\*- Corresponding Author Email: khodashenas@ferdowsi.um.ac.ir)