

Numerical investigation of energy losses in baffled piano key weirs

Ali Iranpour¹, Aslan Egdernezhad^{2*} , Mohammad Heidarnejad³

¹M.Sc. Student, Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

² Assistant professor, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

³ Associate professor, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

Article Info

Article type:

Research

Article

Article history:

Received 5

April 2024

Received in revised form 5
July 2024

Accepted 11
July 2024

Published
online 15

August 2024

Keywords:

Flow3D,
Energy loss,
Stair weirs,
Weber number.

ABSTRACT

Objective: Inadequate flow capacity can compromise the safety of dams, especially during extreme floods. Using weirs is a common way to solve this problem. Numerical models can simulate the flow conditions downstream of piano key weirs with acceptable accuracy. With their help, the downstream energy loss can be investigated. Therefore, conducting more research to study the energy loss in piano key weirs seems necessary.

Methods: This test was done in the hydraulic laboratory of the Khuzestan Water and Electricity Organization. The flume used in this experiment had a rectangular cross-section with a length of 7 meters and a width of 0.6 meters. The walls of the flume were 10 mm thick and were made of glass. In this experiment, 10 flow rates (from 10 to 50 liters per second) were used in free flow mode in the flume. Three piano keyboard weirs with different baffles were used. Baffles were circular, pentagonal, and cubic. The weirs were made of transparent plexiglass with a thickness of 5 mm. The numerical model of Flow3D software was used to check the amount of energy consumption and compare the baffles.

Results: Due to increasing yc/H , the highest energy loss occurred in cubic, circular, and pentagonal baffles, respectively. The energy loss in cubic, circular and pentagonal baffles was 0.65, 0.62 and 0.61, respectively. Therefore, the best result happened in the cubic baffle. By changing the height of the baffles, it was observed that the highest energy loss was measured at a height of 2 cm and the lowest value was measured at a height of 1 cm. This indicated that at high speed, a smaller separation zone was created in the baffles with a height of 2 cm, which caused more energy loss. In general, with the increase of the Weber number, the energy loss also decreased. Weber's number can be ignored in heads larger than 5 cm. In the same conditions, the difference in the shape and height of the baffles has caused a difference in the amount of energy loss. The highest energy loss happened in the Weber number of 200 and the cubic baffle. The results demonstrated that with a 500% increase in the Weber number, the amount of energy loss was decreased by 10%, indicating the effect of low surface tension on energy loss. The obtained results illustrated that using the Ht/p ratio was a suitable method to check the amount of energy loss in these weirs.

Conclusions: Based on the results of this experiment, it is recommended to use cubic baffles for more energy loss in piano key overflows. The best shape and dimensions of the baffle for this work are cubic and $2 * 2$ cm.

*Corresponding author: a_eigder@ymail.com

Cite this article: Iranpour, A., Egdernezhad, A., & Heidarnejad, M. (2024). Numerical investigation of energy losses in baffled piano key weirs, *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*



© The Author(s).

Publisher: Gonbad Kavous University.

DOI: <http://doi.org/10.22034/nawee.2024.451817.1069>



بررسی عددی استهلاك انرژی در سرریزهای کلید پیانویی بافل دار

علی ایرانپور^۱، اصلان اگدرنژاد^{۲*}، محمد حیدر نژاد^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

^۲ استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

^۳ دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله:	هدف: مدل‌های عددی می‌توانند شرایط جریان پایین‌دست سرریزهای کلید پیانویی را با دقت قابل قبول شبیه‌سازی کنند. با کمک آنها، می‌توان افت انرژی پایین‌دست را بررسی کرد. بنابراین، انجام تحقیقات بیشتر برای بررسی اتلاف انرژی در سرریزهای پیانویی ضروری است.
مقاله پژوهشی	مواد و روش‌ها: این پژوهش در آزمایشگاه هیدرولیک سازمان آب و برق خوزستان انجام شد. فلوم مورد استفاده دارای مقطع مستطیل با طول ۷ متر، عرض ۰/۶ متر و با دیواره‌هایی به ضخامت ۱۰ میلی‌متر و از جنس شیشه بود. در این آزمایش، از ۱۰ دبی جریان (از ۱۰ تا ۵۰ لیتر در ثانیه) در شرایط جریان آزاد در فلوم (با سه سرریز کلید پیانویی با بافل‌های مربعی، پنج ضلعی و مکعبی) استفاده شد. سرریزهای مورد استفاده از جنس پلکسی‌گلاس شفاف با ضخامت ۵ میلی‌متر ساخته شده بودند. برای بررسی میزان افت انرژی و مقایسه بافل‌ها نیز از مدل استفاده شد.
تاریخ دریافت:	نتایج: بیشترین تلفات انرژی با افزایش yc/H ، به ترتیب در بافل‌های مکعب، دایره و پنج‌ضلعی رخ داد. تلفات انرژی در بافل‌های مکعب، دایره و پنج‌ضلعی به ترتیب ۶۵، ۶۲ و ۶۱ درصد بود؛ لذا بهترین نتیجه در بافل مکعبی رخ داد. با تغییر ارتفاع بافل‌ها مشاهده شد که بیشترین تلفات انرژی در ارتفاع ۲ سانتیمتر و کمترین مقدار در ارتفاع ۱ سانتیمتر رخ داد. که نشان می‌دهد در سرعت بالا، ناحیه جدایش کمی در مانع‌های با ارتفاع ۲ سانتیمتری به وجود می‌آید که باعث اتلاف انرژی بیشتری می‌شود. بالاترین تلفات انرژی در عدد وبر ۲۰۰ و در بافل‌های مکعب رخ داد. نتایج نشان داد که با افزایش ۵۰۰ درصدی عدد وبر، مقدار تلفات انرژی به ۱۰ درصد کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده تأثیر کم تنش سطحی پائین بر تلفات انرژی است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که استفاده از نسبت Ht/p یک روش مناسب برای بررسی مقدار تلفات انرژی در این سرریزها است.
تاریخ بازنگری:	نتیجه‌گیری: بر اساس نتایج این پژوهش پیشنهاد می‌شود که برای بیشترین تلفات انرژی در سرریزهای کلید پیانویی، بافل‌های مکعب شکل استفاده شود. بهترین شکل و ابعاد بافل برای این کار، مکعب و ۲ در ۲ سانتیمتر است.
تاریخ پذیرش:	Flow3D، کلیدواژه‌ها:
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۵/۲۵	افت انرژی، سرریز پلکانی، عدد وبر.

*نویسنده مسئول : a_eigder@gmail.com

استناد: ایرانپور، علی؛ اگدرنژاد، اصلان؛ و حیدر نژاد، محمد. (۱۴۰۳). بررسی عددی استهلاك انرژی در سرریزهای کلید پیانویی بافل دار. *رویکردهای نوین در*

مهندسی آب و محیط زیست, <http://doi.org/10.22034/nawee.2024.451817.1069>

نویسندگان ©

ناشر: دانشگاه گنبد کاووس.

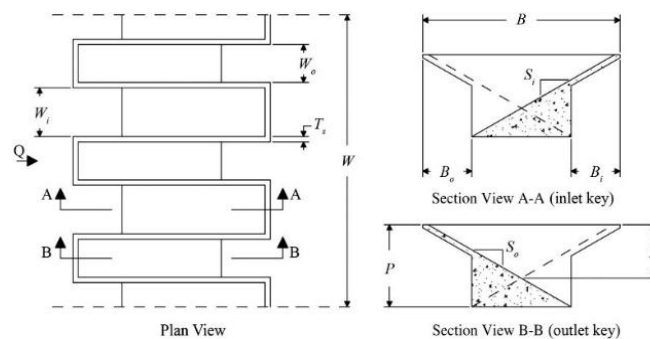


مقدمه

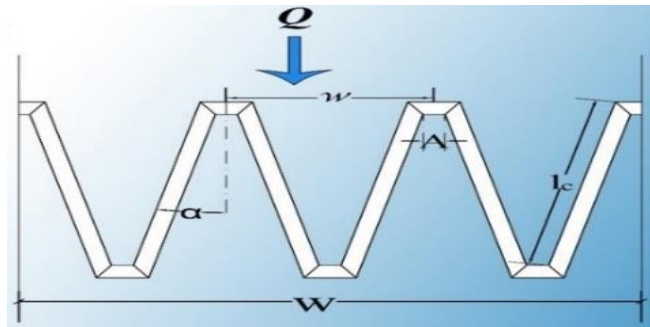
سدها سازه‌های هیدرولیکی مفیدی هستند که در توسعه‌ی تمدن نقش به‌سزایی داشتند. رعایت اصول ایمنی سدها به‌اندازه‌ی ساخت آن‌ها در زندگی انسان مهم و اثرگذار است (سینگ و کومار، ۲۰۲۲). ظرفیت آب‌گذری ناکافی می‌تواند ایمنی سدها را به‌ویژه در هنگام سیلاب‌های شدید به خطر بیندازد (فرهادی و همکاران، ۲۰۲۳). سرریزهای کنگره‌ای به‌عنوان یکی از پرکاربردترین سرریزهای غیرخطی یک‌راه متداول برای حل این مشکل هستند. اما اندازه‌ی بزرگ این سرریزها، استفاده از آنها را محدود کرده است (صفرزاده و نوروزی، ۱۳۹۵). سرریزهای کلیدپیانویی^۱ شکل بهبودیافته‌ای از سرریزهای لابیرنتی هستند که اولین بار توسط لمپریر و اوامان در سال ۲۰۰۳ ارائه شدند. هدف آن‌ها ایجاد نوع جدیدی از سرریزهای لابیرنتی با اندازه‌ی کوچک‌تر و در عین حال مقرون به‌صرفه‌تر و ساده‌تر بود که به‌راحتی هم ساخته شوند (سینگ و کومار، ۲۰۲۲؛ اسلینگر و کروکستون، ۲۰۲۰؛ مرکل و همکاران، ۲۰۱۸). همچنین طبقات شیب‌دار این سرریز در مقایسه با دیواره‌های افقی و عمودی سرریزهای لابیرنتی، موجب بهبود بخشیدن کارایی هیدرولیکی آن می‌شود (فرهادی و همکاران، ۲۰۲۳). سرریزهای کلیدپیانویی دارای ساختاری غیرخطی هستند که الگوهای پیچیده و سه‌بعدی را به جریان مجاور خودالقا می‌کنند (سینگ و کومار، ۲۰۲۲). معادله‌ای که برای تعیین کمیت رابطه‌ی هد و دبی سرریز کلیدپیانویی استفاده می‌شود بر اساس معادله دبی استاندارد سرریز لبه تیز است (صفرزاده و نوروزی، ۱۳۹۵):

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

در آن به ترتیب، Q دبی جریان، C_d ضریب دبی جریان است که بسته به نوع سرریز تغییر می‌کند، L عرض کانال است که لمپیر در سال ۲۰۰۹ آن را برای سرریز کلید پیانویی طول تاج توسعه‌یافته در نظر گرفت و H_d هد کل (مجموع هد سرعت و هد هیدرواستاتیکی) بر روی سرریز است. طبق رابطه ۱ سرریز کلیدپیانویی با وجود داشتن ضریب دبی (C_d) کمتر، حاصل‌ضرب طول و ضریب دبی ($C_d \times L$) بزرگتر از سرریزهای خطی بوده و عملکرد هیدرولیکی در حد سه تا چهار برابر نسبت به سرریزهای خطی بیشتر است (تیواریا و شرام، ۲۰۱۵). این امر باعث شده در سال‌های اخیر این مدل از سرریزها بسیار مورد توجه محققین قرار گیرد و تحقیقات بسیاری بر روی این سازه صورت گیرد (ریبیرو، فایستر و شلیس، ۲۰۱۳).



^۱ piano key weir (PKW)



شکل ۱. پارامترهای هندسی سرریز کلیدپیانویی

سرریز کلیدپیانویی ساختار هندسی بسیار پیچیده‌ای دارد و طراحی کارآمد آن به هر دو جنبه‌ی، عناصر هندسی و هیدرولیکی بستگی دارد. پارامترهای هندسی تأثیرگذار اصلی عبارت‌اند از: عرض کل سیکل سرریز، W طول تاج سرریز، W_i عرض کلید ورودی، W_o عرض کلید خروجی، W_u عرض یک سیکل (جمع W_o و W_i)، طول بالادست تا پایین دست سرریز، B_i طول شیروانی پایین دست، B_o طول شیروانی بالادست، P ارتفاع سرریز، S_o شیب کلید خروجی و S_i شیب کلید ورودی، Q دبی کل، ρ دانسیته‌ی آب، g گرانش، μ ویسکوزیته‌ی آب، δ کشش سطحی، t ضخامت دیواره و H هد است (سینگ و کومار، ۲۰۲۲). سرریزهای کلیدپیانویی نوعی از سرریزهای منحنی‌دار چندمنظوره هستند که در آن‌ها دو نوع جریان غالب وجود دارد؛ در الگوی نخست کلید ورودی، جریان‌های نزدیک شونده را به سمت خود کشیده و مشابه سرریزهای لبه تیز با بدنه شیب‌دار جریان از روی تاج ورودی به صورت ریزشی به سمت پایین دست تخلیه می‌شود و در الگوی دوم جریان عبوری از روی تاج خروجی است که مشابه یک جت به سمت پایین دست بخش شیب‌دار کلید تخلیه می‌شود (لمپریر، ۲۰۱۷). سرریزهای کلیدپیانویی علاوه بر مقرون به صرفه بودن دارای خاصیت اتلاف انرژی هستند (اسلینگر و کروکستون، ۲۰۲۰). اتلاف انرژی یکی از مسائل مهم در سرریزهای کلیدپیانویی و لابیرنتی است؛ زیرا انرژی بیش از حد در پنجه‌ی سرریز می‌تواند باعث آبشستگی شود (فرهادی و همکاران، ۲۰۲۳). سرعت جریان بر روی سرریز کلیدپیانویی دارای پارامترهای هندسی مختلفی است که به طور مستقیم یا معکوس بر ظرفیت آب‌گذری آن تأثیر می‌گذارد. دبی کل در این سرریز تابعی از چندین پارامتر است، همان‌طور که در معادله زیر نشان داده شده است:

$$Q = f(\rho, g, \mu, \delta, t, H, L, P, W, W_i, W_o, B, S_i, S_o) \quad \text{رابطه ۲}$$

مدل‌های عددی ممکن است بتوانند شرایط جریان پیچیده در پایین دست سرریزهای کلیدپیانویی را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی کنند. با اعتبارسنجی آن‌ها می‌توان اتلاف انرژی پایین دست را بررسی کرد. بنابراین انجام تحقیقات بیشتر در زمینه‌ی اندازه‌گیری اتلاف انرژی در سرریزهای کلیدپیانویی ضروری به نظر می‌رسد (سینگ و کومار، ۲۰۲۲). در حال حاضر استفاده از بافل‌ها با اندازه‌های مختلف، برای اتلاف انرژی بیشتر و صرف هزینه‌ی کمتر، در این سرریزها در حال بررسی هستند (هو تا خان، و همکاران، ۲۰۱۱؛ سیلورستری و همکاران، ۲۰۱۳). آزمایش‌ها و یافته‌های اداره‌ی احیای ایالات متحده‌ی آمریکا^۲ نشان داده است که استفاده از بافل‌ها که باعث جدا شدن جت سرریز و به دنبال آن آشفته‌گی جریان می‌شوند، می‌تواند به طور مؤثر انرژی جنبشی را از بین ببرد (فرهادی و همکاران، ۲۰۲۳). توانایی پیش‌بینی دقیق انرژی باقی‌مانده در پایین دست در طراحی سازه‌های مستهلک‌کننده‌ی انرژی

^۲ USBR

مهم است. اندازه‌گیری انرژی باقی‌مانده به طراح این امکان را می‌دهد تا با دقت بیشتری انرژی را که باید در پایین دست سرریزهای کلیدپیانویی تلف شود، محاسبه کند. برای گسترش این رویکرد معادلات پیش‌بینی اتلاف انرژی در سرریزهای کلیدپیانویی ارائه شده‌اند که تابع H/P هستند (اسلینگر و کروکستون، ۲۰۲۰). بنابر مطالب ذکر شده و اهمیت استهلاک انرژی در سرریزهای کلیدپیانویی طی تحقیقی اثر استفاده از بافل با شکل‌ها و ابعاد مختلف برای استهلاک انرژی مورد مطالعه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در آزمایشگاه هیدرولیک سازمان آب و برق خوزستان انجام شد. فلوم مورد استفاده دارای سطح مقطع مستطیلی با طول ۷ متر و عرض ۰/۶ متر بود. در ابتدا و انتهای فلوم مخازنی به ترتیب برای هدایت جریان به داخل و خارج از آن تعبیه شده بود. دیوارهای فلوم شفاف و از جنس شیشه با ضخامت ۱۰ میلی‌متر انتخاب شد تا مشاهده‌ی سطح آب و پدیده‌های هیدرولیکی راحت باشد. کف فلوم از جنس فلز صیقل داده شده انتخاب شد. پس از استقرار مدل، آب از طریق مخزن تأمین و به وسیله‌ی پمپ به فلوم منتقل شد. ارتفاع سطح آب و دبی مرتب اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری ارتفاع سطح آب در بالادست سرریز، قبل از افت سطح آب از عمق سنجی به دقت یک میلی‌متر استفاده شد. دبی جریان نیز توسط سرریز مثلثی کالیبره و با استفاده از مانومتر اندازه‌گیری شد. برای آرام نگه‌داشتن جریان در بالادست سرریز و کاهش نوسانات سطح آب، در قسمت ورودی فلوم از یک صفحه با جنس PVC استفاده شد. در این آزمایش تعداد ۱۰ دبی (از ۱۰ تا ۵۰ لیتر بر ثانیه)، در حالت جریان آزاد در فلوم استفاده شد. تمام آزمایش‌ها بدون کنترل پایین‌دست انجام شد. برای انجام آزمایش از سه سرریز کلیدپیانویی با بافل‌های متفاوت استفاده شد. بافل‌ها به شکل دایره، پنج‌ضلعی و مکعبی بودند. سرریزها از جنس پلکسی‌گلاس شفاف با ضخامت ۵ میلی‌متر بودند. هنگام نصب سرریزها با استفاده از تراز بنایی، از تراز بودن آن‌ها اطمینان حاصل شد. برای عمود کردن دیوارهای سرریز روی کف فلوم هم از گونیا استفاده شد. عمود بودن دیوارها بعد از قرار گرفتن آب پشت سرریز نیز کنترل شد. پس از نصب سرریز و آب‌بند نمودن آن و برقراری جریان در فلوم، دبی جریان به وسیله‌ی شیر پروانه‌ای تنظیم شد. در فاصله‌ی ۴۰ سانتی‌متری که جریان به صورت آرام درمی‌آمد، هم در بالادست و هم در پایین‌دست ارتفاع آب اندازه‌گیری شد. برای بررسی میزان استهلاک انرژی در سرریز کلیدپیانویی با سه شکل مختلف بافل دایره‌ای، پنج‌ضلعی و مکعبی در ابعاد مختلف در کلید خروجی سرریز کلیدپیانویی، از مدل عددی نرم‌افزار Flow3D استفاده گردید و نتایج این مدل‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. برای بررسی مقدار انرژی جریان در بالادست سرریز از رابطه ۳ استفاده شد (قنواتی، سجادی و احدیان، ۱۳۹۸):

$$E_0 = y_0 + \frac{V_0^2}{2g} \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن E_0 انرژی جریان در بالادست، y_0 عمق بالادست سرریز، V_0 سرعت متوسط جریان و g شتاب ثقل است. سرعت متوسط در این مقطع با استفاده از رابطه‌ی پیوستگی محاسبه می‌گردد. انرژی پای سرریز هم از رابطه‌ی ۴ به دست آمده و از رابطه‌ی استهلاک انرژی (ΔE_T) میزان افت انرژی نسبی یا استهلاک انرژی جریان محاسبه گردید (رابطه ۵):

$$E_1 = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} \quad \text{رابطه ۴}$$

$$\Delta E_r = \frac{\Delta E}{E_0} = \frac{E_0 - E_1}{E_1} \quad \text{رابطه ۵}$$

در این روابط، E_1 انرژی جریان در پایین دست، y_1 عمق پایین دست سرریز، V_1 سرعت جریان در این مقطع، g شتاب ثقل و (ΔE_r) میزان افت انرژی نسبی یا استهلاک انرژی جریان است.

آنالیز ابعادی

پارامترهای مؤثر بر اتلاف انرژی در سرریز کلیدپیانویی را می توان به صورت رابطه ۶ ارائه کرد (فرهادی و همکاران، ۲۰۲۳):

$$\rho \cdot \sigma \cdot H \cdot L_0 \cdot P \cdot L \cdot \mu \cdot Q \cdot F = f(W_i, W_0, W_u, W, B, B_i, B_o, H_r, H_s, \gamma_c, g) \quad \text{رابطه ۶}$$

با انجام عملیاتی مثل ضرب و معکوس کردن پارامترهای بدون بعد و حذف پارامترهای ثابت در این تحقیق و با استفاده از نظریه Π باکینگهام پارامترهای بدون بعد دست می آیند:

$$f = \left(\frac{H_t}{P} \cdot \frac{H_s}{P} \cdot \frac{H_s}{D} \cdot \frac{\gamma_c}{h} \cdot \frac{\Delta E}{E_0} \cdot We \cdot Re \cdot Fr \right) = 0 \quad \text{رابطه ۷}$$

با توجه به ثابت بودن اعداد هندسی سرریز، پارامترهای $W_i, W_0, W_u, W, B, B_i, B_o$ حذف می شوند. همچنین از عدد رینولدز (Re) به علت آشفتگی بودن جریان ($Re > 2000$) می توان صرف نظر کرد. بنابراین می توان گفت افت انرژی و ضریب دبی تابعی از روابط ۸ و ۹ است.

$$\Delta E_r = \frac{\Delta E}{E_0} = f \left(\frac{H_t}{P} \cdot \frac{H_s}{P} \cdot \frac{H_s}{D} \cdot \frac{\gamma_c}{h} \cdot We \cdot Fr \right) = 0 \quad \text{رابطه ۸}$$

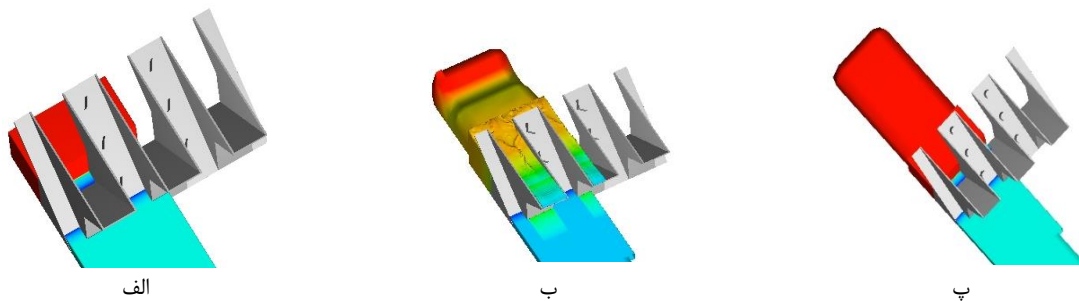
$$C_d = f \left(\frac{H_t}{P} \right) \quad \text{رابطه ۹}$$

مقادیر در نظر گرفته شده در مدل عددی برای این آزمایش در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. پارامترهای تأثیرگذار در افت انرژی سرریز کلیدپیانویی

ردیف	علامت پارامتر	نام پارامتر	مقادیر در نظر گرفته شده در مدل عددی
۱	W_i	عرض کلید ورودی	۱۰ سانتی متر
۲	W_o	عرض کلید خروجی	۱۰ سانتی متر
۳	W_u	عرض یک سیکل	
۴	W	عرض فلوم مدل	۳۰ سانتی متر
۵	B	طول تاج جانبی سرریز	۴۰ سانتی متر
۶	B_i	طول شیروانی پایین دست	
۷	H_r	عمق آب پای سرریز	
۸	H_s	ارتفاع آب روی نوک سرریز	

$y_c = (q^2/g)^{1/3}$	عمق بحرانی	Y_c	۹
	ارتفاع آب روی سرریز	H	۱۰
برای آب با دما ۲۰ درجه سلسیوس	کشش سطحی	Σ	۱۱
$988/2 \text{ Kg/m}^3$	جرم واحد حجم آب	P	۱۲
	لزوجت دینامیکی	μ	۱۳
۲۰ سانتی‌متر	ارتفاع سرریز	P	۱۴
۴۰ سانتی‌متر	طول تاج سرریز	L	۱۵
	طول کلید خروجی	L_o	۱۶
$9/8\text{m/S}^2$	شتاب ثقل	G	۱۷
	انرژی جریان	E	۱۹
$q = \frac{Q}{W}$	دبی ویژه	Q	۲۰
۲ سیکل	تعداد سیکل	N	۲۱
مجموع هد سرعت و هد هیدرواستاتیکی	هد کل	H_t	۲۲
۳ متر	طول مؤثر تاج سرریز	L_w	۲۳
سه ارتفاع	ارتفاع بافل	H_b	۲۴
دایره، پنج‌ضلعی، مکعبی	شکل موانع	S_h	۲۵



شکل ۲. سرریز کلیدپیانویی با الف - بافل پنج ضلعی، ب - بافل مثلثی، پ - بافل دایره‌ای

نرم‌افزار Flow3D

برای شبیه‌سازی عددی از نرم‌افزار Flow3D استفاده شد. نرم‌افزار Flow3D برنامه‌ای کامل و مناسب برای مطالعه‌ی پویایی جریان در سیالات است که در مدل‌سازی انواع مختلف سیال‌ها و پدیده‌های انتقال حرارت از آن استفاده می‌شود. معادله‌های حاکم در این نرم‌افزار معادله‌های ناویر استوکس و معادله‌ی بقای جرم است. این نرم‌افزار برای تحلیل سه‌بعدی جریان در حالت تراکم‌ناپذیر معادله‌های ناویر استوکس رینولدزی را با استفاده از روش حجم محدود روی یک میدان شبکه‌بندی‌شده حل می‌کند (قادری و عباسی، ۲۰۱۹). نرم‌افزار Flow3D میدان جریان سیال را به صورت یک حجم کنترل جداگانه در نظر می‌گیرد. با برقراری معادلات ریاضی حاکم بر این حجم کنترل، قسمت‌های مختلف آن را بررسی می‌کند (روشنگر و اخگر، ۲۰۲۲). در این نرم‌افزار الگوریتم جزء سطح/حجم بیانگر مانع FAVOR برای تعریف هندسه در روش حجم محدود به کار رفته است. ترم‌های سرعت و فشار به صورت

ضمنی و با استفاده از مقادیر فشار و سرعت زمان‌های سابق در معادلات پیوستگی و مومنتم کوپل می‌شوند. برای تعریف هندسه‌ی مدل و جریان سیال ابتدا با استفاده از نرم‌افزار AoutoCad مدلی سه‌بعدی منطبق بر مشخصات مدل تهیه شد بنابراین فایلی به نام STL تهیه شد. شبکه‌بندی در دستگاه مختصات کارتزین انجام شد. برای شبکه‌بندی غیریکنواخت روی تاج سرریز و در پایین دست سرریز از مش ریزتر استفاده شد. برای شبیه‌سازی جریان سطح آزاد از روش جز حجم سیال VOF برای تعیین سطح مشترک دوسیال آب‌وهوا بهره گرفته شد. سپس در نرم‌افزار Flow3D با به‌کارگیری VOF و FAVOR و همچنین تعیین شرایط مرزی پس از شبکه‌بندی‌های لازم انجام شد. ابعاد بهینه شبکه بر مبنای دقت لازم و زمان اختصاص یافته برای انجام محاسبات، انتخاب شده و شبکه میدان به‌گونه‌ای تنظیم شد که خطوط شبکه برهم عمود باشند. در این تحقیق برای انجام محاسبات، در مجموع به‌طور متوسط ۲۰۶۵۰۱۲ سلول برای سه مش بلاک هر کدام به ابعاد $2/5 \times 2/5 \times 2/5$ (برحسب میلی‌متر) برای شبکه‌بندی مدل‌ها انتخاب شد (شکل ۲). تعداد شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی صورت گرفته برای این تحقیق ۹۰ شبیه‌سازی انجام گرفت. بعد از ساخت هندسه سرریزها و انتقال به نرم‌افزار Flow3D اقدام به مش‌بندی (مش‌بندی هر قطعه ۵ میلی‌متر است) و تعیین شرایط مرزی و همین‌طور شرایط ورودی شد. در جدول ۲ مجموع شبیه‌سازی‌های صورت گرفته نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل ۲ مشخص است بافل‌ها به‌صورت خطی و با فاصله ۵ سانتی‌متری از یکدیگر نصب شده است.

جدول ۲. شبیه‌سازی‌های صورت گرفته شده

ردیف	متغیر	نام متغیر	تعداد مورد بررسی	مشخصات موانع
۱	S_{ii}	شکل موانع	۳ شکل	دایره - پنج‌ضلعی - مکعبی
۲	Q	دبی جریان	۱۰ دبی جریان	دبی جریان
۳	D	قطر استوانه	۳ قطر	۱، ۲ و ۳ سانتی‌متر مربع

نتایج و بحث

برای بررسی تأثیر شکل و ابعاد بافل بر روی افت انرژی در سرریز PKW مدل‌های عددی طراحی شد که این مدل عددی شامل، مدل مکعبی بافل (۳ ابعاد)، مدل دایره‌ای بافل (۳ ابعاد) و مدل پنج ضلعی بافل (۳ ابعاد)، مورد آزمایش قرار گرفت. این آزمایشها در ۱۰ دبی جریان از ۱۰ الی ۵۰ لیتر بر ثانیه و در مجموع ۹ مدل و هر مدل در ۱۰ دبی جریان شبیه‌سازی صورت گرفت. برای کالیبره کردن از ۸۰ درصد داده‌ها استفاده شد و ۲۰ درصد داده‌ها نیز برای اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفت. برای اندازه‌گیری افت انرژی نسبی $(\frac{\Delta E}{E_0})$ و تأثیر دو عدد بدون بعد y_c/H و عدد وبر (We) (در بازه‌ی ۴۰ الی ۱۶۰۰) بر میزان افت انرژی نسبی مورد بررسی قرار گرفت، که عدد y_c/H نشان‌دهنده‌ی میزان تأثیر ارتفاع آب بر روی سرریز است و عدد وبر نیز نشان‌دهنده‌ی کشش سطحی (به‌علت تماس مستقیم سرریز با جریان عبوری، کشش سطحی بر میزان افت انرژی تأثیرگذار است) است که در جدول ۳ نمونه نتایج نشان داده شده است.

جدول ۳. نتایج سرریز P.K.W با بافل دایره‌ای

H(m)	We	Cd	Ht/P	Delta E/E	Yc/h
۰/۲۲۲	۱۶۹/۷۰۱	۰/۳۴۴	۰/۱۱۰	۰/۵۱۱	۱/۳۸۱
۰/۲۲۷	۱۹۹/۸۳۹	۰/۳۰۵	۰/۱۳۵	۰/۵۲۹	۱/۲۷۵
۰/۲۳۱	۲۷۳/۳۷۰	۰/۳۱۳	۰/۱۵۴	۰/۵۴۱	۱/۲۹۵
۰/۲۳۶	۴۱۰/۶۲۹	۰/۳۲۴	۰/۱۸۲	۰/۵۴۹	۱/۳۲۶
۰/۲۴۰	۴۵۲/۲۵۶	۰/۳۰۹	۰/۲۰۱	۰/۵۴۴	۱/۲۸۶
۰/۲۴۲	۵۶۲/۰۰۴	۰/۳۳۲	۰/۲۰۸	۰/۵۳۴	۱/۳۴۷
۰/۲۵۷	۵۹۳/۷۱۴	۰/۲۵۰	۰/۲۸۴	۰/۵۵۶	۱/۱۱۶
۰/۲۶۸	۶۷۵/۰۱۰	۰/۲۲۳	۰/۳۴۰	۰/۵۶۵	۱/۰۳۳
۰/۲۸۱	۷۴۰/۱۴۷	۰/۱۹۶	۰/۴۰۵	۰/۵۶۷	۰/۹۴۸
۰/۲۹۴	۹۹۴/۸۴۸	۰/۱۹۵	۰/۴۷۱	۰/۵۷۳	۰/۶۴۶

در جدول ۴ نتایج کلی اندازه‌گیری عمق‌های بحرانی و اتلاف انرژی را به صورت میانگین می‌توان مشاهده کرد.

جدول ۴. بیشترین افت انرژی در هر مدل در ۱۰ دبی جریان

مدل	بیشترین افت انرژی	yc/h
دایره ۱	۰/۵۵۰	۱/۲۵
دایره ۲	۰/۶۲۰	۱/۵۶
دایره ۳	۰/۵۴۹	۱/۳۲
پنج ضلعی ۱	۰/۵۹۷	۱/۰۵
پنج ضلعی ۲	۰/۶۱۰	۱/۴۰
پنج ضلعی ۳	۰/۵۹۰	۱/۰۸
مکعبی ۱	۰/۶۵۰	۱/۲۹
مکعبی ۲	۰/۶۴۰	۱/۳۲
مکعبی ۳	۰/۶۷۰	۱/۳۱

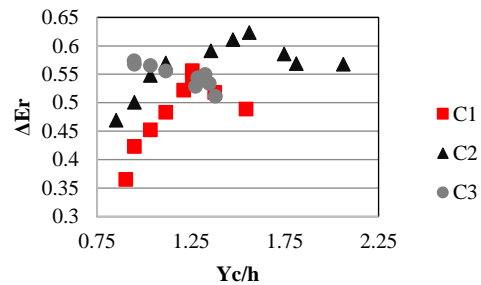
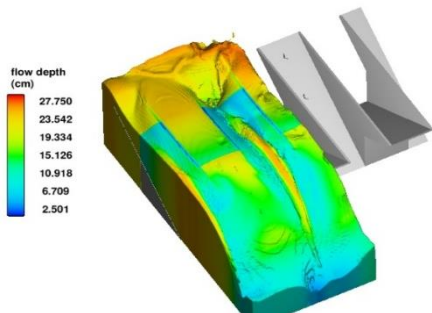
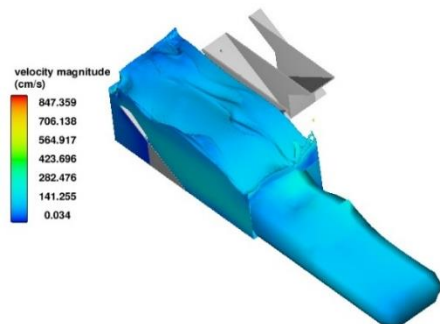
بنابر اطلاعات ارائه شده در جدول ۳ می‌توان گفت با افزایش ارتفاع بافل‌ها از یک سانتی‌متر به ۲ سانتی‌متر در هر سه بافل مورد مطالعه افت انرژی افزایش یافت. به طوری که افت انرژی در بافل‌های دایره‌ای، پنج ضلعی و مکعبی به ترتیب ۱۲/۷، ۸/۷ و ۱۰/۱ درصد افزایش یافته است. این نتیجه با نتایج فرهادی و همکاران (۲۰۱۳) مطابقت دارد. آن‌ها در مطالعات خود روی تأثیر بافل‌ها در افزایش اتلاف انرژی در سرریزهای کلیدپیانویی گزارش کردند که افزایش ارتفاع بافل‌ها و افزایش حجم آن‌ها موجب افزایش میزان اتلاف انرژی می‌شود. آن‌ها این میزان افزایش اتلاف انرژی را بین ۱/۲ تا ۱۲ درصد برای دبی‌های مختلف ۴ تا ۱۷ لیتر بر ثانیه گزارش کردند. جدول ۵ برای خلاصه کردن و مطالعه راحت‌تر آزمایشها به صورت کدگذاری نشان داده شده است.

جدول ۵. کدگذاری شبیه‌سازی‌های صورت گرفته

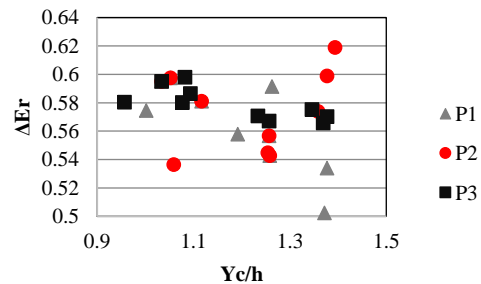
کد آزمایش	ابعاد مدل (ارتفاع) cm	مدل بافل
P3	۳	بافل پنج ضلعی بزرگ
P2	۲	بافل پنج ضلعی متوسط
P1	۱	بافل پنج ضلعی کوچک
T3	۳	بافل مکعبی بزرگ
T2	۲	بافل مکعبی متوسط
T1	۱	بافل مکعبی کوچک
C3	۳	بافل دایره بزرگ
C2	۲	بافل دایره متوسط
C1	۱	بافل دایره کوچک

تأثیر y_c/h بر میزان افت انرژی نسبی $(\frac{\Delta E}{E_0})$

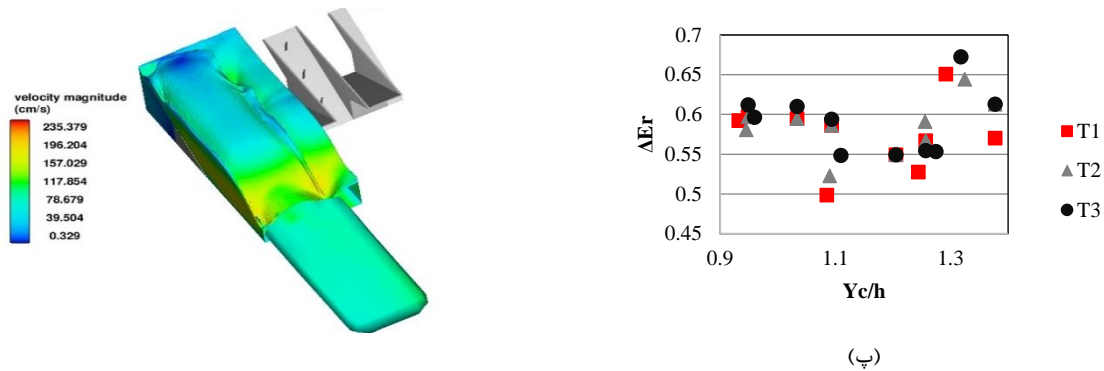
در این قسمت به بررسی تأثیر y_c/h بر افت انرژی نسبی (استهلاک انرژی) پرداخته می‌شود. در محور افقی مقدار y_c/h که y_c نشانگر عمق بحرانی و h ارتفاع آب بالادست است و در محور عمودی مقدار افت انرژی نسبی $(\frac{\Delta E}{E_0})$ نشان داده می‌شود. از آنجایی که در این تحقیق از سرریز کلیدپیانویی (غیرخطی) استفاده شده است، باعث می‌شود طول تاج سرریز (L) بیشتر از عرض سرریز (W) شود، که این امر باعث کاهش عمق آب بر روی تاج سرریز (h) گردد. اما مقدار y_c از رابطه $(q^2/g)^{1/3}$ به دست می‌آید (مرکل و همکاران، ۲۰۱۸) به این دو دلیل مقدار y_c/h در نمودارها روند افزایش دارد. در ادامه نتایج در شکل ۳ نشان داده شده است.



(الف)



(ب)



شکل ۳. بررسی تأثیر ابعاد بافل بر میزان افت انرژی نسبی: الف) بافل دایره‌ای. ب) بافل پنج ضلعی. پ) بافل مکعبی

با توجه به نمودارهای ارائه شده می‌توان گفت با افزایش اختلاف ارتفاع اتلاف انرژی هم افزایش یافته است. این نتیجه با نتایج مرکل و همکاران (۲۰۱۸) هم راستا است. آنها در مطالعات خود روی سرریزهای کلیدپیانویی گزارش کردند که در اختلاف ارتفاع‌های کوچک اتلاف انرژی کمتر روی می‌دهد و با افزایش اختلاف هد این تلفات انرژی هم افزایش می‌یابد (مرکل و همکاران، ۲۰۱۸). در شکل ۳، بیشترین مقدار افت با افزایش y_c/H ، به ترتیب بافل مکعبی، دایره‌ای و پنج ضلعی است. بیشترین مقدار افت مربوط به بافل مکعبی به مقدار $\Delta E_r = 0.65$ و بعد از آن بافل دایره‌ای با افت $\Delta E_r = 0.62$ و بافل پنج ضلعی با افت $\Delta E_r = 0.61$ است. پس می‌توان نتیجه گرفت که بافل مکعبی باعث افزایش ۷ درصدی افت انرژی به نسبت بافل پنج ضلعی و افت انرژی ۵ درصدی به نسبت بافل دایره‌ای می‌شود. با توجه به نمودارها می‌توان به این نتیجه رسید که در بازه $1/6$ الی $1/3$ از y_c/H بیشترین میزان افت جریان در بافل‌های با ابعاد ۲ سانتی‌متری رخ می‌دهد اما در مقادیر کمتر y_c/H ، بیشترین افت در ارتفاع ۱ سانتی‌متری رخ می‌دهد که این نشان‌دهنده آن است که در سرعت‌های بالا به علت تشکیل منطقه جداسدگی کوچک‌تر در بافل‌های با ارتفاع ۲ سانتی‌متری میزان افت هم بیشتر می‌شود. نکته‌ای که در این نمودارها مشخص است هر چه دبی بیشتر می‌شود تلاطم هم افزایش می‌یابد که این سبب می‌شود در اعداد y_c/H بیشتر از $1/2$ اعداد دارای الگوی خاصی نباشد و به صورت پراکنده به دست آید.

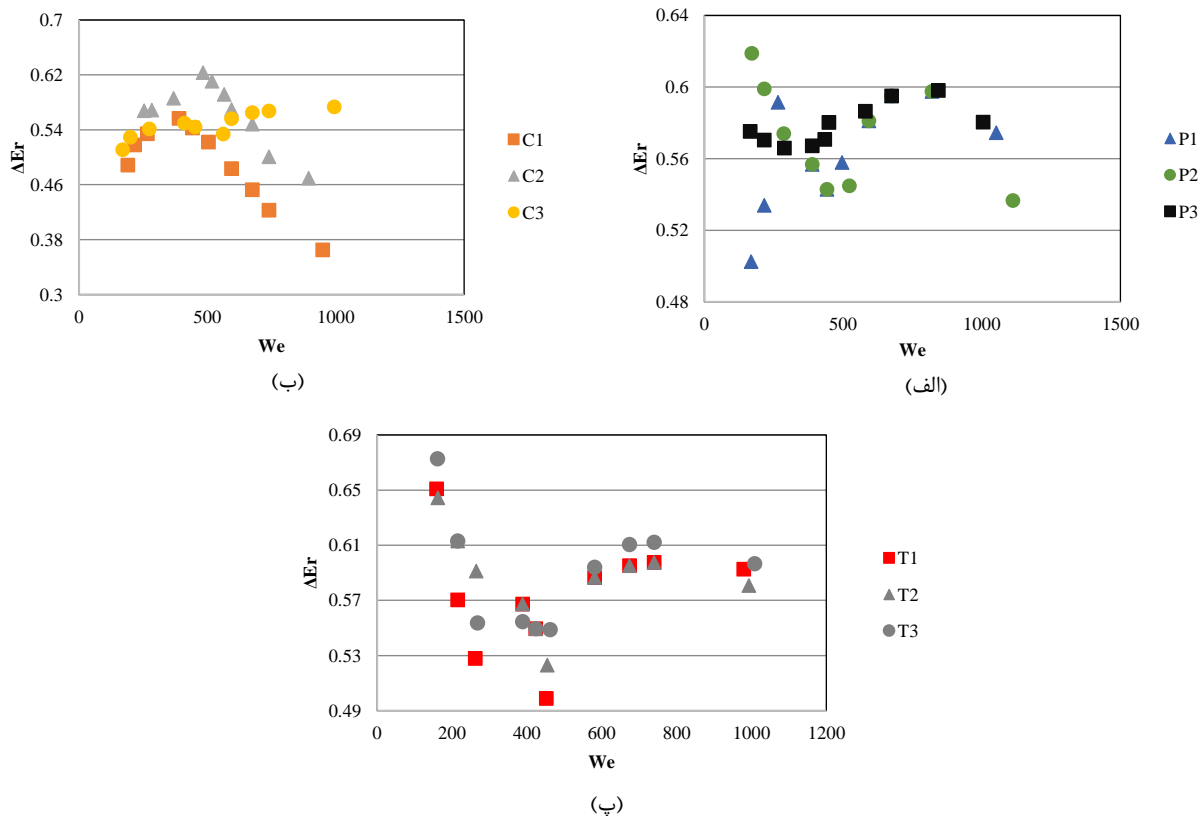
تأثیر عدد وبر (We) بر میزان افت انرژی نسبی ($\frac{\Delta E}{E_0}$)

طبق مطالعات ماکیلز و همکاران (۲۰۱۳)، برای مقادیر وبر بالای ۵۰، مقایسه دبی‌های اندازه‌گیری شده در مدل مقیاس و نمونه واقعی نشان داد که در این محدوده عدد وبر تأثیر خود را از دست داده و از آنجایی که جت عبوری از روی سرریز در تماس مستقیم با تاج سرریز (تاج جانبی و تاج کلید ورودی و خروجی سرریز) و کلید خروجی باقی می‌ماند، کشش سطحی بر جریان تأثیرگذار خواهد بود؛ به همین دلیل از عدد وبر (We) که به نحوی بیانگر کشش سطحی در مهندسی هیدرولیک است، استفاده شده است. برای محاسبه عدد وبر از رابطه ۱۰ استفاده می‌شود.

$$We = \frac{\rho V^2 H_s}{\sigma} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

که در آن، ρ چگالی آب، σ کشش سطحی، V سرعت جریان و H_s ارتفاع آب بر روی تاج سرریز است. اگر ارتفاع آب بر روی تاج سرریز بیشتر از ۵ سانتی‌متر باشد، می‌توان از تأثیرات عدد وبر صرف‌نظر کرد. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌کنید، به‌طور کلی با افزایش عدد وبر میزان افت انرژی هم کاهش می‌یابد. این نتیجه با نتایج قنواتی و همکاران (۲۰۱۹) هم‌خوانی دارد. آنها با

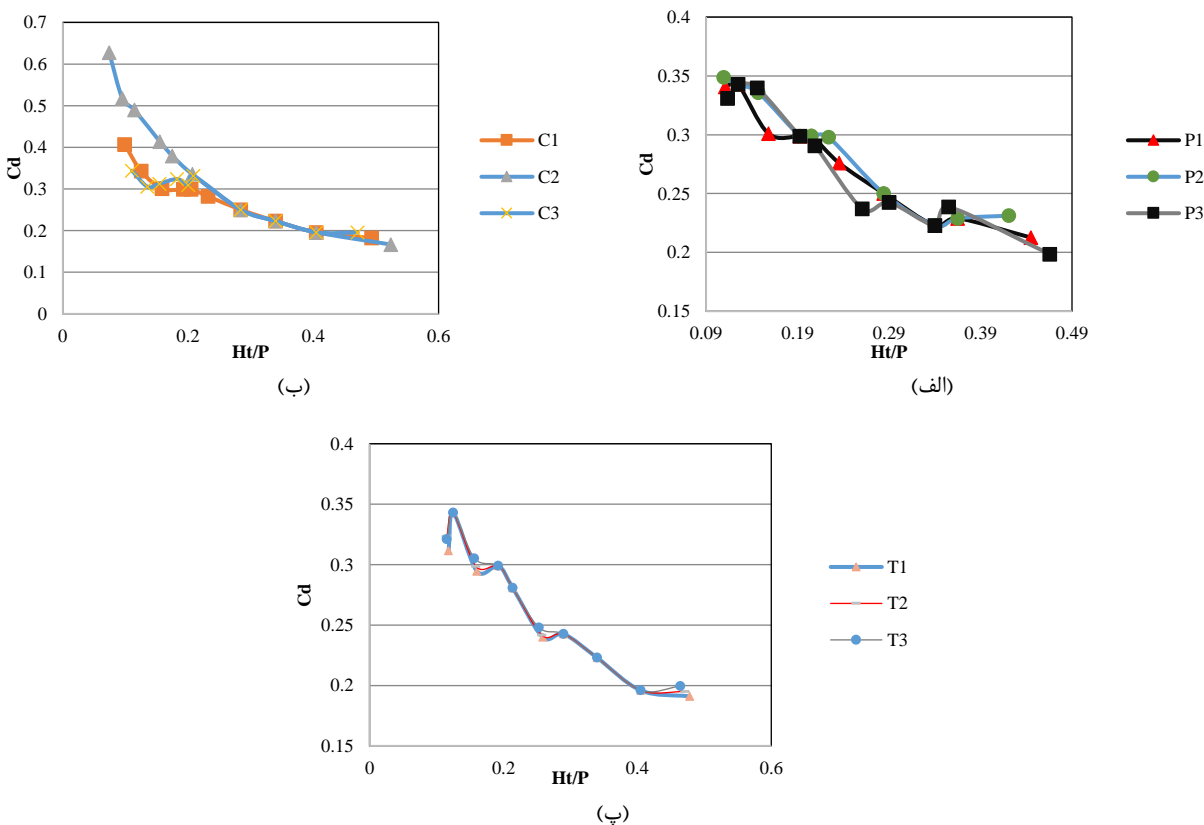
مطالعه و بررسی آرایش متفاوت بافل‌ها روی سرریزهای کلیدپیانویی گزارش کردند که با افزایش عدد وبر مقدار استهلاک نسبی انرژی کاهش می‌یابد. با افزایش دبی، عمق جریان و در نتیجه عدد وبر افزایش می‌یابد و اثر اصطکاک مرزها بر جریان کم می‌شود. با توجه به شکل ۴ می‌توان گفت که در شرایط یکسان تفاوت در شکل و ارتفاع بافل‌ها موجب تفاوت در میزان استهلاک انرژی شده است. این نتیجه نیز در گزارشهای پیشین توسط قنواتی و همکاران (۲۰۱۹) مشاهده می‌شود. در طول جریان هنگامی که بافل و مانعی در مسیر جریان وجود داشته باشد، نیروهای مقاوم اصطکاکی و فشاری هر دو بر بافل وارد می‌شوند. حال اگر ارتفاع بافل افزایش پیدا کند، به علت افزایش سطح تماس مانع با جریان آب هم زمان هر دو نیروی اصطکاکی و فشاری نیز افزایش می‌یابد. بنابراین افت انرژی نسبی نیز افزایش می‌یابد. بیشترین افت انرژی در عدد وبر ۲۰۰ صورت گرفت که مربوط به بافل مکعبی شکل است. در این نمودارها می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ۵۰۰ درصدی عدد وبر تا ۱۰ درصد میزان افت انرژی کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده تأثیرگذاری کم کشش سطحی بر افت انرژی است. همچنین باید گفت که بیشترین افت انرژی مربوط به دبی‌های کم است، که علت این امر سرعت پایین و غیرمستغرق شدن کلیدهای خروجی در سرریز است که سبب افزایش تأثیرگذاری بافل‌ها در دبی‌های کم می‌شود.



شکل ۴. بررسی عدد وبر بر میزان افت انرژی نسبی، (الف) بافل پنج ضلعی، (ب) بافل دایره‌ای، (پ) بافل مکعبی

بررسی ضریب دبی ویژه

در این قسمت به بررسی تأثیر بافل بر میزان ضریب دبی ویژه که نشان‌دهنده راندمان سرریز است پرداخته می‌شود. برای محاسبه ظرفیت تخلیه سرریزها از معادله ۱ استفاده شد. با توجه به شکل ۵ می‌توان گفت با افزایش نسبت Ht/p مقدار C_d کاهش یافته است. این نتیجه با نتایج روشنگر و همکاران (۲۰۱۷) مطابقت دارد. آن‌ها با رسم نمودارهایی مشابه برای سرریزهای کلیدپیانویی قوسی، گزارش کردند که با افزایش نسبت Ht/p مقدار C_d کاهش می‌یابد و با نزدیک شدن مقدار Ht/p به عدد یک، نمودار حالتی یکنواخت پیدا می‌کند. کمایی عباسی، خدشناس و حیدرنژاد (۲۰۱۸) نیز نتیجه مشابهی برای سرریزهای کلیدپیانویی دو سیکل گزارش کردند. یارمحمدی و احدیان (۲۰۱۸) نیز گزارش کردند که در سرریزهای کلیدپیانویی برای نسبت Ht/p در محدوده کوچکتر از 0.25 ، مقدار C_d افزایش یافته و پس از این محدوده کاهش می‌یابد این روند با افزایش بیشتر Ht/p ، کاهش بیشتری پیدا می‌کند. همچنین با توجه به شکل ۵ می‌توان گفت با افزایش دبی میزان تلفات انرژی و اختلاف هد کاهش می‌یابد. این نتیجه با نتایج فرهادی و همکاران (۲۰۲۳) هم راستاست. آن‌ها نیز با مطالعه این نوع سرریزها گزارش کردند که میزان تلفات انرژی در دبی‌های کمتر، قابل توجه است اما با افزایش دبی، تلفات انرژی کاهش می‌یابد. در شکل ۵ (الف) بیشترین راندمان در تصویر الف مربوط به حالت بافل ۲ سانتی‌متری با مقدار $C_d = 0.34$ ، در شکل ۵ (ب) حالت بافل ۲ سانتی‌متری با مقدار $C_d = 0.62$ است. در شکل ۵ (ج) مربوط به حالت بافل ۳ سانتی‌متری با مقدار $C_d = 0.34$ است. بیشترین مقدار ضریب دبی بافل دایره‌ای با ابعاد ۲ سانتی‌متر با مقدار 0.65 و کمترین مقدار برای مکعبی با ارتفاع ۲ سانتی‌متری در هر سه مدل سرریز به مقدار 0.34 است. همچنین می‌توان نتیجه گرفت مانع دایره‌ای شکل بالاترین راندمان و بافل مکعبی کمترین راندمان را از خود نشان داده‌اند.



شکل ۵. تغییرات C_d نسبت به Ht/p در: (الف) بافل پنج ضلعی. (ب) بافل دایره‌ای. (پ) بافل مکعبی

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که استفاده از نسبت Ht/p روش مناسبی برای بررسی میزان اتلاف انرژی در این سرریزها است. محققان دیگر نیز از نسبت Ht/p به عنوان یک مقیاس مفید برای بررسی تلفات انرژی نام بردند؛ چنانکه هاین و همکاران (۲۰۰۶) و سینگ و کومار (۲۰۲۲) رابطه بین Ht/p با L/W را معیار مناسبی برای ارزیابی اتلاف انرژی در سرریزهای کلیدپیانویی دانستند. مرکل و همکاران (۲۰۱۸) نیز از نسبت بین Ht/p و ابعاد مدل برای مطالعه اتلاف انرژی در سرریزهای کلیدپیانویی بهره گرفتند. اسلینگر و کروکستون (۲۰۲۰) نیز با بررسی Ht/p با Wi/Wo و ارتباط آن با ایجاد جریان بحرانی و پرش هیدرولیکی اتلاف انرژی را در سرریزهای کلیدپیانویی بررسی کردند. فرهادی و همکاران (۲۰۲۳) نیز با بررسی رابطه بین Ht/p و $\frac{\Delta E}{E_0}$ به مطالعه اثر بافل‌ها روی اتلاف انرژی در سرریزهای کلیدپیانویی پرداختند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار Flow3D به شبیه‌سازی عددی سرریزهای کلیدپیانویی پرداخته شد، هدف از این کار افزایش استهلاک انرژی در سرریز کلیدپیانوی است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که علاوه بر افزایش ضریب گذردهی جریان، می‌توان اتلاف انرژی را افزایش داد و با کاستن از ابعاد سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی در پایین دست سدها، مانند حوضچه‌های آرامش و...، به اقتصاد طرح کمک شایانی کرد. در مجموع ۹ مدل شبیه‌سازی شد که نتایج زیر به دست آمد. بیشترین مقدار افت با افزایش y_c/H ، به ترتیب بافل مکعبی، دایره‌ای و پنج ضلعی است. بیشترین مقدار افت مربوط به بافل مکعبی به مقدار $\Delta E_r = 0/65$ و بعد از آن بافل دایره‌ای با افت $\Delta E_r = 0/62$ و بافل پنج ضلعی با افت $\Delta E_r = 0/61$ است. بافل مکعبی باعث افزایش ۷ درصدی افت انرژی به نسبت بافل پنج ضلعی و افت انرژی ۵ درصدی به نسبت بافل دایره‌ای می‌شود. در بازه $1/6$ الی $1/3$ از y_c/H بیشترین میزان افت جریان در بافل‌های با ابعاد ۲ سانتی‌متری رخ می‌دهد اما در مقادیر کمتر y_c/H ، بیشترین افت در ارتفاع ۱ سانتی‌متری رخ می‌دهد. به‌طور کلی با افزایش عدد و بر میزان افت انرژی هم کاهش می‌یابد. بیشترین افت انرژی در عدد وبر ۲۰۰ صورت گرفت که مربوط به بافل مکعبی شکل است. بیشترین افت انرژی مربوط به دبی‌های کم است. بیشترین مقدار ضریب دبی بافل دایره‌ای با ابعاد ۲ سانتی‌متر است.

References

- روشنگر، ک.، و اخگر، س. (۱۴۰۰). بررسی عددی و آزمایشگاهی تأثیر المان‌های گوه‌ای شکل بر پارامترهای هیدرولیکی و استهلاک انرژی روی سرریز پلکانی در جریان رویه‌ای. *نشریه مهندسی عمران/امیرکبیر*. ۵۳(۱)، ۱۸۵-۲۰۰.
- روشنگر، ک.، ماجدی اصل، م.، اعلمی، م.ت.، و شیری، ج. (۱۳۹۷). ارزیابی تأثیر تغییرات زاویه سیکل قوسی بر ضریب دبی سرریزهای کنگره‌های قوسی و کلید پیانویی قوسی. *تحقیقات آب و خاک/ایران*. ۴۹(۲)، ۳۴۱-۳۵۱.
- قادری، ا.، و عباسی، س. (۱۳۹۸). بررسی عددی عملکرد سرریزهای پلکانی-کنگراهی روی استهلاک انرژی جریان‌های غیرریزشی. *انجمن هیدرولیک ایران. نشریه هیدرولیک*. ۱۴(۳)، ۱۶.
- قنواتی، م.، سجادی، س.م.، و احدیان، ج. (۱۳۹۸). اثر ارتفاع و فاصله اولین زبری در استهلاک انرژی سرریزهای کلیدپیانویی. *علوم مهندسی و آبیاری (مجله علمی کشاورزی)*. ۴۲(۲)، ۱۷-۳۱.
- کمایی عباسی، ب.، خدانشناس، س.ر.، و حیدرنژاد، م. (۱۳۹۸). بررسی آزمایشگاهی ضریب شدت جریان در سرریزهای کلیدپیانویی دو سیکل. *نشریه آبیاری و زهکشی/ایران*. ۱۳(۱)، ۱۰-۲۰.
- یارمحمدی، ب.، و احدیان، ج. (۱۳۹۸). بررسی آزمایشگاهی اثر دیواره سپری پیوسته و ناپیوسته در جریان عبوری از سرریزهای کلیدپیانویی. *مجله پژوهش آب/ایران*. ۱۳(۲)، ۳۳-۴۱.

- فرهادی، ه.، کرمی مقدم، م.، سبزواری، ت.، و نوروزپور، ش. (۱۴۰۲). بررسی اتلاف نسبی انرژی سرریزهای کلید پیانوی دوزنقه‌ای و قوسی مجهز به بافل. *تأمین آب*، ۲۳(۱)، ۸۰.
- Eslinger, K.R. Crookston, B.M., 2020. Energy Dissipation of Type a Piano Key Weirs. *Water*, 12(1), 1253. <https://doi.org/10.3390/w12051253>.
- Farhadi, H., Karami Moghadam, M., Sabzevari, T. and Noroozpour, Sh., 2023. Study of relative energy dissipation of trapezoidal arced piano key weirs equipped with baffles. *Water Supply*, 23(1), 80. <https://doi.org/10.2166/ws.2022.427>. (In Persian).
- Ghaderi, A. Abbasi, S., 2019. Numerical Investigation of Labyrinth Stepped Spillways Performance on Energy Dissipation of Skimming Flow. *Iranian Hydraulic Association Journal of Hydraulics*, 14(3), 16. <https://doi.org/10.30482/jhyd.2019.135883.1303>. (In Persian).
- Hien, T.C.; Son, H.T. Khanh, M.H.T., 2006. Results of some piano keys weir hydraulic model tests in Vietnam. In: *Proceedings of the 22nd Congress of ICOLD*, Barcelona, Spain.
- Ho Ta Khanh, M., Sy Quat. D., Xuan Thuy, D., 2011. PK weirs under design and construction in Vietnam (2010). *Labyrinth and piano key weirs-PKW 2011*, 225–232. London, CRC Press.
- Kamaei abbasi, B., Khodashenas, S.R., Heidarnejad, M., 2018. Experimental study of Discharge Coefficient in Two-Cycle Piano Key Weirs. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 13(1), 10–20. Doi: 20.1001.1.20087942.1398.13.1.2.8. (In Persian).
- Lempérière F., 2009. *New Labyrinth weirs triple the spillways discharge*. <http://hydrocoop.org>.
- Lempérière, F., 2017. Dams Floods. *Engineering*, 3(1), 144–149. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.01.018>.
- Lempérière, F. Ouamane, A., 2003. The piano keys weir: A new cost-effective solution for spillways. *International Journal on Hydropower and Dams*, (5), 144–149.
- Machiels, O., Erpicum, S., Archambeau, P., Dewals, B., Piroton, M., 2013. Parapet wall effect on piano key weir efficiency. *J Irrig Drain Eng.*, 139(6): 506–511.
- Merkel, J. Belzner, F., Gebhardt, M., Thorenz, C., 2018. Energy Dissipation Downstream of Labyrinth Weirs. 7th *International Symposium on Hydraulic Structures*. Aachen, Germany. <https://doi.org/10.15142/T32D2V>.
- Qanavati, M., Sajjadi, S.M. Ahadiyan, J., 2019. The Effect of Height and First Roughness Distance on Energy Dissipation in Piano Key Weirs. *Irrigation Sciences and Engineering (JISE)*, 42(2), 17–13. Sid. <https://sid.ir/paper/217075/fa>. (In Persian).
- Ribeiro, M, L., Pfister, M., Schleiss, A, J., 2013. Overview of Piano Key weir prototypes and scientific model investigations. *Labyrinth and Piano Key Weirs II*, 273.
- Roshangar, K., Majedi Asl, M., Taghi Alami, M. Shiri, J., 2017. Evaluating the effect of arc cycle angle changes on the discharge coefficient of arched concourse overflows and arched piano key. *Iran water and soil research*, 49(2), 341–351. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2018.231028.667658>.
- Roushangar, K. Akhgar, S., 2021. Numerical and Experimental Study of Wedge Elements Influence on Hydraulic Parameters and Energy Dissipation over Stepped Spillway in Skimming Flow Regime. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(1), 41–44. <https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14587.5689>. (In Persian)
- Roushangar. K., Alami, M.T., Shiri, J. Majedi Asl, M., 2018. Evaluation Effect of Changing the Cycle Arc Angle on Discharge Coefficient of Arced Labyrinth and Arced Piano Key Weirs. *Iranian journal of soil and water research*. 49(2), 241–351. <https://doi.org/10.22059/IJSWR.2018.231028.667658> (In Persian)
- Safarzadeh, A. Noroozi, B., 2016. 3D Hydrodynamics of Trapezoidal Piano Key Spillways. *International Journal of Civil Engineering*. Published online. <https://doi.org/10.1007/s40999-016-0100-8>.
- Silverstri, A., Erpicum, S., Archambeau, P., Dewals, B., Piroton, M. 2013. Stepped spillway downstream of a Piano Key weir—Critical length of uniform flow. In: *International Workshop on Hydraulic Structures*, 99–107. Bundesanstalt fur, Wasserbau, Karlsruhe, Germany.

- Singh, D. Kumar, M., 2022. Hydraulic Design Analysis of Piano Key Weirs: A Review. *Arabian Journal for Science and Engineering*. Published online. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-06370-4>.
- Tiwaria, H. Sharma, N., 2015. Developments to improve hydraulic competence of spillways. *Interanational Conference On Water Resources, Coastal And Ocean Engineering*, 4, 841–846.
- Yarmohammadi, B. Ahadiyan, J., 2019. Experimental study of continues and discontinues parapet walls on piano key weir flow. *Iranian water research journal*, 13(2), 33–41. <https://sid.ir/paper/159716/fa> (In Persian)