سرریز کلید پیانویی با پاراپت‌وال‌های زاویه‌دار

علیرضا افضلیان[1*] و جواد احدیان[2]

۱*- نویسنده مسئول، دانشجوی کارشناسی ارشد، سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز. ایران

۲- استادیار دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران (SCU)، اهواز .ایران ja_ahadiyan@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۲/۲۶ تاریخ پذیرش: ۹۳/۲/۳۱

چکیده

از آنجا که یکی از کاربردهای سرریزهای کلیدپیانویی استفاده از آنها در کانال‌های آبیاری و زهکشی می‌باشد و البته این امکان وجود دارد که به جهت توان تخلیه‌ی بالای جریان، در فصول کم آبی سطح آب با کاهش شدید روبه رو شود؛ لذا با ساخت پاراپت‌وال‌هایی با توانایی تغییر شیب می‌توان این امکان را برای سرریز به وجود آورد که بتواند سطح آب در بالادست خود را در صورت کاهش دبی در یک حدّ مشخصی ثابت نگه دارد. در پژوهش حاضر با بررسی پارامترهای مهّم و تاثیرگذار بر میزان تخلیه‌ی جریان از جمله نسبت P/W_u (ارتفاع سرریز، P، به عرض یک سیکل، $W_u=W_i+W_o+2T_s$)، که دارای اهمیت زیادی در کاربرد پاراپت‌وال در سرریزهای کلیدپیانویی می‌باشد، اثر شیب‌دار شدن آن مورد بررسی قرار گرفت و سپس با اصلاح معادله‌ی عمومی سرریزها و تحلیل ابعادی، به ارائه‌ی رابطه‌ای برای برآورد ضریب دبی پرداخته خواهد شد. بدین منظور پاراپت‌وال با سه زاویه‌ی ۳، ۵/۵ و ۸ درجه در جهت جریان (مثبت) و نیز در خلاف آن (منفی)، بر روی دو سرریز کلیدپیانویی با نسبت‌های $P/W_u=۱/۳۳$ (مدل یک) و $P/W_u=۰/۵۰$ (مدل دو) احداث شد. آزمایش‌ها بر روی یک فلوم آزمایشگاهی با عرض ۸۰ سانتی‌متر، طول ۱۰ متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر انجام شد. نتایج نشان داد که مدل یک با زاویه‌ی منفی ۳ درجه توانایی بیشتری در تخلیه‌ی جریان نسبت به سرریز اوجی(تقریباً در حدود ۲/۴ برابر) را دارا می‌باشد. همچنین رابطه‌ی به دست آمده برای ضریب دبی (در حالت پاراپت‌وال شیب‌دار)، دارای ضریب تعیین برابر ۰/۹۷۸ و شاخص‌های آماری خطای ریشه مربعات میانگین نرمال شده و مربعات وزنی خطا برای رابطه‌ی مذکور به ترتیب برابر ۰/۰۲۱۴ و ۰/۰۱۸ به دست آمد.

کلید واژه‌ها: پاراپت‌وال زاویه‌دار، سرریزهای اوجی، سرریزهای زیگزاگی، سرریز کلیدپیانویی.

Piano key weir with sloped parapet wall

A.R. Afzalian[1*] and J. Ahadiyan[2]

1*- Msc student of Hydraulic Structures in Shahid Chamran University(SCU), Ahvaz. Iran

2- Asistant Professor of Water Science Engineering Faculty, Shahid Chamran University(SCU), Ahvaz. Iran

Received:17 March 2014 Accepted: 21 May 2014

Abstract

Since the one of the application of piano keys weir is use in irrigation and drainage network, and it is possible that with decrease of discharge, the water level during dehydration is faced with a drastic reduction. Therefore, by creating Parapet wall with the ability to change slope, can be allowed to weir, that any decrease in discharge, keep the water level at a certain level. In the present study, the important parameters affecting the discharge rate including of P/Wu, (weir height, P, to within one cycle width, $W_u=W_i+W_o+2T_s$) and sloped parapet wall were investigated. Then the equations of discharge coefficient with modifying the general equation weirs and dimensional analysis were obtained. To achieve these purposes, the parapet walls were built at three angles 3, 5.5 and 8 degrees in the direction of flow (positive) and the opposite (negative), on two piano key weirs, with ratios of P/Wu=1.33 (Model 1) and P/Wu=0.5 (model 2).The experiments have been carried out on a experimental flume with a width of 80cm, length 10m and a height of 60cm. The results showed that the model 1 with negative slope of 3 degrees can discharge more than the ogee weir (approximately 2.4 times). In addition, the derived relationship for the discharge coefficient (sloped parapet wall) had

R^2 equal to 0.978 and statistical indicators NRMSE and WQD equal to 0.0214 and 0.018, respectively.

KeyWords: Sloped Parapet Wall, Ogee weirs, Labyrinth weirs, Piano key weirs.

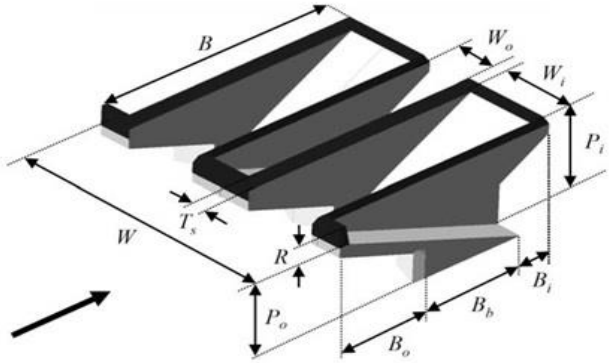
مقدمه

اولین مطالعات مربوط به سرریزهای کلیدپیانویی توسط موسسه‌ی هیدروکوپ[1] فرانسه با همکاری آزمایشگاه هیدرولیک و محیط زیست دانشگاه بیسکرا[2] در الجزایر و آزمایشگاه هیدرولیک و محیط‌زیست وزارت نیرو فرانسه[3] 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 (لیت ریبیرو و همکاران[4]، ۲۰۱۲a). دو مزیت عمده‌ی این سرریزها نسبت به سرریزهای زیگزاگی[5] معمولی شامل کاهش فضای سازه‌ای مورد نیاز برای احداث و ظرفیت بالای تخلیه‌ی سیلاب می‌باشد. این ویژگی‌ها اجازه می‌دهد که این سرریزها به آسانی بر روی تاج بسیاری از سدهای وزنی موجود قابل احداث باشند (لمپیر و اومان[6]، ۲۰۰۳). همچنین هندسه‌ی خاص این سرریز (شیب کلیدها و نسبت عرض کلید ورودی به خروجی و وجود شیروانی‌های[7] بالادست و پایین‌دست) باعث افزایش ظرفیت تخلیه، تا حدود چهار برابر بیشتر از سرریزهای اوجی شده است (آندرسون و تالیس[8]، ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲؛ لاوگیر و همکاران[9]، ۲۰۰۹). در شکل (۱) نمای سه بعدی سرریزهای کلیدپیانویی به همراه پارامترهای مهّم سازه‌ای و هیدرولیکی نمایش داده شده است.

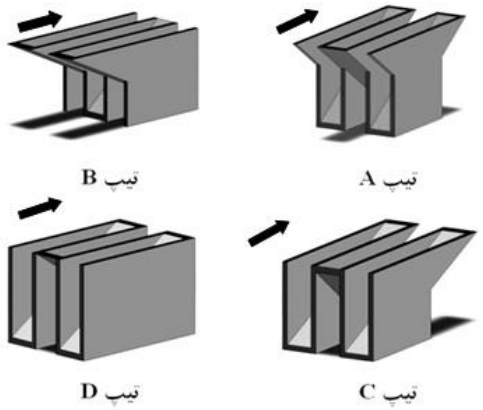
در شکل (۱)، W: عرض محل احداث، T_s: ضخامت تاج جانبی، P_o: ارتفاع کلیدخروجی، P_i: ارتفاع کلید ورودی، W_o: عرض کلید خروجی[10]، W_i: عرض کلید ورودی[11]، B_i: طول شیروانی ورودی[12]، B_o: طول شیروانی خروجی[13]، B_b: طول مبنا، B: طول تاج جانبی و R: ارتفاع پاراپت‌وال[14] می‌باشند.

شکل (۲) تیپ‌های مختلف ارائه شده برای انواع سرریزهای کلیدپیانویی را نمایش می‌دهد. مطابق با شکل (۲)، تفاوت تیپ‌های مختلف این سرریز در وجود شیروانی‌های بالادست و پایین‌دست می‌باشد. تیپ A ، شیروانی‌های بالادست و پایین‌دست را شامل می‌شود. تیپ B، شیروانی‌های پایین‌دست و تیپ C، شیروانی‌های بالادست را ندارد و در تیپ D، هیچکدام از شیروانی‌های بالادست و پایین‌دست وجود ندارند. افزایش دبی سیلاب و مسائل مربوط به ایمنی سدها باعث شده است که کمیته بین المللی سدهای بزرگ[15] 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 به وسیله سرریزهای کلیدپیانویی است (لاوگر و همکاران، ۲۰۰۹؛ لیت‌ریبیرو و همکاران، ۲۰۱۲a). لمپریر و اومان (۲۰۰۳) اولین آزمایش‌ها را روی تیپ A و B انجام دادند. آنها مطالعات خود را در سال ۲۰۰۶ برای پارامترهای بدون بعد مختلف، توسعه دادند، که در این بین، تأثیر پارامتر بدون بعد L/W را به عنوان پارامتری مهّم در میزان تخلیه‌ی سرریز معرفی نمودند. لمپریر و همکاران(۲۰۱۱) همچنین تیپ‌های مختلف سرریزهای کلیدپیانویی را که از سال ۱۹۹۸ توسط موسسه‌ی هیدروکوپ فرانسه مطالعه شده بود را در چهار نوع مختلف دسته‌بندی نمودند (شکل ۲). پارالونگ و همکاران (۲۰۱۱) جزئیات و همچنین نامگذاری پارامترهای مختلف هندسی سرریزهای کلیدپیانویی را ارائه دادند.۲۴ مشخصه‌ی هندسی این سرریز توسط آنها معرفی شد. اندرسون و تالیس (۲۰۱۱) با مقایسه‌ی تیپ A و D به این نتیجه رسیدند که وجودشیروانی‌ها اثر مثبتی بر تخلیه‌ی جریان دارد، همچنین با بررسی نسبت‌های مختلف W_i/W_o (عرض کلید ورودی به عرض کلید خروجی) مقدار ۱/۵ را برای این نسبت عددی بهینه معرفی نمودند. بررسی‌های آنها برای نسبت‌های بیشتر و کمتر از ۱/۵ نتایج نامطلوبی را بر ضریب تخلیه‌ی سرریز نشان داد. لیت‌ریبیرو و همکاران (۲۰۱۲b) با تحلیل داده‌های آزمایشگاهی موجود ضریب تخلیه‌ای برای سرریزهای کلیدپیانویی ارائه دادند. این ضریب تابعی از نسبت پارامترهای W_i/W_o، P_o/P_i، $(L-W)P_i/(WH)$ و $(B_i+B_o)/B$ بود. همچنین لیت‌ریبیرو و همکاران (۲۰۰۹) درواقع اولین محققینی بودند که تأثیر پاراپت‌وال را روی راندمان هیدرولیکی بررسی نمودند. آنها در واقع ارتفاع سرریز را بدون افزایش طول شیروانی افزایش دادند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش ۱۲/۳ درصدی ارتفاع سرریز، راندمان هیدرولیکی آن ۱۵ درصد افزایش می‌یابد. کبیری سامانی و جواهری (۲۰۱۲) با بررسی مدل‌های آزمایشگاهی مختلف به ارائه‌ی یک ضریب دبی در حالت جریان آزاد و مستغرق پرداختند.

1-Hydrocoop
2-Biskra
3-EDF (Electrical De France)
4-Leite Ribeiro *et al.*
5-Labyrinth weir
6-Lempérière and Ouamane
7-Overhang
8-Anderson and Tullis
9-Laugier *et al.*
10-Outlet key
11-Inlet key
12-Inlet overhang
13-Outlet overhang
14-Parapet wall
15-ICOLD (International Commite of Large Dam)



نامگذاری استانداری تیپ A سرریزهای کلید پیانویی (پارالونگ و همکاران[1]، ۲۰۱۱)



تیپ های A، B، C و D سرریزهای کلید پیانویی (لمپیرو و همکاران[2]، ۲۰۱۱)

جدول ۱ - مقادیر بهینه‌ی هیدرولیکی و اقتصادیِ پارامترهای مهم سرریز کلیدپیانویی

پارامتر	پژوهش حاضر	بهینه‌ی هیدرولیکی	بهینه‌ی اقتصادی
P/W_u	هردو	۱/۳۳	۰/۵۰
W_i/W_o	۱/۵۰	۱/۲۵۴	۱/۵۰
B_i/B_o	۱/۰۰	۰/۳۳۳	۱/۰۰

1 - pralong *et al.*
2- Lempérière *et al.*

ماچیلز و همکاران[1] (۲۰۱۱) جامع‌ترین و نسبتاً کامل‌ترین مطالعات را بر روی سرریزهای کلیدپیانویی انجام داد. وی با بررسی پروفیل‌های سرعت، فشار، سطح آب و همچنین عدد فرود، و ساخت مدل‌های آزمایشگاهی که همگی به صورت متقارن[2] جهت تعمیم مشخصات بر کل سرریز بود، نهایتاً به معادله‌هایی برای برآورد دبی‌های کلید ورودی، خروجی، و تاج جانبی دست یافت. پیچیدگی جریان برروی سرریزهای کلیدپیانویی و نیز پارامترهای تأثیرگذار هندسی زیاد آنها، آزمایش روی مدل‌های فیزیکی را حتماً احتیاج خواهد داشت (سیکرو و همکاران[3]، ۲۰۱۱؛ لاوگیر و همکاران، ۲۰۰۹؛ پارالونگ و همکاران، ۲۰۱۱).

اهداف پژوهش

در این پژوهش با تغییر هندسه‌ی پاراپت‌وال روی تاج جانبی سرریز کلیدپیانویی، ضمن مقایسه با میزان تخلیه‌ی سرریزهای اوجی با بررسی روابط مختلف به کمک نرم افزار آماری SPSS، معادله‌ای برای برآورد ضریب تخلیه‌ی جریان در حالت آزاد برای پاراپت‌وال شیب‌دار ارائه خواهد شد. دست‌یابی به اهداف:

۱- ابتدا دو سرریز کلیدپیانویی با نسبت‌های P/W_u=۱/۳۳ و ۰/۵۰ =P/W_uساخته و همچنین برای هرکدام از این دو سرریز از پاراپت‌وال با سه زاویه‌ی ۳، ۵/۵ و ۸ درجه مثبت و منفی همانند شکل (۳) استفاده شد. جهت مقایسه‌ی سرریزهای کلیدپیانویی (با پاراپت‌وال شیب‌دار) با سرریز اوجی معادل، از معیارهای ارائه شده توسط سازمان احیا اراضی امریکا[4] استفاده شد. به این ترتیب که برای سرریز کلیدپیانویی با نسبت‌های P/W_u=۱/۳۳ و P/W_u= ۰/۵۰ به ترتیب از دو مدل سرریز اوجی با نسبت‌های P/W=۰/۳۸۵ و P/W=۰/۱۳۹ استفاده گردید.

۲- از آنجا که رابطه‌ی عمومی سرریزها به منظور استفاده برای سرریزهای کلیدپیانویی(با پاراپت‌وال شیب‌دار) به جهت تغییر همزمان بار آبی و طولی از سرریز که در تخلیه‌ی جریان شرکت دارد، مناسب نمی‌باشد، لذا با تغییراتی محافظه‌کارانه، این معادله، با انتگرال‌گیری در طول تاج جانبی اصلاح شد. در پایان برای تبدیل دبی تئوری این معادله‌ها به دبی اصلی جریان (با فرضیه‌هایی که در ادامه به آنها اشاره خواهد شد)، ضریب دبی جدیدی تعریف و پس از تحلیل ابعادی و تأثیر هرکدام از پارامترهای بی بعد بر این ضریب، رابطه‌ای که شامل پارامترهای موثر بر این ضریب است ارائه خواهد شد.

مواد و روش‌ها

تحلیل ابعادی

بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر دبی خروجی از سرریزهای کلیدپیانویی با پاراپت‌وال شیب‌دار نشان می‌دهد که می‌توان با روش تحلیل ابعادی پارامترهای بی بعد مؤثر بر ضریب تخلیه‌ی جریان را به صورت معادله‌ی (۱) تقسیم‌بندی نمود:

$$C_{da} = f(W_e, R_e, \frac{W_i}{W_o}, \frac{L}{W}\frac{P}{W_u}, \frac{H}{R}, \frac{H}{P}, \frac{B_i}{B_o}, \frac{H}{L_W}) \quad (۱)$$

از آنجا که در بارهای آبی پایین تیغه‌های جانبی جریان با تاج جانبی در تماس هستند، لذا کشش سطحی و در نتیجه عدد وبر بر ضریب تخلیه تأثیرگذار خواهد بود. مقادیر بالای عدد رینولدز، تأثیر ناچیز لزوجت را بر جریان نشان می‌دهد. همچنین طبق مطالعات انجام گرفته توسط میچلز (۲۰۱۲) نسبت‌های W_i/W_o و نیز B_i/B_o دارای مقادیر بهینه اقتصادی و هیدرولیکی می‌باشند. مقادیر بهینه‌ی اقتصادی و هیدرولیکی مطالعه شده و همچنین بکار گرفته شده در پژوهش حاضر در جدول (۱) آورده شده است.

با توجّه به این موضوع که در پژوهش حاضر نسبت‌های W_i/W_o و B_i/B_o ثابت در نظر گرفته شده است و همچنین نظر به محدودیت‌های فلوم آزمایشگاهی، برای تمام مدل‌ها، مقدار L/W=۳/۹۸ نیز ثابت می‌باشد، لذا در نهایت ضریب تخلیه‌ی جریان تابعی از پارامترهای بی بعد به شرح معادله‌ی (۲) معرفی شده است.

$$C_{da} = f(W_e, \frac{P}{W_u}, \frac{H}{R}, \frac{H}{P}, \frac{H}{L_W}) \quad (۲)$$

تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی دانشکده‌ی مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. برنامه‌ریزی انجام آزمایش‌ها چنان انجام شده بود، تا محدوده‌ی دبی‌های مورد استفاده بتواند بارهای آبی پایین را نیز تأمین کند. در کل محدوده‌ی تغییرات دبی از ۱ لیتر بر ثانیه تا ۱۶۰ لیتر بر ثانیه متغییر 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 ویژه‌ی فلوم مورد استفاده که برای آزمایش‌های با دبی‌های بالا ساخته شده است، در ابتدا به به منظور آرام کردن جریان و کنترل نوسانات سطح آب در هنگام قرائت بار آبی روی سرریز، از سیستم شبکه لوله‌های موازی همراه با دو توری فلزی که در انتهای آن نصب شده بود، استفاده شد؛ که به نحو بسیار مطلوبی شرایط را برای

1- Machiels *et al.*
2-Symmetric
3-Cicero *et al.*
4-United State Bareu of Reclamation, USBR

شروع آزمایش‌ها فراهم می‌آورد. مدل‌ها تماماً از صفحات پلکسی گلاس با ضخامت یک سانتی‌متر ساخته شدند. جهت اتصال قطعات به یکدیگر پس از برش لیزری از چسب قطره‌ای و جهت آببندی از سیلیکون آنتیا استفاده شد. این چسب سیلیکون امکان تسریع در فرآیند انجام آزمایش‌ها را فراهم می‌آورد، به نحوی که پس از یک ساعت از اتصال، امکان شروع آزمایش‌ها فراهم می‌شد. برای قرائت سطح آب از یک عمق‌یاب نقطه‌ای مستقر روی فلوم استفاده و به جهت حساسیت در میزان جریان، دبی توسط یک دبی سنج دیجیتالی و یک سرریز مستطیلی به عرض یک متر، مستقر در انتهای فلوم خوانده، مقایسه و تنظیم می‌شد. شکل (۳) پلان و مقطع طولی قرار سرریز به همراه پاراپت وال زاویه‌دار را نمایش می‌دهد.

تمامی مدل‌های سرریز کلیدپیانویی، با استاندارد تیپ A ساخته شدند. شکل (۴) پلان و مقطع فلوم مورد استفاده را نشان می‌دهد (ابعاد بر حسب متر می‌باشند). جدول (۲) بعضی از ابعاد و نسبت‌های مهم سرریزهای کلیدپیانویی و اوجی را نشان می‌دهد.

برای مقایسه‌ی راندمان سرریز کلیدپیانویی با سرریز اوجی به این صورت عمل می‌شد که ابتدا با توجه به بار آبی روی سرریز کلیدپیانویی و دبی برداشت شده از دبی سنج، منحنی دبی- اشل مدل‌های شیب‌دار به دست می‌آمد. سپس با توجه به عرض فلوم و عمق بدست آمده (P+H)، سرعت متوسط جریان (V=Q/(P+H)) و سپس ارتفاع معادل سرعت ($V^2/2g$) محاسبه و با توجه به نمودارهای ارائه شده توسط سازمان احیا اراضی امریکا و ارتفاع معادلی که برای سرریز اوجی در نظر گرفته شده بود، ضریب دبی سرریز اوجی به دست می‌آمد و به این طریق دبی سرریز اوجی محاسبه می‌شد. همچنین برای بدست آوردن طول تاج جانبی که در تخلیه‌ی جریان شرکت دارد برای زمانی که سرریز کاملاً مستغرق نشده است (H<R)، ابتدا طول تاج جانبی که خشک است محاسبه می‌شد و سپس از طول کل تاج جانبی کسر می‌شد. شکل (۵-الف) نمایی از پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی با پاراپت‌وال شیب‌دار مثبت و (۵-ب) تداخل تیغه‌های جانبی در انتهای پایین‌دست تاج جانبی این مدل را نشان می‌دهد. بالادست خط جداکننده (در شکل ۵- الف)، طولی از تاج سرریز که در تخلیه‌ی جریان شرکت ندارد و در جدول (۳) با L_d مشخص گردیده است، نمایش داده شده است. جدول (۳) بخشی از داده‌های آزمایشگاهی مربوط به مدل یک با زاویه ۵/۵ درجه‌ی مثبت و ۵/۵ درجه‌ی منفی را نشان می‌دهد. در جدول (۳)، L_d: نشان‌دهنده‌ی طولی از سرریز که در تخلیه شرکت ندارد و L_w: طول موثر سرریز را نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

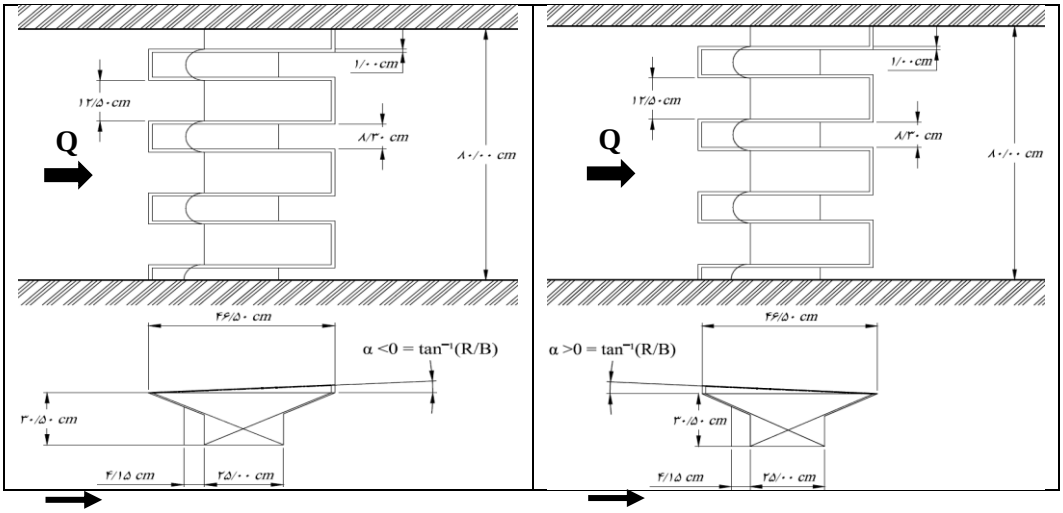
شکل (۶) نمودار دبی- تراز سطح آب سرریز کلیدپیانویی (با پاراپت‌وال شیب‌دار) را نشان می‌دهد.

همان‌طور که از شکل (۶) مشخص است در هر دو مدل، در محدوده‌ی مشخصی از تراز سطح آب، به ازای یک بار آبی ثابت، سرریز کلیدپیانویی با شیب منفی پاراپت‌وال، نسبت به شیب مثبت، دبی بیشتری را عبور می‌دهد. اگرچه در مدل پاراپت‌وال شیب‌دار مثبت، طول تاجی از سرریز که در تخلیه‌ی جریان شرکت می‌کند، به ازای بار آبی یکسان (تا زمانی که سرریز کاملاً مستغرق نشده است) بیشتر از پاراپت‌وال دارای شیب منفی است و انتظار می‌رود که به ازای هد یکسان مدل پاراپت‌وال دارای شیبِ مثبت دبی بیشتری را عبور دهد، اما مشاهدات نشان می‌دهد که به دو دلیل این اتفاق رخ نمی‌دهد؛ و مدل پاراپت‌وال دارای شیب منفی، راندمان بالاتری، البته قبل از استغراق کامل سرریز دارد:

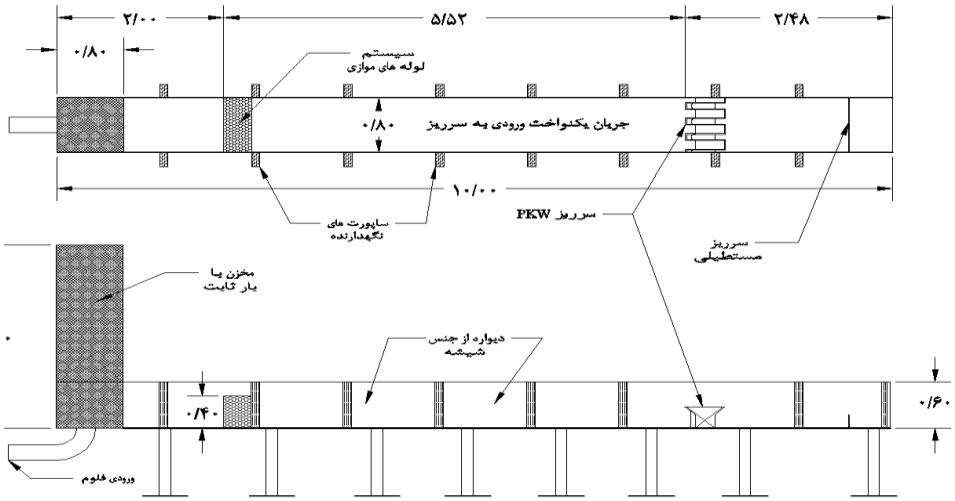
۱- از آنجا که در مدل پاراپت‌وال شیب منفی، کلیدهای ورودی (که دارای عرض بیشتری نسبت به کلیدهای خروجی می‌باشند) متناسب با شیب مربوطه، بسته شده‌اند و تاج جانبی در خلاف جهت جریان شیب‌دار شده است، لذا خطوط جریان با تغییر جهت کاملاً ۹۰ درجه از تاج جانبی خارج می‌شوند که این اتفاق در مدل پاراپت‌وال با شیب مثبت رخ نمی‌دهد.

۲- تغییر ۹۰ درجه‌ی خطوط جریان باعث می‌شود که تیغه‌ی جانبی در هنگام عبور از تاج سرریز در نزدیکی کلید خروجی از زیر تیغه‌ی کلید خروجی عبور کند و این اتفاق عملاً باعث می‌شود طول مؤثری از سرریز که تا قبل از استغراق کامل، در تخلیه‌ی جریان شرکت دارد، در مدل پاراپت‌وال با شیب منفی بیشتر از پاراپت‌وال با شیب مثبت باشد. شکل (۷) این دو اتفاق را نشان می‌دهد.

۳- از آنجایی که در زاویه‌ی منفی ۳ درجه، بنابر توضیحات مندرج در بندهای قبل، با افزایش بار آبی طول بیشتری از تاج سرریز در تخلیه‌ی جریان شرکت می‌کند، لذا مدل پاراپت‌وال با شیب منفی (۳درجه)، در نسبت $H_t/P=$ ۰/۱۶، بیشترین افزایش دبی را نسبت به سرریز اوجی با همان ارتفاع و در حدود ۲/۴ برابر آن دارد. همچنین از آنجا که با افزایش دبی تداخل تیغه‌های جریان در تمام مدل‌ها اتفاق می‌افتد، لذا از یک نسبت H_t/P به بعد کاهش Q_{pkw}/Q_{ogee} در تمام مدل‌ها مشهود است (شکل ۸ و جدول ۴). بیشترین نسبت Q_{pkw}/Q_{ogee} برای مدل یک (P/W_u=۱/۳۳) با زاویه‌ی منفی ۳ درجه در نسبت H_t/P=۰/۱۶ و کمترین مقدار آن برای مدل دو (P/W_u=۰/۵۰) با زاویه‌ی مثبت ۸ درجه در نسبت H_t/P=۱/۱۵ رخ می‌دهد (جدول ۴).



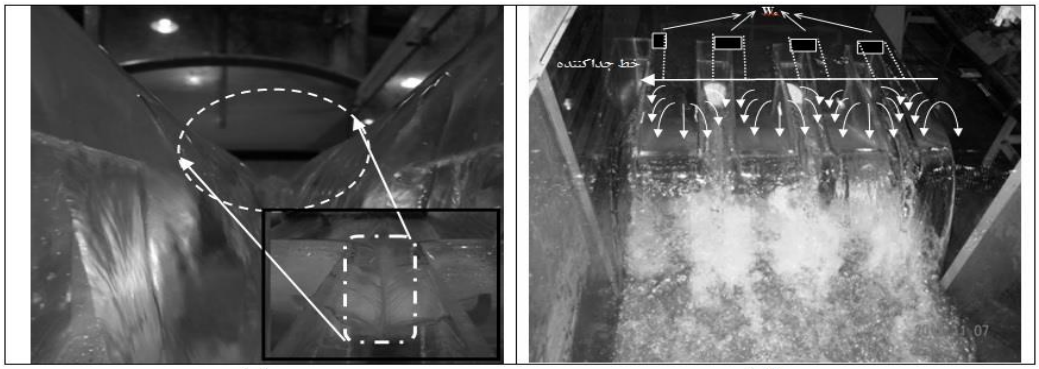
شکل ۳- پلان و مقطع طولی مدل‌های پاراپت‌وال شیب‌دار



شکل ۴- پلان و پروفیل طولی فلوم آزمایشگاهی و محل قرارگیری سرریزPKW

جدول ۲- ابعاد سرریز اوجی و کلید پیانویی

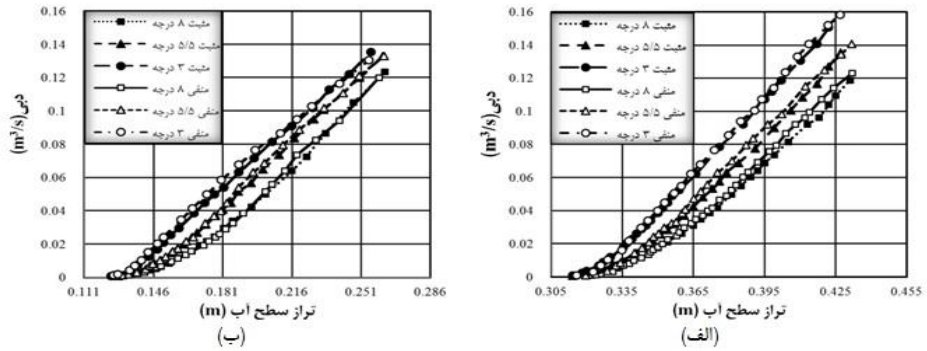
مدل سریز	P/W_u	W_i/W_o	$\alpha=\tan^{-1}(R/B)$	W[cm]	P[cm]	P/W
کلیدپیانویی	۱/۳۳	۱/۵۰	۳°، ۵/۵° و ۸°	۸۰/۰۰	۳۰/۵۰	–
	۰/۵۰	۱/۵۰	۳°، ۵/۵° و ۸°	۸۰/۰۰	۱۱/۱۰	–
اوجی	–	–	–	۸۰/۰۰	۳۰/۵۰	۰/۳۸۵
	–	–	–	۸۰/۰۰	۱۱/۱۰	۰/۱۳۹



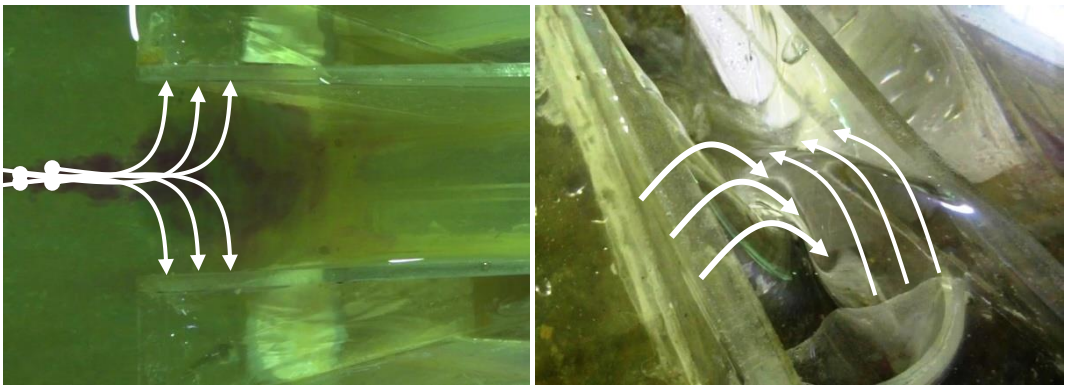
شکل ۵- سرریز کلیدپیانویی با پاراپت‌وال شیب‌دار (الف) پایین‌دست مدل یک با زاویه‌ی مثبت ۸ درجه در H=۶ cm (ب) شروع تداخل تیغه‌های جانبی در انتهای پایین‌دست تاج جانبی در همین مدل

جدول ۳ – بخشی از داده‌های آزمایشگاهی

منفی ۵/۵ درجه(P/W_u=۱/۳۳)				مثبت ۵/۵ درجه (P/W_u=۱/۳۳)			
Lw [cm]	Ld [cm]	دبی [m^3/s]	بار آبی [m]	Lw [cm]	Ld [cm]	دبی [m^3/s]	بار آبی [m]
۱۲۸/۷۵	۲۷۱/۲۵	۰/۰۰۱۸	۰/۰۱۹	۱۲۹/۱۵	۲۷۰/۵۵	۰/۰۰۲۵	۰/۰۱۶
۱۹۵/۲۵	۲۰۴/۷۵	۰/۰۰۶۸	۰/۰۲۷	۲۰۰/۵۵	۱۹۹/۱۵	۰/۰۰۷۶	۰/۰۲۶
۲۰۹/۲۵	۱۹۰/۷۵	۰/۰۰۸۵	۰/۰۲۹	۲۳۳/۶۵	۱۷۶/۰۵	۰/۰۰۹۹	۰/۰۳۰
۲۵۴/۷۵	۱۴۵/۲۵	۰/۰۱۴۵	۰/۰۳۵	۲۵۸/۶۵	۱۴۱/۰۵	۰/۰۱۴۵	۰/۰۳۶
۲۸۲/۷۵	۱۱۷/۲۵	۰/۰۱۷۴	۰/۰۳۸	۲۷۹/۶۵	۱۲۰/۰۵	۰/۰۱۸	۰/۰۳۹
۲۹۶/۷۵	۱۰۳/۲۵	۰/۰۲۱۰	۰/۰۴۱	۳۰۷/۶۵	۹۲/۰۵	۰/۰۲۱۶	۰/۰۴۱
۳۲۴/۷۵	۷۵/۲۵	۰/۰۲۴۲	۰/۰۴۳	۳۲۶/۵۵	۷۳/۱۵	۰/۰۲۵۵	۰/۰۴۳
۳۲۵/۲۵	۶۴/۷۵	۰/۰۲۶۲	۰/۰۴۴	۳۹۹/۷۰	۰/۰۰	۰/۰۲۸۲	۰/۰۴۹
۳۹۹/۷۰	۰/۰۰	۰/۰۲۹۶	۰/۰۴۸	۳۹۹/۷۰	۰/۰۰	۰/۰۳۱۸	۰/۰۵۲
۳۹۹/۷۰	۰/۰۰	۰/۰۳۳۲	۰/۰۵۳	۳۹۹/۷۰	۰/۰۰	۰/۰۴۲۴	۰/۰۶۰
۳۹۹/۷۰	۰/۰۰	۰/۰۳۸۵	۰/۰۵۵	۳۹۹/۷۰	۰/۰۰	۰/۰۴۸۱	۰/۰۶۴
۳۹۹/۷۰	۰/۰۰	۰/۰۴۰۸	۰/۰۵۷	۳۹۹/۷۰	۰/۰۰	۰/۰۵۳۳	۰/۰۶۸

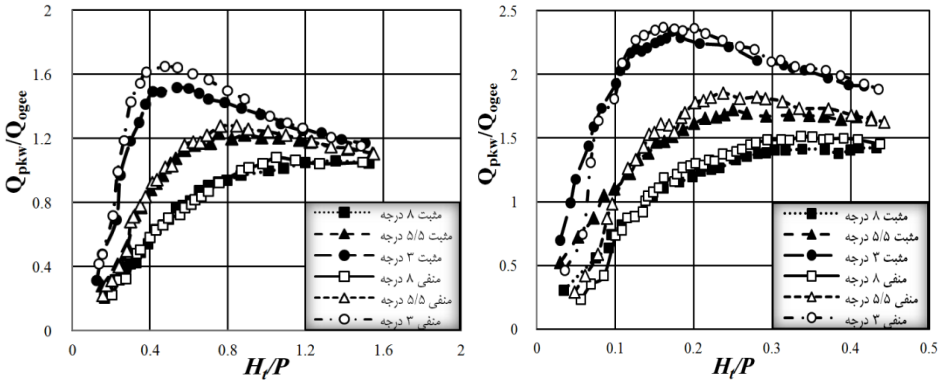


شکل ۶- دبی، تراز سطح آب در مدل‌های شیب‌دار (الف: P/W_u = ۱/۳۳ و ب: P/W_u =۰/۵۰)



(ب) (الف)

شکل ۷- الف: عبور تیغه‌ی جانبی از زیر تیغه‌ی کلید خروجی در مدل P/W_u = ۰/۵۰ با پاراپت‌وال شیب منفی ب: تغییر ۹۰ درجه‌ی خطوط جریان در مدل P/W_u = ۱/۳۳ با پاراپت‌وال شیب منفی



(ب) (الف)

شکل ۸- نسبت Q_{pkw}/Q_{ogee} در مقابل H_t/P برای مدل یک (الف) و دو (ب) در تمامی زوایا

جدول ۴- بیشینه‌ی نسبت Q_{pkw}/Q_{ogee} برای تمام مدل‌های کلید پیانویی با پاراپت‌وال شیب‌دار

مدل	شیب	زاویه درجه	H_t/P	Q_{pkw}/Q_{ogee}	مدل	شیب	زاویه درجه	H_t/P	Q_{pkw}/Q_{ogee}
		۸	۰/۳۴	۱/۵۰			۸	۱/۰۵	۱/۰۸
	منفی	۵/۵	۰/۲۴	۱/۸۵		منفی	۵/۵	۰/۷۶	۱/۲۸
یک		۳	۰/۱۶	۲/۴۱	دو		۳	۰/۴۷	۱/۶۵
P/W_u=1.33		۸	۰/۳۰	۱/۴۰	P/W_u=0.5		۸	۱/۱۵	۱/۰۶
	مثبت	۵/۵	۰/۲۵	۱/۷۲		مثبت	۵/۵	۰/۷۶	۱/۲۷
		۳	۰/۱۶	۲/۲۷			۳	۰/۴۶	۱/۵۰

اصلاح معادله‌ی عمومی سرریزها

به دلیل پیچیدگی الگوی جریان در سرریزهای زیگزاگی علی‌الخصوص کلید پیانویی، از معادله‌ی عمومی سرریزها (معادله‌ی ۳) برای به دست آوردن ضریب تخلیه‌ی جریان استفاده می‌شود.

$$Q_{tp} = \frac{2}{3}\sqrt{2g}LH_t^{1.5} \qquad (۳)$$

اما از آنجا که در مدل‌های پاراپت‌وال شیب‌دار، طول مؤثر سرریز با افزایش بار آبی تغییر می‌کند، لذا معادله‌ی عمومی سرریزها جهت

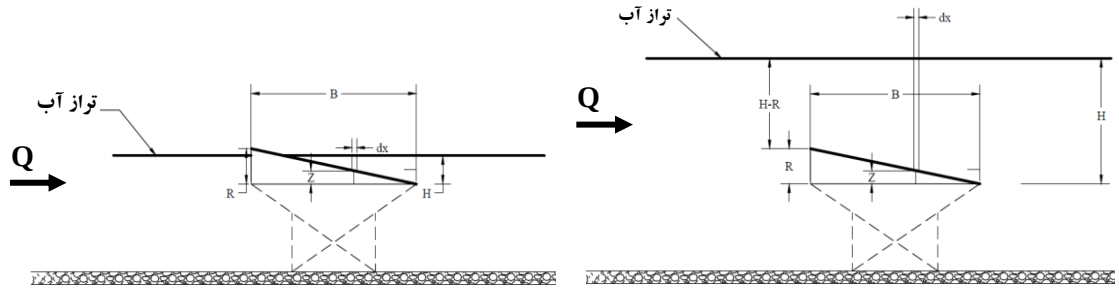
استفاده برای این نوع سرریز مناسب نمی‌باشد و باید اصلاحاتی در آن صورت گیرد. این معادله را زمانی که سرریز کاملاً مستغرق نبوده (H<R) و با فرضیاتی محافظه‌کارانه از جمله افقی بودن پروفیل سطح آب روی تاج جانبی و عدم تداخل تیغه‌های جریان می‌توان با انتگرال‌گیری روی تاج جانبی به صورت معادله‌های (۴) و (۶) ساده نمود. جدول (۵) معادله‌های اصلاح شده (۴) تا (۷) را نمایش می‌دهد. همچنین برای زمانی که سرریز کاملاً مستغرق می‌باشد (H>R) معادله‌ی (۳) به معادله‌های (۵) و (۷) تبدیل می‌شود. در معادله‌های (۳) تا (۷)، Q: دبی جریان، L: طول تاج سرریز [n(W$_i$+W$_o$+2B)]، g: شتاب ثقل، H: بار آبی روی سرریز، n: تعداد سیکل، W$_i$: عرض کلید ورودی، W$_o$: عرض کلید خروجی، R: ارتفاع پاراپت‌وال و B: طول تاج جانبی سرریز می‌باشند. جدول (۵) شرایط استفاده از این معادله‌ها را نشان می‌دهد. از آنجا که بنابر دلایلی که در بندهای قبل توضیح داده شده است، دبی به دست آمده از معادله‌های (۴) تا (۷) محافظه‌کارانه می‌باشد، لذا باید در ضریب اصلاحی که در واقع همان ضریب تخلیه‌ی جریان در معادله‌های عمومی (اصلاحی) سرریزها می‌باشد، ضرب شود تا مقدار دبی واقعی جریان به دست آید ($Q_a=Q_{tr}.C_{da}$). شکل (۹) و جدول (۶) خلاصه‌ای از مراحل انتگرال‌گیری را نمایش می‌دهند.

جدول ۵- معادله‌های اصلاح شده برای شیب‌های منفی و مثبت پاراپت‌وال

شیب	H/R	معادله	
منفی	<۱	$Q_{tr}=\frac{2}{3}\sqrt{2g}nW_oH^{1.5}+\frac{4}{15R}\sqrt{2g}\,2nBH^{2.5}$	(۴)
	>۱	$Q_{tr}=\frac{2}{3}\sqrt{2g}nW_oH^{1.5}+\frac{4}{15R}\sqrt{2g}\,2nB[H^{2.5}-(H-R)^{2.5}]+\frac{2}{3}\sqrt{2g}nW_i(H-R)^{1.5}$	(۵)
مثبت	<۱	$Q_{tr}=\frac{2}{3}\sqrt{2g}nW_iH^{1.5}+\frac{4}{15R}\sqrt{2g}\,2nBH^{2.5}$	(۶)
	>۱	$Q_{tr}=\frac{2}{3}\sqrt{2g}nW_iH^{1.5}+\frac{4}{15R}\sqrt{2g}\,2nB[H^{2.5}-(H-R)^{2.5}]+\frac{2}{3}\sqrt{2g}nW_o(H-R)^{1.5}$	(۷)

جدول ۶- خلاصه‌ی مراحل انتگرال‌گیری

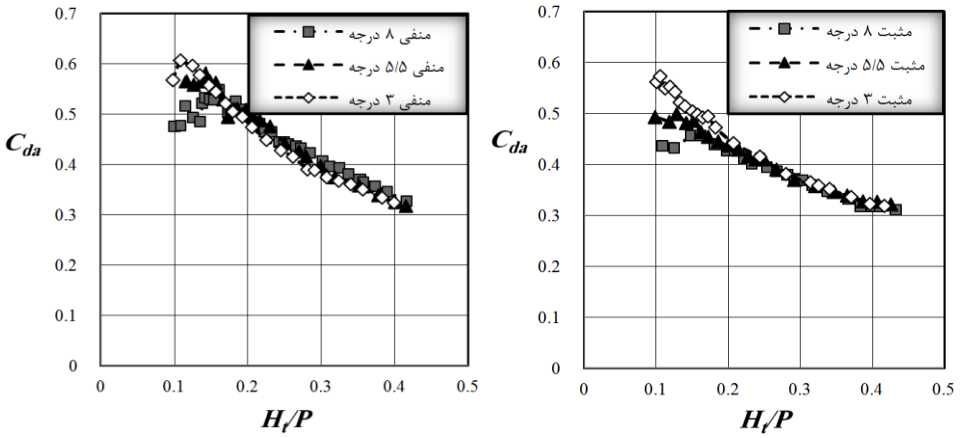
$dQ_s=\frac{2}{3}\sqrt{2g}\,(H-Z)^{1.5}\,dx \xrightarrow{Z=\frac{Rx}{B}}$		$dQ_s=\frac{2}{3}\sqrt{2g}\,(H-Z)^{1.5}\,dx \xrightarrow{Z=(1-x)\frac{R}{B}}$	
$dQ_s=\frac{2}{3}\sqrt{2g}\,(H-\frac{Rx}{B})^{1.5}\,dx\rightarrow$	H<R	$dQ_s=\frac{2}{3}\sqrt{2g}\,(H-(1-x)\frac{R}{B})^{1.5}\,dx\rightarrow$	H>R
$Q_s=\int_0^B\frac{2}{3}\sqrt{2g}\,(H-\frac{Rx}{B})^{1.5}\,dx\rightarrow\ldots$		$Q_s=\int_0^B\frac{2}{3}\sqrt{2g}\,(H-(1-x)\frac{R}{B})^{1.5}\,dx\rightarrow\ldots$	



شکل ۹- المان‌گیری روی تاج جانبی مدل پاراپت‌وال با شیب مثبت

شکل (۹) نحوه‌ی المان‌گیری روی تاج جانبی را برای زوایای مثبت در دو حالت H<R و H>R، نشان می‌دهد. در جدول (۶) چند مرحله از روش انتگرال‌گیری ارائه شده است. شکل (۱۰) ضریب دبی اصلاحی (C_{da}) را در مقابل H_t/P برای تمامی مدل‌های شیب‌دار نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۱۰) نمایان است، ضریب دبی تعریف شده (C_{da})، با افزایش نسبت H_t/P در هر دو مدل و تمام زوایای بررسی شده، ابتدا روندی افزایشی و سپس به علت تأثیرات کشش سطحی (تماس دائم تیغه‌ی جانبی با تاج جانبی) روندی تقریباً ثابت و در انتها نیز با استغراق کامل سرریز کاهش می‌یابد. همان‌طور که انتظار می‌رود در هر دو مدل برای زاویه‌ی ۳ درجه (منفی و مثبت) به دلیل اینکه تا قبل از شروع تداخل تیغه‌های جانبی، طول بیشتری از تاج جانبی در تخلیه شرکت می‌کند، بیشترین مقدار ضریب دبی در نسبت‌های H_t/P کمتر اتفاق می‌افتد. همچنین در مدل دو (P/W_u=۰/۵۰) به علّت محافظه‌کارانه بودن معادله‌های (۴) تا (۷) و تداخل شدید تیغه‌های جانبی و نیز کاهش تأثیر تاج جانبی در تخلیه‌ی جریان (نسبت به مدل یک) ضریب دبی با افزایش نسبت H_t/P برای زاویه‌ی ۳ درجه کمتر از زوایای ۵/۵ و ۸ درجه می‌باشد (شکل ۱۰ ج و د).

مطابق با نتایج مندرج در سری شکل (۱۰) می‌توان مقادیر بیشینه‌ی ضریب دبی را استخراج نمود تا بررسی‌های کمی نیز صورت پذیرد. بر این اساس بیشترین مقدار C_{da} در مقابل H_t/P برای هر دو مدل سرریز کلیدپیانویی و تمامی زوایای بررسی شده و در جدول (۷) آورده شده است. مطابق این جدول، بیشترین مقدار ضریب دبی برای هر دو مدل، مربوط به زاویه‌ی ۳ درجه‌ی منفی و به ترتیب برای مدل یک برابر ۰/۶۱ و برای مدل ۲ برابر ۰/۴۱ می‌باشد.

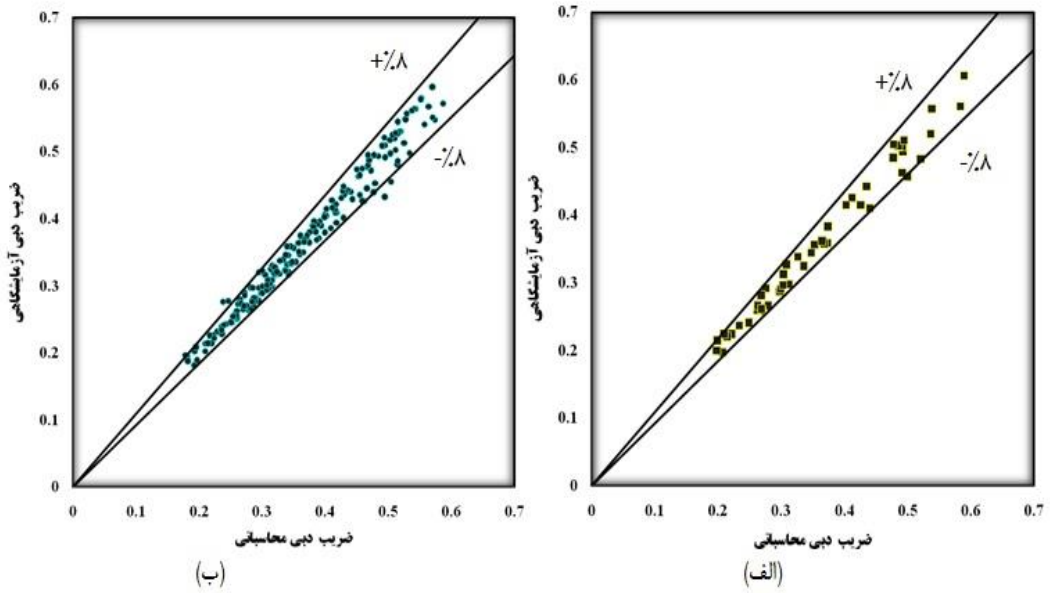


الف: P/W_u=۱/۳۳ و زوایای مثبت پاراپت‌وال **ب: P/W_u=۱/۳۳ و زوایای منفی پاراپت‌وال**

شکل ۱۰ – ضریب تخلیه‌ی جریان(C_{da}) سرریز کلیدپیانویی(با پاراپت‌وال شیب‌دار) در مقابل H_t/P

جدول ۷- مقادیر ضریب دبی در مقابل H_t/P

مدل	شیب پاراپت‌وال	زاویه	H_t/P	C_{da}	مدل	شیب پاراپت‌وال	زاویه	H_t/P	C_{da}
		۸	۰/۱۶	۰/۵۴			۸	۰/۵۰	۰/۳۰
	منفی	۵/۵	۰/۱۴	۰/۵۸		منفی	۵/۵	۰/۴۱	۰/۳۴
یک		۳	۰/۱۱	۰/۶۱	دو		۳	۰/۳۰	۰/۴۱
P/W_u=1.33		۸	۰/۱۶	۰/۴۶	P/W_u=0.5		۸	۰/۵۳	۰/۲۸
	مثبت	۵/۵	۰/۱۳	۰/۵۰		مثبت	۵/۵	۰/۵۰	۰/۳۰
		۳	۰/۱۰	۰/۵۷			۳	۰/۴۱	۰/۳۳



شکل ۱۱- مقایسه‌ی ضریب دبی آزمایشگاهی و محاسباتی(الف: ۸۰ درصد داده‌ها و ب: ۲۰ درصد داده‌ها)

ضریب دبی برای سرریز کلیدپیانویی با پاراپت‌وال شیبدار

پس از بررسی رابطه‌ی ضریب تخلیه‌ی جریان با پارامترهای بی بعد معادله‌ی (۲)، با استفاده از نرم‌افزار Excel و آماریِ Spss، رابطه‌ای برای تعیین ضریب تخلیه‌ی جریان بدست آمد. جهت تعیین بهترین رابطه علاوه بر ضریب تعیین[1]، از توابع خطای ریشه مربعات میانگین نرمال شده[2] و مربعات وزنی خطا[3] که به صورت معادله‌های (۸) و (۹) می‌باشند، استفاده شد.

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum\left(F(x)-f(x)\right)^2}{\sum\left(f(x)-\bar{f}\right)^2}} \qquad (۸)$$

$$WQD = \frac{\sqrt{\left[\sum f(x).F(x).\left[f(x)-F(x)\right]^2\right]}}{\sum\left[f(x).F(x)\right]} \qquad (۹)$$

پس از تجزیه و تحلیل روابط بدست‌آمده به کمک نرم افزار Spss، در نهایت رابطه‌ی (۱۰) به عنوان بهترین رابطه معرفی شد، زیرا علاوه بر ضریب تعیین نزدیک به ۱ ،کمترین میزان خطا را در حدود ۸± درصد نسبت به خط ۴۵ درجه داراست (شکل ۱۱). هر یک از مقادیر ضریب تعیین، ریشه خطای مربعات میانگین نرمال شده و مربعات وزنی خطا برای این رابطه به ترتیب برابر ۰/۹۷۸، ۰/۰۲۱۴ و ۰/۰۱۸ به دست آمد. هرچه مقادیر ریشه خطای مربعات میانگین نرمال شده و مربعات وزنی خطا کمتر باشد، نشان‌دهنده‌ی نزدیکی بیشتر کمیت‌های به دست‌آمده از رابطه‌ی مورد نظر با مقدار متناظر واقعی است. شایان ذکر است که برای به دست آوردن رابطه‌ی (۱۰) از ۸۰ درصد داده‌های آزمایشگاهی استفاده شد و سپس با ۲۰درصد دیگر مورد آزمون قرار گرفت. همچنین این رابطه برای اعداد وبر بزرگ‌تر از یک کاربرد دارد.

$$C_{da} = 2.37\left(\frac{H}{P}\right)^{-0.203} + 0.94\exp\left(\frac{H}{R}\right)^{-1.218} - 0.68\left(\frac{P}{W_u}\right)^{0.512} + 0.21\left[\ln(W_e)\right]^{0.913} - 2.8 \qquad (۱۰)$$

نتایج

از مجموع توضیحات مندرج در بندهای قبل که حاصل مطالعات و نتایج آزمایشگاهی پژوهش حاضر می‌باشد (علاوه بر نتایج ذکر شده‌ی قبلی)، به صورت غیر مستقیم می‌توان به نکات زیر نیز اشاره داشت:

۱- به ازای بار آبی یکسان و ارتفاع یکسان (در مجموع تراز آب یکسان در بالادست سرریز)، سرریز کلیدپیانویی بدون پاراپت‌وال بیشترین توان تخلیه را نسبت به سرریزهای کلیدپیانویی شیب‌دار و اوجی دارا می‌باشد.

۲- برای ایجاد بار آبی یکسان در دبی تقریبیِ برابر، می‌توان از سرریز کلیدپیانویی با پاراپت‌وال شیب‌دار مثبت(البتّه با ارتفاع کمتر) بهره جست.

۳- برای کاربرد این نوع سرریز(کلید پیانویی با پاراپت‌وال شیبدار) در سدهای انحرافی، این امکان وجود دارد که با مسدود کردن قسمتی از تاج سرریز بتوان سرریزی ساخت که با ارتفاع کمتر و در نتیجه مصالح کمتر، توانایی ایجاد همان تراز آبی را دارا باشد و همچنین در موقع سیلابی قدرت تخلیه‌ی جریانش نیز بیشتر از سرریز اوجی باشد.

1-R-Square
2-Normalized Root Mean Square Error, NRMSE
3-Weighted Quadratic Deviation, WQD

منابع

1- Anderson, R. M and B. Tullis. 2011. Influence of Piano Key Weir geometry on discharge. Proceeding of international conference on Labyrinth and Piano Key weirs, Liège B, 75-80. CRC Press, Boca Raton FL.

2- Anderson, R. M and B. Tullis. 2012. Comparison of Piano Key and rectangular labyrinth weir hydraulics. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 138(4): 358-361.

3- Cicero, G. M., Menon, J. M., Luck, M. and T. Pinchard. Experimental study of side and scale effects on hydraulic performances of a Piano Key weir. Proceeding of international conference on Labyrinth and Piano Key weirs, Liège B, 167–172, CRC Press, Boca Raton FL.

4- Kabiri-Samani, A. and A. Javaheri. 2012. Discharge coefficient for free and submerged flow over Piano Key weirs. Journal of Hydraulic Research, IAHR, 50(1): 114-120.

5- Laugier, F., Lochu, A., Gille, C., Leite Ribeiro, M. and J. L. Boillat. 2009. Design and construction of a labyrinth PKW spillway at St-Marc Dam, France. International Journal of Hydropower and Dams, 15(5): 100-107.

6- Leite Ribeiro, M., Bieri, M., Boillat, J. L., Schleiss, A. J., Delorme, F. and F. Laugier. 2009. Hydraulic capacity improvement of existing spillways - Design of Piano Key weirs. Proceedings of 23rd congress of CIGB/ICOLD, Brasilia.

7- Leite Ribeiro, M., Pfister, M., Schleiss, A. J. and J. L. Boillat. 2012a. Hydraulic design of a-type Piano Key weirs. Journal of Hydraulic Research, IAHR, 50(4): 400-408.

8- Leite Ribeiro, M., Pfister, M., Boillat, J. L., Schleiss, A. J. and F. Laugier. 2012b. Piano Key weirs as efficient spillway structure. 24th ICOLD Congress on Large Dams, Kyoto, Japan, Q.94- R.13.

9- Lempérière, F. and A. Ouamane. 2003. The Piano Keys weir: A new cost-effective solution for spillways. International Journal of Hydropower and Dams, 10(5): 144-149.

10- Lempérière, F., Vigny, J. P. and A. Ouamane. 2011. General comments on Labyrinth and Piano Key weirs. The past and present. Proceeding of international conference on Labyrinth and Piano Key weirs, Liège B, 17-24. CRC Press, Boca Raton FL.

11- Machiels, O., Erpicum, S., Dewals, B., Archambeau, P. and M. Pirotton. 2011. Experimental observation of flow characteristics over a Piano Key weir. Journal of Hydraulic Research, IAHR, 49(3): 359-366

12- Machiels, O. 2012. Experimental study of the hydraulic behaviour of Piano Key weirs. Ph.D. Thesis ULgetd, Univerity of Liège (B).

13- Pralong, J., Vermeulen, J., Blancher, B., Laugier, F., Erpicum, S., Machiels, O., Pirotton, M., Boillat, J. L., Leite Ribeiro, M. and A. J. Schleiss. 2011. A naming convention for the Piano Key weirs geometrical parameters. Proceeding of international conference on Labyrinth and Piano Key weirs, Liège B, 271-278. CRC Press, Boca Raton FL.