

## Predicting the Discharge Coefficient of Arched Piano Key with a Trapezoidal Cross Section

KAZEM ALLAHDADE<sup>1</sup>, MOHAMMAD ANSARI GHOJGHAR<sup>2</sup>, MASOUMEH ZEINALI<sup>2</sup>, EHSAN PARSI<sup>\*1</sup>

1. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Islamic Azad University Ahwaz, Ahwaz, Iran.

2. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

(Received: Sep. 12, 2020- Revised: Oct. 11, 2020- Accepted: Dec. 19, 2020)

### ABSTRACT

In this research, a special form of nonlinear weirs called piano key overflows has been studied. In this type of weirs, unlike congressional weirs, the openings are sloping inwards and outwards one by one. So this study was conducted with the aim of laboratory study of the discharge coefficient of the arched piano key in the plan in free flow conditions. In this research, 27 models of arched piano key overflow structures with three arc lengths of 1.20, 1.40, 1.60 m, three crown lengths of 5.10, 4.30, 3.20 m and three crown heights of 0.30, 0.20, 0.15 m. All models were made of glass with a thickness of 10 mm. The models were compared in terms of height effect, key width ratio and arc effect under the same effective length conditions. The results showed that increasing the flow rate and consequently increasing the dimensionless ratio, leads to a decrease in watering coefficient and in fact has the opposite effect on the permeability coefficient of piano switch weir in free flow. Also, by increasing the dimensionless ratio, the flow currents from the output switch interfere with each other, and as a result, due to the local immersion, the overflow coefficient of the overflow of the arched piano switch in the free flow decreases. The arc model with an arc length of 1.40 m with 1.27 had the highest and the arc model with 1.20 m and 1.22 had the lowest permeability coefficient in free flow. Finally, it was found that the arc model has a higher permeability coefficient than the direct model, which indicates the positive effect of the arc. Also, in order to estimate the permeability coefficient of free flow and Q flow rate, relationships were provided for the overflow of the piano switch in the arc position.

**Keywords:** Piano Key Weir, Arc Weir, Discharge Coefficient, Free Flow, Regression.

## پیش بینی ضریب دبی سرریز کلید پیانو قوسی با مقطع دوزنقه‌ای

کاظم اله‌دادی<sup>۱</sup>، محمد انصاری قوجقار<sup>۲</sup>، معصومه زینعلی<sup>۲</sup>، احسان پارسی<sup>۳\*</sup>

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهواز، اهواز، ایران.

۲. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۶/۲۲ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۷/۲۰ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۹/۲۹)

### چکیده

در این تحقیق شکل خاصی از سرریزهای غیر خطی با عنوان سرریزهای کلید پیانوی مورد مطالعه قرار گرفته است. در این نوع از سرریزها بر خلاف سرریزهای کنگره‌ای، دهانه‌ها یک در میان به سمت داخل مخزن و بیرون آن شیب‌دار می‌باشد. با توجه به اینکه با قوسی کردن سرریز، طول موثر آن افزایش می‌یابد، لذا این پژوهش با هدف بررسی آزمایشگاهی ضریب آبگذری سرریز کلید پیانوی قوسی در پلان در شرایط جریان آزاد انجام شده است. در این پژوهش ۲۷ مدل سازه سرریز کلید پیانوی قوسی با سه طول قوس  $L_f = 1/60, 1/40, 1/20$  متر، سه طول تاج  $L_c = 3/20, 4/30, 5/10$  متر و سه ارتفاع تاج  $P = 0/15, 0/20, 0/30$  متر ساخته شد. برای ساخت تمامی مدل‌ها از جنس شیشه با ضخامت ۱۰ میلی‌متر استفاده گردید. مدل‌ها از نظر تاثیر ارتفاع، نسبت پهنای کلیدها و نیز تاثیر قوس در شرایط طول موثر یکسان، با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج پژوهش نشان داد که افزایش دبی و به تبع آن افزایش نسبت بی بعد ارتفاع انرژی کل جریان بالادست نسبت به تاج سرریز بر ارتفاع سرریز  $(H_f/P)$ ، منجر به کاهش ضریب آبگذری شده و در واقع تاثیر عکس بر روی ضریب آبگذری سرریز کلید پیانوی در جریان آزاد دارد. همچنین با افزایش نسبت بی‌بعد عرض کلیدهای ورودی و خروجی  $(W_f/W_0)$ ، جریان‌های ریزشی از کلید خروجی با هم تداخل پیدا کرده و در نتیجه به دلیل استغراق موضعی، ضریب آبگذری سرریز کلید پیانوی قوسی در جریان آزاد کاهش می‌یابد. مدل قوسی با طول قوس  $L_f = 1/40$  متری با  $1/27 = W_f/W_0$  بیشترین و مدل قوسی با  $L_f = 1/20$  متر و  $W_f/W_0 = 1/22$  کمترین میزان ضریب آبگذری در جریان آزاد را به خود اختصاص دادند. در نهایت مشخص گردید که مدل قوسی نسبت به مدل مستقیم دارای ضریب آبگذری بالاتری بوده که این امر اثر مثبت قوس را بیان می‌کند. همچنین به منظور تخمین ضریب آبگذری جریان آزاد  $(C_D)$  و دبی جریان  $Q$  روابطی برای سرریز کلید پیانوی در حالت قوسی ارائه شد.

**واژه‌های کلیدی:** سرریز کلید پیانوی، سرریز قوسی، ضریب آبگذری، جریان آزاد، رگرسیون.

### مقدمه

طراحی سرریزهایی با هندسه غیر خطی شده است. سرریزهای کنگره‌های و کلید پیانوی دو نوع مهم سرریزهای غیر خطی می‌باشد که در آن‌ها، افزایش طول تاج سرریز با زیگزاگ کردن این سازه در پلان صورت می‌گیرد.

در دهه اخیر استفاده از سرریزهای غیر خطی (کنگراهی و کلید پیانوی) در سراسر جهان رو به افزایش است، لذا گرایش محققان به برآورد ضریب دبی جهت بررسی کارایی سرریزها رو به افزایش می‌باشد. مطالعات زیادی برای بهبود روش‌های تجربی در تعیین ضریب دبی، انتخاب هندسه بهینه و افزایش کارایی سرریزهای کنگره‌ای انجام شده است.

Safarzadeh and abbasi (2019) همگرایی لایه‌های جریان در پایین‌دست سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای تحت زاویه ۱۵ درجه را بررسی کردند، همچنین پدیده‌های هیدرولیکی موثر بر راندمان

سدها با اهداف گوناگونی ساخته می‌شوند که از آن جمله می‌توان به ذخیره آب سطحی، تأمین برق و آب آشامیدنی و کاربردهای تفریحی اشاره کرد. یکی از مهمترین اجرای تشکیل‌دهنده سدها، سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی است. انرژی پتانسیل زیاد ذخیره شده در آب که ناشی از اختلاف سطح آب سرباب و پایاب است، در صورت رها شدن به پایین‌دست می‌تواند منجر به خسارت فراوان جانی و مالی شود. سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی نظیر انواع سرریزها و حوضچه‌های آرامش، با کاهش این انرژی مخرب، از بروز مشکلات مالی و جانی جلوگیری می‌کنند (Vischer and Hager, 1998). یکی از مشکلات طراحان در پروژه‌های سدسازی، محدودیت افزایش عرض سرریز جهت افزایش ظرفیت دبی طرح می‌باشد. این موضوع باعث روی آوردن مهندسی سدسازی به

پیانویی دوزنقه‌ای، ۴ برابر بیشتر از سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی، آب را از خود عبور می‌دهند.

Ribeiro *et al.*, (2007) دبی کل عبوری از روی سرریزهای کلید پیانویی را به یک‌سری عوامل هیدرولیکی و هندسی از جمله لزجت سیال، جرم مخصوص، شتاب ثقل، هد کل جریان روی سرریز، طول کل تاج، ارتفاع سرریز، عرض کل، عرض کلید ورودی، عرض کلید خروجی، طول کنسول پایین‌دست و بالادست، طول تاج کناری و ضخامت بدنه مرتبط دانسته‌اند.

مطالعاتی که بر روی این نوع از سرریزها صورت گرفته است در کانال‌های مستقیم بوده است. محققینی چون کبیری سامانی و همکاران در سال 2011 مطالعاتی را به منظور تعیین ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی در حالت جریان آزاد انجام دادند. در این مطالعه برای تعیین تأثیر پارامترهای هندسی و هیدرولیکی مؤثر بر ضریب دبی جریان، آزمایش‌های مختلفی انجام گرفت. این محققین برای بازه  $0.6 < \frac{H_0}{P} < 0.15$  رابطه‌ای بهینه برای تعیین ضریب دبی عبوری از سرریزهای کلید پیانویی تیپ A ارائه دادند (Kabiri-Samani *et al.*, 2011).

کبیری سامانی و جواهری ظرفیت آبگذری این نوع سرریزها را در حالت کاربرد در کانال‌ها بررسی کردند و با استفاده از آنالیز ابعادی و نتایج آزمایشگاهی، روابط تجربی برای ضریب آبگذری این نوع سرریزها در دو حالت آزاد و مستغرق ارائه کردند. آن همچنین با مطالعه بر روی ضریب آبگذری سرریزی کلید پیانویی مستقیم در شرایط جریان آزاد، به این نتیجه دست یافتند که با افزایش عرضی کلید ورودی پایین دست نسبت به عرض کلید خروجی بالادست، ظرفیت تخلیه افزایش می‌یابد، همچنین برآمدگی بالادست سرریز نیز ضریب تخلیه را به مقدار قابل توجهی افزایش می‌دهد. (Kabiri-Samani and Javaheri, 2012).

Oertel (2015) به بررسی آزمایشگاهی و عددی ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی تیپ A پرداخت. نتایج این تحقیق نشان داد که ضریب بدون بعد عبوری با تغییرات کمی در یک کانال کوچک می‌تواند به سرعت تغییر کند. نتیجه کلی دیگری که به دست آمده است بدین شرح است که در حالتی که دبی افزایش پیدا می‌کند  $(0.15 < \frac{H_T}{P})$  ضریب دبی برای هر سه نوع تیپ سرریز برابر بوده در شرایطی که  $0.40 < \frac{H_T}{P} < 0.15$  است قابل مقایسه است. Mosalman Yazdi *et al.*, (2020) در مطالعات خود بر روی دو مدل سرریز کلید پیانویی مستطیلی و دوزنقه‌ای، نشان دادند که با افزایش دبی و کاهش عمق پایاب، مشخصات هندسی حفره آبشستگی در دو مدل افزایش می‌یابد. همچنین عمق آبشستگی

آبگذری را تحلیل و مکانیزم افزایش بار هیدرولیکی در بار آبی‌های پایین تداخل جریان و استغراق موضعی در بار آبی‌های متوسط به بالا که نرخ کاهش راندمان آبگذری سرریز را افزایش می‌دهند، را در سرریز مورد تحقیق، تشریح کردند.

(Ansari and Mujib, 2020) با استفاده از مدل GMDH، عملکرد سرریز کنگره‌ای قوسی را برای طول‌های تاج مختلف مورد مطالعه قرار دادند. Tullis *et al.*, (2020) در تحقیقات خود به بررسی اثر مشخصات هندسی بر عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای پرداختند. نتایج این مطالعات نشان داد که با افزایش تعداد سیکل‌های سرریز کنگره‌ای، عملکرد هیدرولیکی سرریز کاهش می‌یابد. Eman and Ismail (2020) با استفاده از مدل فیزیکی، عمق آب‌شستگی را در پایین‌دست سرریز کنگره‌ای با مقطع مثلثی، مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که کمترین عمق آب‌شستگی در زاویه راس ۶۰ درجه رخ می‌دهد. همچنین با استفاده از رگرسیون خطی رابطه‌ای را در این زمینه پیشنهاد کردند.

(Lempérière and Ouamane, 2003) راه‌حل جدید و مقرون به صرفه برای سرریزها ارائه کردند به این نتیجه رسیدند که سرریز کلید پیانویی راه حلی آسان و بسیار کارآمد می‌باشد. زیرا جریان عبوری را تا ۴ برابر افزایش می‌دهند. هزینه سدهای جدید به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد و امنیت آن‌ها را تضمین می‌کند.

Machiels *et al.*, (2011) با مطالعه آزمایشگاهی سرریز کلید پیانو به این نتیجه دست یافتند که ضخامت تاج سرریز، روی شکل جریان ریزشی سرریز و ظرفیت تخلیه آن برای بار آبی کم تأثیر بسزایی دارد به‌طور کلی با توجه به نتایج قبلی سرریز با شکل جریان ریزشی از سرریز مرتبط است. آن‌ها همچنین با بررسی پارامترهای مؤثر بر روی سرریزهای کلید پیانویی به این نتیجه رسیدند که پیکربندی این نوع سرریزها با وجود هندسه ضعیف، تا ۸ برابر کارآمد از سرریزهای اوجی می‌باشد.

Anderson and Tullis (2013) در مطالعات خود به این نتیجه رسیدند که سرریزهای کلید پیانویی به دلیل وجود شیب در کلیدها و وجود شیروانی در بالا دست و پایین دست کلیدها نسبت به سرریزهای مستطیلی بسیار کارآمدتر می‌باشند. همچنین به دلیل کاهش افت در کلیدهای ورودی از عملکرد بهتری برخوردار می‌باشند. آن‌ها همچنین نشان دادند که در مقایسه انواع سرریزهای غیر خطی، سرریزهای کلید پیانویی عملکرد بهتری نسبت به سرریزهای کنگره‌ای دارند.

Seyed Javad *et al.*, (2019) در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که در شرایط آزمایشگاهی مشابه سرریز کلید

در مدل مستطیلی بیش از مدل دوزنقه‌ای بوده و به‌طور میانگین نسبت حداکثر عمق حفره آبستتگی بی‌بعد سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای نسبت به مدل مستطیلی، ۷ درصد کاهش می‌یابد.

Abbasi and Eskandari (2014) با بررسی رفتار هیدرولیکی سرریزهای کلید پیانویی به این نتیجه دست یافتند که می‌توان با ایجاد شیب و عرض کافی برای کلیدهای خروجی، از تأثیرات استغراق تاج اجتناب کرد و به‌طور کلی این سرریزها کارآمدتر از سرریزهای کنگره‌ای مستطیلی بدون شیب و با شیب ورودی و خروجی هستند.

اگر در سرریزهای کنگره‌ای و کلید پیانویی، دماغه‌های پایین دست سیکل‌ها، بر روی کمانی از یک دایره قرار بگیرند، این سرریزها، سرریزهای کنگره‌ای قوسی و کلید پیانویی قوسی نامیده می‌شوند (Roushangar et al., 2017).

محور تاج (لبه بالایی) سرریزهای قوسی به شکل غیرخطی بوده و به‌صورت یک قطاع از دایره‌ای با شعاع و زاویه مرکزی مشخص در نظر گرفته می‌شود. این سرریز در یک عرض معین طول بیشتری نسبت به سرریزهای متداول خطی دارد. فرضیه اصلی در توسعه سرریزهای قوسی، افزایش ظرفیت انتقال جریان بر روی یک سرریز با عرض تاج ثابت و به ازای ارتفاع معین سطح آب در بالادست سرریز بوده است. هدف از سرریز با قوس محوری، ساخت سازه‌ای با حداقل اتلاف انرژی است که به ازای یک بار آبی ثابت، دبی بیشتر از سیلاب را از روی خود عبور دهد (Sheikh Kazemi et al., 2013).

به همین جهت ایجاد قوس در سرریزهای غیر خطی در سال‌های اخیر مود توجه محققین قرار گرفته است. Roushangar et al., (2018) در تحقیقات خود نشان دادند که با افزایش زاویه سیکل قوسی و اصلاح سرریزهای قوسی، کارایی این سرریزها افزایش می‌یابد. این تحقیق نشان داد که با افزایش زاویه سیکل قوسی برتری سرریزهای کلید پیانویی نسبت به سرریزهای کنگره‌ای بیشتر می‌شود. Safarzadeh gendeshmin and Norouzi (2014) جریان سه بعدی سطح آزاد بر روی سرریزهای کلید پیانویی انحنادار در پلان را مدل‌سازی عددی کردند و منحنی‌های عملکرد هیدرولیکی این نوع سرریزها به ازای پارامترهای مختلف هندسی و هیدرولیکی را تعیین نمودند. آن‌ها نشان دادند که سرریزهای کلید پیانویی انحنادار در پلان، الزاماً دارای کلیدهای دوزنقه‌ای شکل بوده و مزایای سرریزهای دوزنقه‌ای را به دلیل افزایش سطح کلید ورودی و بهبود میزان تخلیه جریان دارا می‌باشند. علاوه بر آن، پلان انحنادار با حالت تحذب به داخل مخزن منجر به حذف حالت کانالیزه جریان نزدیک شونده شده و از تمامی جهات، جریان بصورت عمود بر تاج سرریز تخلیه می‌شود که این

موضوع منجر به افزایش قابل ملاحظه ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی انحنادار می‌شود. (Karimi Chartaghi (2014) ضریب دبی در سرریزهای کلید پیانویی با تاج‌های قوسی متغیر را با هم مقایسه کردند. نتایج حاکی از آن بود که بیشترین ضریب دبی در شرایط تاج با زاویه کمتر ۱۴ درجه رخ می‌دهد.

Karimi Chahartaghi et al. (2019) با بررسی اثر دیواره‌های سپری بر عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کلید پیانویی قوسی، نشان دادند که این دیواره‌ها عملکرد هیدرولیکی این سازه را تا ۱۰ درصد افزایش می‌دهد. همچنین آن‌ها در تحقیقات دیگری به این نکته پی بردند که در سرریزهای کلید پیانویی قوسی، کاهش زاویه قوس شکل پلان از ۹۰ درجه به ۴۵ درجه باعث کاهش اولیه ضریب تخلیه می‌شود و پس از آن به طرز چشمگیری افزایش می‌یابد.

Kumar et al. (2020) در تحقیقات خود نسبت طول تاج به عرض ( $L/W$ ) و ارتفاع سرریز ( $P$ ) را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با استفاده از محاسبات نرم، ضریب تخلیه را تابعی از متغیرهای هندسی بدون بعد سرریزهای کلید پیانویی در نظر گرفتند. آن‌ها با این رویکرد، دو الگوریتم جنگل تصادفی (Random Fores) و الگوریتم درختی M5 (M5 tree algorithm) مورد مقایسه قرار دادند. نتایج نشان داد که الگوریتم درختی M5 پیش‌بینی دقیق‌تری از ضریب تخلیه دارد.

Mirzaei and Sheibani (2020) در مطالعات خود نشان دادند که در محدوده آزمایشات آن‌ها، افزایش تخلیه سرریز قوسی نسبت به مستطیل از ۱۰ تا ۸۰ درصد متفاوت است که این موضوع به ارتفاع و طول تاج سرریز بستگی دارد. Eslinger and Crookston (2020) در مطالعات خود نشان دادند که افزایش ضریب دبی ناشی از افزایش نسبت  $W_i/W_0$ ، منجر به کاهش تلفات انرژی در محدوده  $0.2 < \frac{H_t}{P} < 0.8$  می‌شود. اما در محدوده‌های  $0.2 < \frac{H_t}{P} < 0.07$  و  $0.8 < \frac{H_t}{P} < 0.95$  اتلاف انرژی مستقل از نسبت  $W_i/W_0$  می‌باشد.

در این تحقیق بر خلاف پژوهش‌های قبل فقط از نسبت  $W_i/W_0$  و یا محدودیت‌های دیگری استفاده نشد و سعی گردید که برای شرایط مختلف طول قوس و طول تاج سرریز یک رابطه واحد به‌دست آید تا طراح مجبور نباشد در محدوده پژوهش‌های قبل پارامترهای طراحی را در نظر بگیرد و بتواند با توجه به شرایط هندسی سد موجود بتواند سرریز کلید پیانو را طراحی نماید. هدف از انجام این تحقیق، ارائه رابطه‌ای برای محاسبه ضریب آبگذری سرریزهای کلید پیانویی قوسی، بدون محدودیت، مناسب در شرایط مختلف هندسی و هیدرولیکی سرریز و دربرگیرنده همه

فلوم، به عرض ۱/۰۰ متر، ارتفاع ۰/۷۰ متر و طول ۱۴ متر انجام شد. در این تحقیق از سرریزهای کلید پیانویی قوسی استفاده شده است. در شکل (۱) مدل هیدرولیکی سرریز کلید پیانویی قوسی مورد مطالعه نشان داده شده است.

مشخصات هندسی سرریز بود.

## مواد و روش‌ها

این پژوهش، در آزمایشگاه هیدرولیک و رسوب دکتر محمود شفاعی بجنستان دانشگاه آزاد اسلامی واحد یاسوج، در یک دستگاه



شکل ۱- مدل هیدرولیکی سرریز کلید پیانویی قوسی مورد مطالعه

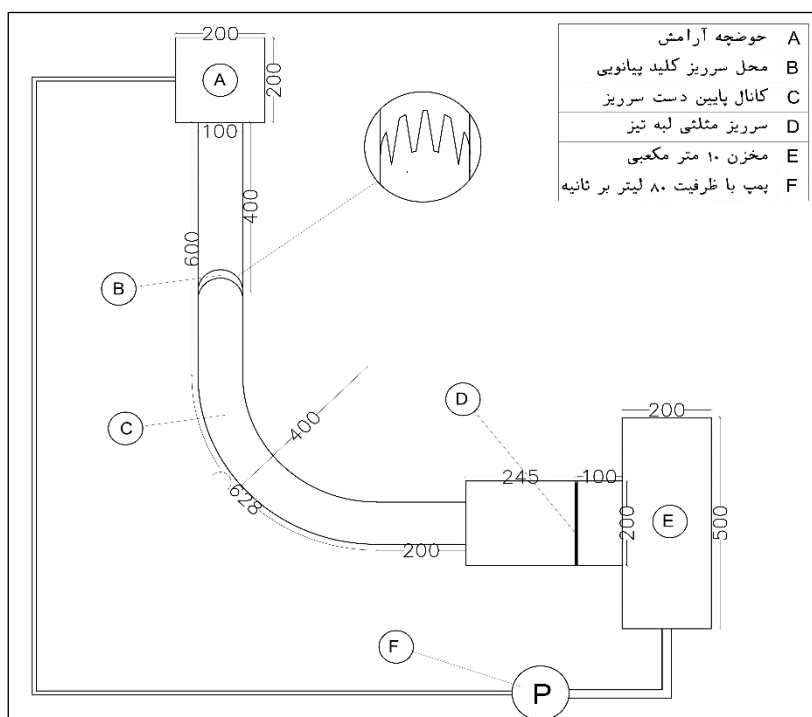
میزان خطای اندازه‌گیری دبی جریان، برای دبی‌های کمتر از ۵۰ و بیش از ۵۰ لیتر بر ثانیه به ترتیب ۰/۶ و ۱/۲ لیتر بر ثانیه می‌باشد. همچنین عمق جریان قبل از سرریز که به فاصله ۳ تا ۴ برابری جمع ارتفاع سرریز و پایه ثابت، اندازه‌گیری گردید. با توجه به قوسی بودن پلان سد، سرریزهای کلید پیانو به جهت عملکرد بهتر طبق توصیه محققین بصورت دوزنقه‌ای طراحی شدند. در شکل (۲) نمایی شماتیک از فلوم آزمایشگاهی طرح مورد مطالعه نشان داده شده است.

در شکل (۳) شماتیکی از سرریز کلید پیانویی قوسی در پلان به همراه پارامترهای هندسی و هیدرولیکی نشان داده شده است. در این شکل  $W_0$  و  $W_i$  به ترتیب نشان‌دهنده عرض کلیدهای ورودی و خروجی،  $B_0$  و  $B_i$  به ترتیب طول شیروانی‌های بالادست و پایین‌دست سرریز،  $L_w$  طول تاج کناری،  $P$  ارتفاع کل سرریز،  $P_d$  و  $B_b$  و  $T$  به ترتیب ارتفاع کلید، عرض فونداسیون و ضخامت دیواره هستند. (Safarzadeh gendeshmin, Norouzi, 2014)

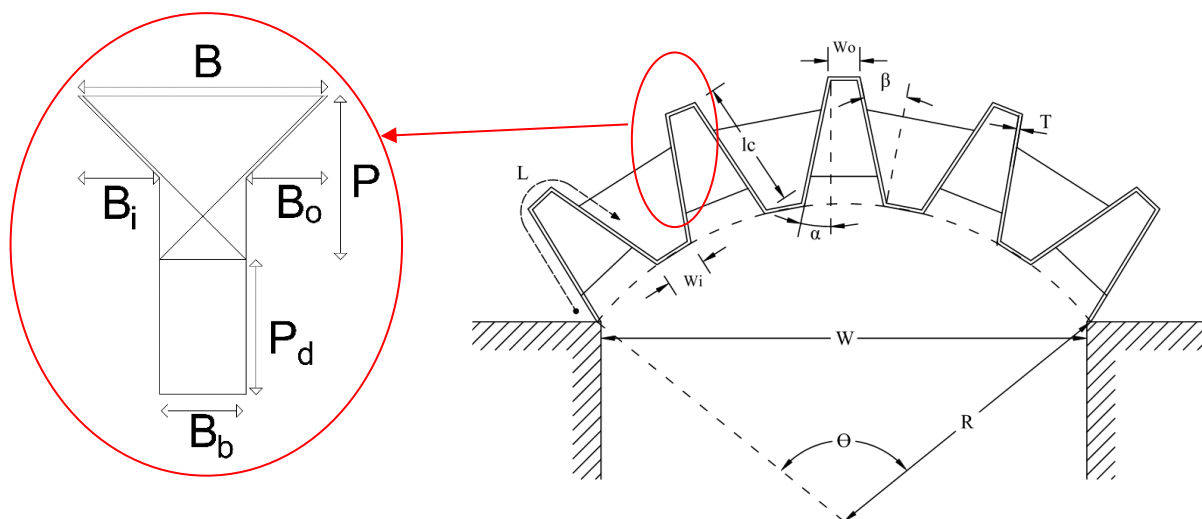
در جدول (۱) مشخصات ثابت هندسی سرریز کلید پیانویی قوسی مورد آزمایش ارائه شده است.

این سرریز با سه طول تاج متغیر ۵/۱۰، ۴/۳۰، ۳/۲۰ متر روی محور سه طول قوس یا همان طول تانژانت متغیر  $L_c = ۱/۲۰، ۱/۴۰، ۱/۶۰$  متر و هر مدل با سه ارتفاع تاج مختلف  $P = ۰/۱۵، ۰/۲۰، ۰/۳۰$  متر در کف فلوم نصب شد. برای هر مدل، سرریز بر روی پایه‌ای با ارتفاع ثابت  $P_d = ۰/۳$  متر به منظور جلوگیری از استغراق، نصب گردید. ابتدا جریان از طریق مخزن فلزی ۱۰ متر مکعبی و بوسیله دو دستگاه پمپ که هر کدام ظرفیت ۸۰ لیتر در ثانیه را دارند وارد حوضچه آرامش ابتدای فلوم شد که از طریق پوشال‌هایی جریان هم آرام گردید. وجود این پوشال‌ها باعث می‌شوند خطوط جریان نیز به صورت منظم وارد مقطع اصلی فلوم گردد. برای هر مدل سازه، مشخصات هندسی سرریز که شامل طول تاج، طول قوس، ارتفاع تاج قوس و مشخصات هیدرولیکی جریان شامل دبی جریان اندازه‌گیری گردید. اندازه‌گیری دبی بوسیله سرریز لبه تیز مثلثی با زاویه رأس ۹۰ درجه صورت گرفت. این سرریز در انتهای فلوم و در حوضچه آرامش با ابعاد ۲×۲ متر قرار داده شد. لازم به ذکر است که سرریز مثلثی بوسیله دبی سنج دیجیتالی کالیبره گردید. دامنه دبی‌های مورد استفاده در این تحقیق از ۱۰ تا ۹۰ لیتر بر ثانیه می‌باشد.

Bo	Bi	B	W	w(outlet)	w(inlet)
۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۵۳	۱/۰۰	۰/۱۱	۰/۱۴



شکل ۲- نمایی شماتیک از فلوم آزمایشگاهی طرح مورد مطالعه



شکل ۳- پارامترهای هندسی سرریز کلید پیلانی قوسی در پلان

رابطه سرریزها به صورت رابطه (۱) تعریف شده است:

$$Q = \frac{2}{3} C_d L \sqrt{2g} H_t^{1.5} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن،  $Q$  دبی جریان عبوری بر حسب متر مکعب بر ثانیه،  $C_d$  ضریب دبی،  $L$  طول تاج سرریز بر حسب متر،  $g$  شتاب ثقل بر حسب متر بر مجذور ثانیه و  $H_t$  ارتفاع انرژی کل جریان بالادست نسبت به تاج سرریز بر حسب متر می‌باشد (Tullis et al., 1995)

جهت بررسی ضریب دبی در سرریز مورد مطالعه، پارامترهای تأثیرگذار شناسایی گردید که این پارامترها، طول تاج سرریز، طول قوس سرریز و هد جریان (ارتفاع سرریز) می‌باشد که بر همین اساس، اثر هر یک از این پارامترها بر روی ضریب دبی بررسی گردید:

تأثیر طول تاج سرریز

و استفاده از روابط بی‌بعد رابطه دیگری برای ضریب دبی بدست آمد. این پارامتر در تحقیق حاضر با علامت  $\Omega$  نشان داده می‌شود که در رابطه (۶) ارائه شده است. این رابطه بر پایه پارامتر بی‌بعد  $\frac{L_t}{P}$  بدست آمده است. پارامترهای موثر بر ضریب دبی  $\Omega$  عبارتند از  $g, Q, L_t$  و  $P$ . بنابراین:

$$\Omega = f(P, W, L_c, L_t, H_t) \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$t = \frac{gP^5}{Q^2 \frac{L_t}{P}} \quad (\text{رابطه ۶})$$

جهت مقایسه سرریز کلید پیانویی و سرریز خطی، ضریب  $R$  در نظر گرفته شد. ضریب  $R$  نسبت مقدار دبی عبوری از سرریز کلید پیانو قوسی به دبی عبوری از سرریز خطی که طول آن با عرض سرریز یعنی  $W$  برابر باشد که مقدار آن طبق رابطه (۷) محاسبه می‌گردد.

$$R = \frac{Q_{cpk}}{Q_n} \quad (\text{رابطه ۷})$$

در رابطه (۵)  $Q_{(c,p,k)}$  دبی عبوری از سرریز کلید پیانو قوسی و  $Q_n$  دبی عبوری از سرریز خطی هم عرض سرریز می‌باشد که از رابطه (۸) محاسبه می‌شود و طبق توصیه هگر و اشلايس مقدار ضریب دبی آن برابر  $C_d=0.42$  انتخاب می‌گردد.

$$Q = \frac{2}{3} C_d W \sqrt{2gH_t}^{1.5} \quad (\text{رابطه ۸})$$

### نتایج و بحث

در این تحقیق به جهت تکرار گراف‌های حاصله، روابط محاسبه شده، مدل‌های زیاد آزمایش شده و پارامترهای مختلف تحقیق، فقط پارامترهای مهم و کاربردی که براحتی در پروتوتایپ قابل اندازه‌گیری هستند و محققین نیز تاکید بر اثر زیاد این پارامترها دارند، به ترتیب اولویت، استفاده شده است که در این بخش، نتایج محاسبات آن‌ها ارائه خواهد شد. برای هر گراف نتایج مربوطه به همراه تفسیر آنها بیان می‌شود.

با توجه به ۳ پارامتر تأثیرگذار معرفی شده، در ادامه نتایج محاسبات این پارامترها بیان خواهد شد. با توجه به خروجی‌های آزمایشات، گراف‌های مربوط به هر یک از پارامترها ترسیم گردید که جهت تفسیر و نتیجه‌گیری ارائه شده است.

#### نتایج پارامتر ارتفاع تاج سد

شکل (۴) برای یک نسبت  $L_c/W=5.10$  و طول قوس‌های مختلف  $L_t=1.20, 1.40, 1.60$  m تأثیر پارامتر نسبت هد جریان به ارتفاع تاج سرریز  $H_t/P$  در مقابل ضریب دبی  $C_d$  مورد بررسی قرار گرفت. نتایج خروجی‌های آزمایشات نشان دهنده تأثیر افزایش ارتفاع تاج سرریز بر ضریب دبی می‌باشد. با افزایش ارتفاع تاج سرریز

از رابطه (۱) پیداست که جهت افزایش دبی عبوری، مقدار طول سرریز یا هد جریان عبوری باید افزایش داده شود. اما افزایش هد جریان باعث روگذری جریان از سواحل کناری شده و خطر آبگرفتگی سواحل بوجود می‌آید. بهترین راه حل افزایش طول تاج سرریز می‌باشد که سال‌هاست موضوع تحقیق در سطح دنیا می‌باشد. این موضوع باعث تولد نسل جدید سرریزها به نام سرریزهای کلید پیانو گشته است. به علت پیشرفت تکنولوژی ساخت سدهای بلند، که عموماً در دره‌های باریک و به شکل قوسی ساخته می‌شوند، ایده استفاده و طراحی سرریز کلید پیانو قوسی موضوع این پژوهش شد. لازم به ذکر است که در این تحقیق، بجای طول تاج سرریز  $L_t$ ، مقدار عرض سرریز  $W$  در محاسبات اعمال شده است. بر همین اساس ضریب دبی از رابطه (۲) قابل محاسبه خواهد بود.

$$C_d = \frac{3Q}{2W\sqrt{2gH_t}^{1.5}} \quad (\text{رابطه ۲})$$

#### تأثیر طول قوس سرریز

در این تحقیق برای  $L_c/W$  برای سه طول قوس مربوطه محاسبه شد. این سه طول قوس  $1/20, 1/40, 1/60$  متر در نظر گرفته شد.

#### تأثیر ارتفاع تاج سرریز

معادله عمومی سرریزها به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود. ارتفاع تاج سرریز از کف رودخانه یا از روی تاج سد یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر مقدار ضریب دبی عبوری سرریزها می‌باشد که به شکل رابطه (۱) محاسبه می‌گردد. به جهت اینکه هدف تحقیق، ارائه رابطه‌ای بدون محدودیت و برای شرایط مختلف هندسی و هیدرولیکی، و در برگیرنده همه مشخصات هندسی سرریز و سد بود، پارامترهای موثر بر ضریب شکل در سرریزهای قوسی زیگزاگی شناسایی شدند که عبارتند از  $H_t, L_t, L_c, W$  و  $P$ . بنابراین:

$$\Omega = f(P, W, L_c, L_t, H_t) \quad (\text{رابطه ۳})$$

این رابطه متشکل از پارامترهای بی‌بعد  $\frac{L_c}{W}, \frac{L_t}{W}, \frac{H_t}{P}$  می‌باشد. ضریب  $\Omega$ ، ضریب هندسی سرریز نامیده می‌شود. که به صورت رابطه (۴) ارائه شده است.

$$\Omega = \frac{(L_c - L_t).P}{WH_t} \quad (\text{رابطه ۴})$$

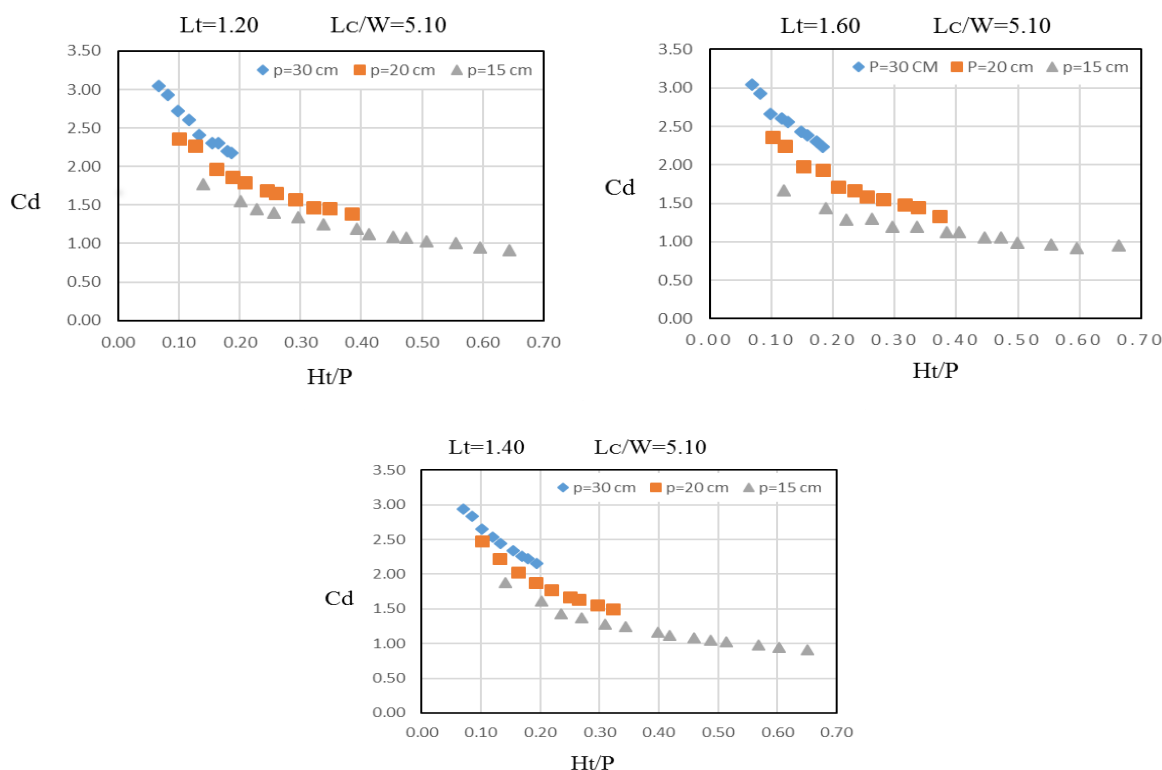
در حقیقت در این روابط هیچ محدودیت طول قوس و یا طول سرریز و یا ارتفاع تاج سرریز منظور نشده و با داشتن ضریب هندسی سرریز  $\Omega$  می‌توان ضریب  $C_d$  را محاسبه کرد. لازم به ذکر است که محاسبه  $C_d$  از این روش نیازمند ترسیم گراف و برازش منحنی مربوطه و در نهایت یافتن رابطه بین  $\Omega$  و  $C_d$  می‌باشد. همچنین جهت ارزیابی دقیق‌تر ضریب دبی، از طریق آنالیز ابعادی

Kumar et al. (2020) مطابقت دارد.

### نتایج پارامتر طول قوس

نتایج تاثیر طول قوس سرریز روی ضریب دبی در جدول (۲) بیان گردیده است. در این جدول نتایج محاسبات نسبت  $ht/p$  در مقابل  $C_d$  برای هد ثابت ۲۰ سانتی متری، در ۳ مقدار طول قوس بیان شده است.

ضریب دبی نیز افزایش می یابد. علت این موضوع، کاهش سرعت جریان نزدیک شونده و تداخل کمتر لایه های جریان و همچنین کاهش هد خالص  $h_t$  می باشد. برای یک ارتفاع تاج مشخص، با افزایش هد جریان یعنی افزایش  $H_t/P$  ضریب دبی کاهش پیدا می کند که علت آن افزایش هد عبوری و تداخل زیاد لایه های جریان و نزدیک شدن رژیم جریان به حالت مستغرق و کاهش دبی عبوری می باشد. لازم به ذکر است که نتایج حاصل شده



شکل ۴- تاثیر هد جریان روی ضریب دبی

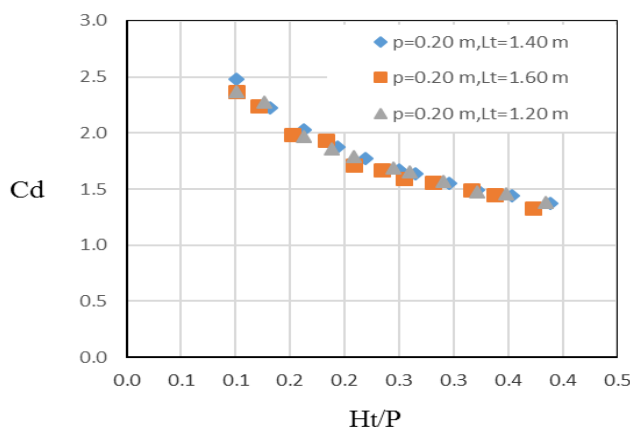
جدول ۲- نتایج تاثیر طول قوس سرریز روی ضریب دبی

$Lt/P=1/2m$ و $P=0/2m$		$Lt/P=1/4m$ و $P=0/2m$		$Lt/P=1/6m$ و $P=0/2m$	
$C_d$	$ht/P$	$C_d$	$ht/P$	$C_d$	$ht/P$
۰/۱۰۰۹	۲/۳۶۴۰	۰/۱۰۱۰	۲/۴۷۹۱	۰/۰۲۰۲	۰/۱۰۰۹
۰/۱۲۶۵	۲/۲۷۲۸	۰/۱۳۱۶	۲/۲۲۱۵	۰/۰۲۴۳	۰/۱۲۱۳
۰/۱۶۲۲	۱/۹۷۱۲	۰/۱۶۲۳	۲/۰۲۷۰	۰/۰۳۰۴	۰/۱۵۱۹
۰/۱۸۷۹	۱/۸۶۰۴	۰/۱۹۳۱	۱/۸۷۴۴	۰/۰۳۶۶	۰/۱۸۲۹
۰/۲۰۸۵	۱/۷۹۰۶	۰/۲۱۸۸	۱/۷۷۵۸	۰/۰۴۱۶	۰/۲۰۸۲
۰/۲۴۴۶	۱/۶۹۰۹	۰/۲۴۹۷	۱/۶۶۹۲	۰/۰۴۶۸	۰/۲۳۴۱
۰/۲۶۰۱	۱/۶۵۵۷	۰/۲۶۵۳	۱/۶۳۵۷	۰/۰۵۰۹	۰/۲۵۴۶
۰/۲۹۱۰	۱/۵۶۷۸	۰/۲۹۶۲	۱/۵۵۰۸	۰/۰۵۶۱	۰/۲۸۰۵
۰/۳۲۱۸	۱/۴۷۲۹	۰/۳۲۲۰	۱/۴۹۲۵	۰/۰۶۳۳	۰/۳۱۶۷
۰/۳۴۸۰	۱/۴۵۷۷	۰/۳۵۳۱	۱/۴۴۴۱	۰/۰۶۷۵	۰/۳۳۷۴
۰/۳۸۴۰	۱/۳۸۴۵	۰/۳۸۹۲	۱/۳۷۲۸	۰/۰۷۴۶	۰/۳۷۳۰



افت بیشتر هد جریان به علت افزایش زاویه جت خطوط جریان با زاویه محور طول سرریزها می‌باشد. یعنی به علت اینکه خطوط جریان نمی‌توانند با زاویه ۹۰ درجه یا نزدیک آن به کلیدهای ورودی سرریز نزدیک شوند و تداخل جریان مخصوصاً در جناحین تاج بوجود می‌آید، باعث کاهش سرعت نزدیک شونده و کاهش ضریب دبی می‌گردد. بنابراین روشن است که طول قوس  $L_t=1.40$  m دارای بیشترین ضریب دبی می‌باشد که این طول قوس بهترین و مناسب‌ترین طول قوس جهت دستیابی به ضریب دبی بیشتری می‌باشد.

با توجه به این نتایج، شکل (۵) اثر طول قوس سرریز را برای یک نسبت  $L_c/W=5.10$  بر روی ضریب دبی نشان می‌دهد که برای سایر مقادیر نسبت طول تاج به عرض سرریز نیز گراف‌های مشابه به دست آمد. اما به نظر می‌رسد طراحان، با محدودیت طول قوس و طول تاج و همچنین ارتفاع تاج سرریز مواجه باشند. بنابراین این گراف‌ها فقط برای نشان دادن نسبت اثر ارتفاع تاج سرریز مفید می‌باشد. از شکل (۵) این نکته مهم نیز نتیجه می‌شود که با افزایش بیشتر طول قوس یعنی انحنای بیشتر و افزایش شعاع قوس تا یک حدی باعث افزایش ضریب دبی می‌شود و با انحنای بیشتر مقدار ضریب دبی کاهش پیدا می‌کند که علت آن



شکل ۵- تاثیر طول قوس سرریز روی ضریب دبی

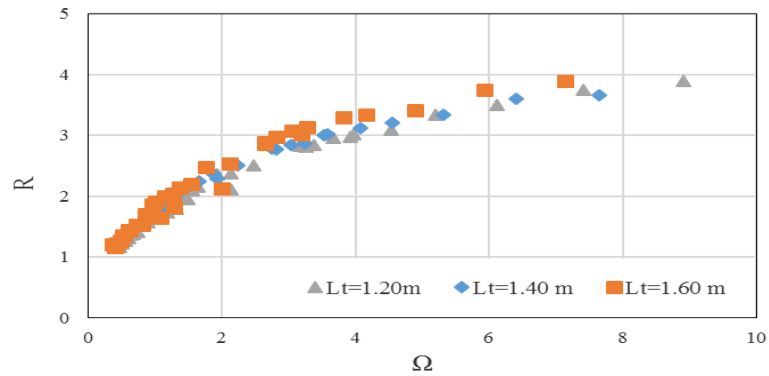
بیشتری را انتقال می‌دهد ولی در هدهای کم به علت اینکه خطوط جریان آشفتگی کمتری دارند و تقریباً به صورت عمود بر محور مرکزی قوس نیز وارد سرریز می‌شوند دبی بیشتری را انتقال می‌دهند. لازم به ذکر است که نتایج حاصل شده *Kumar et al.* (2020) مطابقت دارد.

جهت سهولت ترسیم گراف تاثیر مشخصات هندسی سرریز روی ضریب دبی، پارامتر  $\Omega^*$  مطابق رابطه (۹) معرفی می‌گردد. مقادیر  $\Omega$  به علت اختلاف عددی زیاد با ضریب دبی، باعث افزایش بسیار زیاد محور  $\Omega$  در ترسیم گراف خواهد شد.

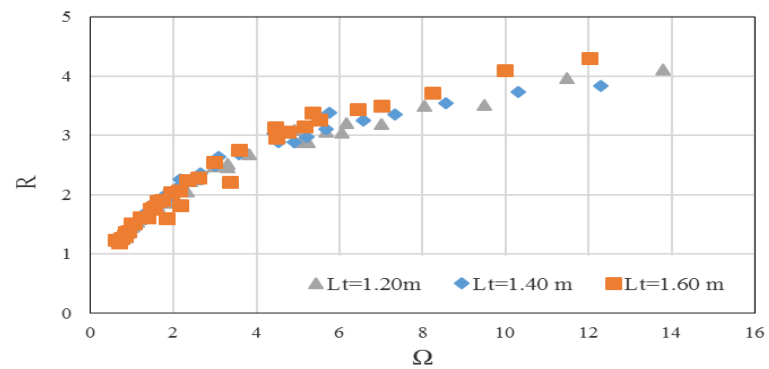
$$\Omega^* = \Omega^{*-0.5} \quad (\text{رابطه ۹})$$

از رابطه (۶) پیداست که با افزایش ضریب شکل هندسی  $\Omega$  مقدار ضریب دبی نیز افزایش پیدا می‌کند که علت آن، افزایش طول تاج سرریز، افزایش ارتفاع تاج سرریز و یا کاهش هد جریان روی سرریز می‌باشد.

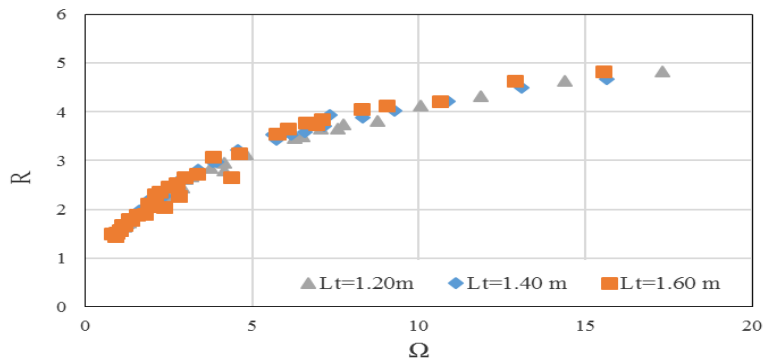
همچنین برای نشان دادن اثر کل پارامترهای هندسی بر ضریب دبی در طول قوس‌های مختلف، پارامترهای بی‌بعد  $R$  و  $\Omega$  بوسیله آنالیز ابعادی، استخراج شد. ضریب  $R$  برابر است با نسبت مقدار دبی عبوری از سرریز کلید پیانو قوسی به دبی عبوری از سرریز خطی. با استفاده از خروجی آزمایشات و مقادیر پارامترهای هندسی، نمودار  $R$  در مقابل  $\Omega$  مطابق شکل‌های (۶) تا (۸) ارائه شده است. در این گراف‌ها، برای هر سه نسبت  $L_c/W$  با افزایش ضریب هندسی  $\Omega$  مقدار ضریب نسبت  $R$  نیز افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده کاهش هد عبوری از سرریز می‌باشد یعنی با افزایش هد عبوری با افزایش تداخل لایه‌ها و آشفتگی بیشتر جریان و نزدیک شدن به حالت رژیم استغراق، که نتیجه آن کاهش دبی عبوری می‌باشد. از شکل پیداست که با افزایش طول قوس  $L_t$  مقدار ضریب نسبت دبی  $R$  نیز افزایش پیدا می‌کند. علت این موضوع این است که زاویه بین خطوط جریان و خط مرکزی قوس تقریباً عمود می‌باشد. در  $\Omega$  های کم یعنی هد عبوری  $H_t$  زیاد به علت تداخل بیشتر لایه‌های جریان طول قوس کمتر دبی



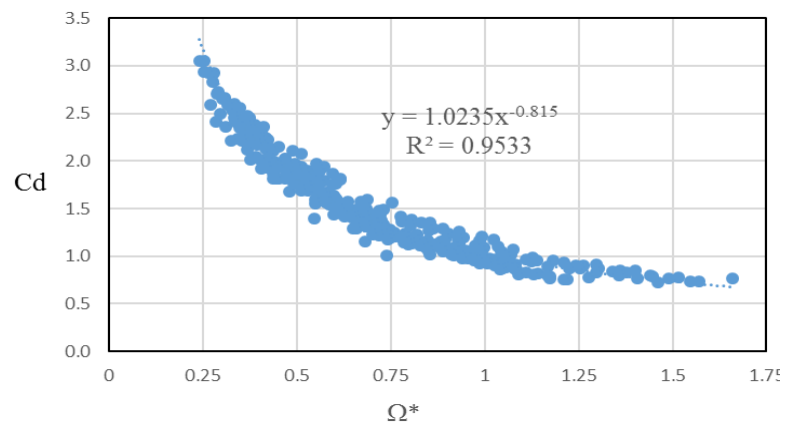
شکل ۶- تاثیر طول قوس سرریز روی دبی عبوری در  $L_c=3.20$



شکل ۷- تاثیر طول قوس سرریز روی دبی عبوری در  $L_c=4.30$



شکل ۸- تاثیر طول قوس سرریز روی دبی عبوری در  $L_c=5.10$



شکل ۹- تاثیر مشخصات هندسی سرریز روی ضریب دبی

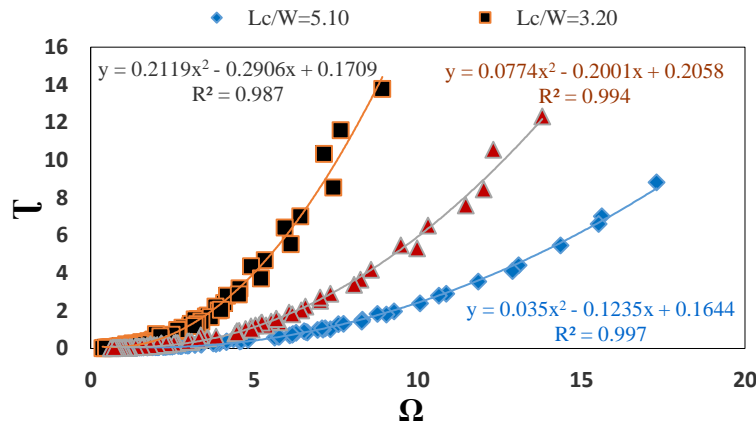
نتایج پارامتر طول تاج (مقایسه پارامترهای بی بعد  $\Omega$  و  $t$ )

شکل (۱۰) نشان‌دهنده تاثیر طول تاج سرریز روی دبی عبوری می‌باشد. برای هر نسبت  $L_c/W$  مربوطه طبق روابط (۹) الی (۱۱) بر حسب ضریب هندسی سرریز  $\Omega$  که از رابطه (۵) قابل محاسبه هست، به دست می‌آید.

شکل (۸) معادله بین  $\Omega^*$  و  $C_d$  را به صورت رابطه (۱۰)

نشان می‌دهد. مقدار  $R^2 = 0.953$  نشان‌دهنده دقت بالای این رابطه است.

$$C_d = 1.0235\Omega_*^{-0.815} \quad (\text{رابطه } 10)$$



شکل ۱۰- تاثیر طول تاج سرریز روی دبی عبوری

سرریز شده است. در همه مدل‌ها با افزایش ضریب هندسی سرریز  $\Omega$  مقادیر ضریب دبی  $t$  نیز بیشتر شده که می‌توان چنین نتیجه گرفت که افزایش  $\Omega$  یعنی کاهش مقدار هد عبوری  $H_0$  و افزایش ضریب دبی  $t$  یعنی کاهش مقدار دبی عبوری، اما با افزایش  $\Omega$  پیداست که تجمع گراف‌ها از بین رفته و برای مقادیر مختلف  $L_c/W$  گراف‌ها بازتر شده و اختلاف دبی عبوری آشکارتر شده است و نشان دهنده اینست که در هدهای عبوری کم  $H_t/P \leq 0.60$  و  $0.05 \leq$  سرریز با طول تاج بیشتر دبی بیشتری را انتقال می‌دهد. لازم به ذکر است که نتایج حاصل شده با تحقیقات Seyed Javad *et al.*, (2019) مطابقت دارد.

نتایج مقایسه پارامترهای بی بعد  $\Omega^*$  و  $R$

هدف این تحقیق، ارائه رابطه‌ای با جامعیت بیشتری و محدودیت کمتری بود که برای هر سه نسبت  $L_c/W$  اعتبار داشته باشد. شکل (۱۱) برای هر ۲۷ مدل سرریز محاسبه شده، که رابطه‌ای ساده و کلی و بدون هیچ محدودیتی می‌باشد و برای تمامی نسبت‌های مختلف طول قوس یا طول تاج سرریز اعتبار دارد. به جهت اینکه رابطه (۸) بدون هیچ محدودیتی و برای همه مدل‌ها و ضریب هندسی و ضریب دبی کاربرد دارد و همچنین دارای روابط ساده هندسی و هیدرولیکی هستند که در پروتوتایپ نیز به راحتی قابل اندازه‌گیری هستند و همچنین دارای رگرسیون بالایی نیز هست به عنوان رابطه طراحی پیشنهاد می‌گردد.

(رابطه ۱۱)

$$t = 0.035\Omega^2 - 0.1235\Omega + 0.1644 \rightarrow \frac{L_c}{W} = 5.10$$

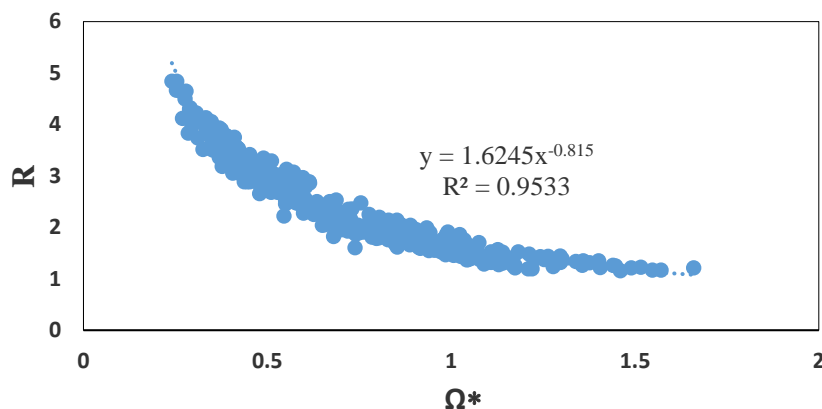
(رابطه ۱۲)

$$t = 0.0774\Omega^2 - 0.2001\Omega + 0.2058 \rightarrow \frac{L_c}{W} = 4.30$$

(رابطه ۱۳)

$$t = 0.2119\Omega^2 - 0.2906\Omega + 0.1709 \rightarrow \frac{L_c}{W} = 3.20$$

از شکل (۱۰) پیداست که با افزایش طول تاج سرریز مقدار دبی عبوری بیشتر می‌گردد. شکل (۱۰) و روابط (۱۱) الی (۱۳) برای هر سه نسبت  $L_c/W=1.20, 1.40, 1.60$  محاسبه شده‌اند. یعنی برای استفاده از این روابط محدودیت طول قوس وجود ندارد. همچنین شکل (۶) نشان می‌دهد که برای مقادیر ضریب هندسی سرریز کمتر از  $2/50$ ، مقدار دبی عبوری کم می‌باشد. حتی سرریزهای با  $L_c/W=3.20$  که کمترین نسبت را دارد دبی بیشتری را استخراج می‌نماید که علت آن افزایش هد عبوری و تداخل زیاد لایه‌های جریان و افزایش آشفتگی و کاهش انرژی پتانسیل جریان می‌باشد. سرریزهای با  $L_c/W=3.20$  به علت بزرگ بودن کلیدهای ورودی و همچنین افزایش زاویه دیواره‌ها و اینکه خطوط جریان تداخل کمتری دارند و زاویه این خطوط با زاویه دیوارخ های سرریز تقریباً عمود هستند، باعث افزایش کارایی این نوع



شکل ۱۱- ارتباط ضریب هندسی و دبی عبوری

داد که با افزایش ارتفاع تاج سرریز، ضریب دبی به علت کاهش سرعت نزدیک‌شونده و تداخل کمتر لایه‌های جریان، افزایش می‌یابد. همچنین برای یک ارتفاع تاج مشخص، با افزایش هد جریان یعنی افزایش  $H_t/P$  ضریب دبی به علت افزایش هد عبوری، تداخل بیشتر لایه‌های جریان آستانه مستغرق شدن جریان کاهش می‌یابد. نتایج نشان داد که افزایش طول قوس تا یک حدی باعث افزایش دبی عبوری خواهد شد و هر چقدر بیشتر و تیزتر گردد باعث می‌شود که افت انرژی بیشتری در محل ورود جریان به کلید های ورودی گردد و کاهش دبی عبوری را باعث گردد. طول قوس  $L_t=1.40$  m دارای بیشترین ضریب دبی است که این طول قوس بهترین و مناسب‌ترین طول قوس جهت دستیابی به ضریب دبی بیشتری می‌باشد. نتایج نهایی این پژوهش نشان داد که مدل قوسی با طول قوس  $L_t = 1/40$  متری با  $W_i/W_0=1/27$  بیشترین و مدل قوسی با  $L_t = 1/20$  متر و  $W_i/W_0=1/22$  کمترین میزان ضریب آبدگزی در جریان آزاد را دارند. در پایان روابط (۱۰) و (۱۴) جهت طراحی سرریز کلید پیانویی قوسی ارائه گردید.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

شکل (۱۱) معادله بین  $R$  و  $\Omega^*$  را به صورت رابطه (۱۴) نشان می‌دهد. مقدار  $R^2 = 0.953$  نشان‌دهنده دقت بالای این رابطه است.

$$R = 1.6245 \Omega_*^{-0.815} \quad (\text{رابطه } 14)$$

### نتیجه‌گیری

سرریز کلید پیانویی، نوعی خاص از سرریزهای غیرخطی است که عملکرد هیدرولیکی بالایی در بارهای آبی کم دارد. در این پژوهش جهت بررسی اثر قوسی کردن نشیمن‌گاه سرریز کلید پیانویی بر ضریب آبدگزی، ۲۷ مدل سازه سرریز کلید پیانویی قوسی با سه طول قوس سه طول قوس  $L_t = 1/60, 1/40, 1/20$  متر، سه طول تاج  $L_c = 3/20, 4/30, 5/10$  متر و سه ارتفاع تاج  $0/20, 0/30, 0/40$  متر مورد بررسی قرار گرفت. مطالعات این پژوهش به‌طور کلی نشان نشان داد که قوسی کردن سرریز به‌علت اینکه باعث می‌شود طول نشیمن‌گاه بیشتر گردد و باعث افزایش طول تاج سرریز گردد، افزایش دبی عبوری را نیز به همراه خواهد داشت. بررسی سه پارامتر ارتفاع تاج، طول تاج و طول قوس، نشان

### REFERENCES

- Abbasi, S. Eskandari, M. (2014). Hydraulic behavior of piano key Weir. 13th Iranian Hydraulic Conference. Department of Water Engineering, University of Tabriz. (In Farsi)
- Anderson R.M. and Tullis, B.P. (2013). Piano Key weir hydraulics and labyrinth weir comparison. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 139 (3): 246-253.
- Ansari, M. F. Mujib, A. H. (2020). Experimental studies and model development of flow over Arched Labyrinth Weirs using GMDH method. Journal of Applied Water Engineering and Research, DOI: 10.1080/23249676.2020.1799443.
- Eman, A.E. Ismail, F. (2020). Prediction of scour downstream of triangular labyrinth weirs. Alexandria Engineering Journal. 59, 1037–1047.
- Eslinger, K.R., Crookston, B.M. (2020). Energy Dissipation of Type a Piano Key Weirs. MDPI Water, 12, 1253; doi: 10.3390/w12051253.
- Kabiri-Samani, A., Borghei, S.M. and Esmaili, H. (2011). Hydraulic performance of labyrinth side weirs using vanes or piles. Water Management. 164 (5): 229-241.
- Kabiri-Samani, A.R. and Javaheri, A. (2012). Discharge coefficient for free and submerged flow over the piano key weirs. J. Hydraulic Res. 50(1), 114-120.
- Karimi Chartaghi, M. Nazari, S. Karimi Chartaghi, M. (2014). Experimental study of discharge coefficient in Trapezoidal Piano Key Weir with

- Variable Crest. 8th International Congress on Civil Engineering. Babol. (In Farsi)
- Kumar, M. Sihag, P. Tiwari, N.K. Ranjan, S. (2020). Experimental study and modelling discharge coefficient of trapezoidal and rectangular piano key weirs. *Applied Water Science*, 10:43, doi.org/10.1007/s13201-019-1104-8.
- Lempérière F. and Ouamane A. (2003). The Piano Keys weir: a new cost-effective solution for spillways. *International Journal of Hydropower and Dams*, 10 (5): 144-149.
- Machiels, O. Epricum, S. Dewals, B.J. Archambeau, P. Pirotton, M. (2011). Experimental observation of flow characteristics over a Piano Key weir. *Journal of Hydraulic Research*, 49 (3): 359-366.
- Mirzaei, Kh. and Sheibani, H. (2020). Experimental Investigation of Arched Sharp-Crested Weir Flow and comparing it with Rectangular Weir. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, DOI: 10.1007/s40996-020-00425-6.
- Mosalman Yazdi, A. Hoseini A. Nazari, S. Amanian, N. (2020). Comparison of Downstream Scour of the Rectangular and Trapezoidal Piano Key Weirs. *Journal of Hydraulics*. Doi: 10.30482/JHYD.2020.227522.1453. (In Farsi)
- Oertel, M. (2015). Discharge coefficients of piano key weirs from experimental and numerical models. 36th IAHR World Congress the Hague. Netherlands.
- Ribeiro, M.L., Boillat, J.L., Schleiss, A., Laugier, F., and Albalat, C. (2007). Rehabilitation of St-Marc dam-experimental optimization of a piano key weir. Proc. of 32nd Congress of IAHR. Vince. Italy.
- Roushangar, K. Majedi Asl, M. Alami, M.T, Shiri, J. (2018). Assessment of The effect of arc cycle angle on Discharge Coefficient of Arced Labyrinth Weirs and Piano Key Weirs. *Iranian Journal of Soil and Water Research (IJSWR)*. Volume 49, Number 2, June and July, pp. 351-341. (In Farsi)
- Roushangar K. Alami M. T. Shiri J. Majedi Asl, M. (2017). Determining discharge coefficient of labyrinth and arced labyrinth weirs using support vector machine. *Hydrology Research*. Available Online: 2017 Mar, nh2017214; DOI: 10.2166/nh.2017.214.
- Safarzadeh, A. and Abbasi. S. (2019). Convergence of Flow Layers at the Downstream of Trapezoidal Labyrinth Weir under a 15-degree Angle, in: 3th International Conf. on Applied Researches in Structural Eng and Construction Management. Sharif University of Technology., Iran.
- Safarzadeh gendeshmin, A. Norouzi, B. (2014). Three Dimensional Hydrodynamics of Arced Piano Key Spillways. *Journal of Hydraulics*. Doi: 10.30482/JHYD.2014.10176. (in Farsi)
- Seyed Javad, M.S. Omid Naeini, T. Sanei, M. (2019). Experimental study of discharge coefficient of a Trapezoidal Piano Key Side Weir. *Journal of Hydraulics*. Doi: 10.30482/JHYD.2019.152034.1332. (In Farsi)
- Sheikh Kazemi, J. Sanei, M. Azhdari Moghadam, M. (2013). The first congress of Sustainable Agriculture and Natural Resources. Tehran. Mehr Arvand Higher Education Institute. Environmentalists Extension Group and Iranian Nature Conservation Association. (In Farsi)
- Tullis, P. Amanian, N. and Waldron, D. (1995). Design of labyrinth weir spillways. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 121(3), Pp. 247-255.
- Tullis, B. P. Crookeston, B. Brislin, J. Seamons, T. Stevens, D. (2020). Geometric Effects on Discharge Relationships for Labyrinth Weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 146(10).
- Vischer, D. L. and Hager, W. H. (1998). *Dam Hydraulics*. Wiley, Switzerland.