

Experimental and Numerical Analysis of Energy Dissipation in Piano Key Weirs with Stepped and Baffled Barriers at Downstream Slop

SEYED MEHDI NAGHIB ZADEH^{1,2}, MOHAMMAD HEIDARNEJAD^{2*}, ALIREZA MASJEDI², AMIN BORDBR²

1. Department of Water Science Engineering, Khouzeestan Science and Research Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

2. Department of Water Science Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

(Received: Jan. 7, 2020- Revised: Oct. 20, 2020- Accepted: Aug. 9, 2020)

ABSTRACT

Piano Key Weirs (PKWs) are amongst the newly developed long-crested weirs that offer a higher discharge capacity relying on their more extended crest compared to labyrinth weirs of the same width. However, the use of barriers at the outlet of PKWs to increase energy dissipation has received little attention so far. In the present work, stepped and baffled models (with a bench height of 30 mm and baffle dimensions of 30 * 30 mm) were adopted to conduct experiments, and the Flow3D software was used for 3D simulation. Experiments were performed using discharge rate of 10 to 50 lit/s. The results revealed by increasing the discharge rate, the energy dissipation reduces. The energy dissipation rate using the baffles was 8.75% higher than that of the stepped model, and 15.21% higher than that of the case with no barriers.

Keywords: Discharge Coefficient, Energy Loss, Flow 3D Software, Piano Key Weir.

بررسی آزمایشگاهی و عددی استهلاک انرژی در سرریزهای کلید پیانویی با شیب پایین دست پلکانی و بافل

سید مهدی نقیب‌زاده^{۱*}، محمد حیدر نژاد^{۲*}، علیرضا مسجدی^۲، امین بردبار^۲

۱. گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات خوزستان، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

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

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۱۷ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۷/۲۹ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۵/۱۹)

چکیده

سرریزهای کلید پیانویی جدیدترین نوع سرریزهای غیرخطی هستند که نسبت به سرریزهای لبه تیز خطی طول تاج بیشتری را در همان عرض به دست می‌دهند و از اینرو ظرفیت تخلیه را بالاتر می‌برند. استفاده از موانع در کلید خروجی سرریزهای کلید پیانویی با هدف افزایش میزان استهلاک انرژی در آنها روشی است که تاکنون کمتر به آن توجه شده است. در پژوهش حاضر برای انجام آزمایش‌ها از دو مدل پلکانی و بافل (ارتفاع پلکان‌ها ۳۰ میلی‌متر و ابعاد بافل ۳۰×۳۰ میلی‌متر) استفاده شد و شبیه‌سازی سه بعدی توسط نرم‌افزار Flow3D انجام گردید. همچنین آزمایش‌ها در محدوده دبی ۵۰-۱۰ لیتر بر ثانیه اجرا شدند. طبق نتایج با افزایش دبی میزان استهلاک انرژی کاهش می‌یابد. میزان استهلاک انرژی در موانع بافل به میزان ۸/۷۵ درصد بیشتر از میزان استهلاک انرژی در موانع پلکانی و ۱۵/۲۱ درصد بیشتر از میزان استهلاک انرژی در حالت بدون مانع است.

واژه‌های کلیدی: افت انرژی، سرریز کلید پیانویی، ضریب دبی، مدل عددی Flow3D.

مقدمه

از سازه‌های مهم و اصلی سد ها می‌توان به سرریزها اشاره نمود. سرریز سازه‌ای است که برای ذخیره آب بیشتر در مخزن و عبور آب‌های اضافی خصوصاً در زمان‌های سیلابی، از سراب به پایاب سدها و رودخانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد (Beyrami, 1999). با توجه به حساسیت بالای کاری که سرریز انجام می‌دهد، ضرورت دارد که توانایی لازم برای بهره‌برداری و دفع سیلاب‌ها و محافظت از سد و تأسیسات وابسته را به طور لحظه‌ای داشته باشد. عملکرد هیدرولیکی سرریزهای ریزشی آزاد برای یک بار آبی ثابت، ارتباط مستقیم با طول سرریز داشته و ضریب دبی (Cd) این نوع سرریزها با استفاده از رابطه (۱) تعیین می‌شود (Henderson, 1966):

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

در این رابطه، C_d ضریب دبی، g شتاب ثقل، H_t مجموع بار آبی بالادست سرریز (ارتفاع پیزومتریک (H) تاج سرریز بعلاوه انرژی جنبشی $(V^2/2g)$ ، L طول تاج است.

یکی از معایب متداول سرریزهای خطی، ظرفیت تخلیه پایین آنها به علت محدودیت عرض موجود برای اجرای این نوع سازه است (Blanc and Lempérière 2001). در دهه سوم قرن گذشته، سرریزهای زیگزاگی به عنوان یک راه حل مؤثر برای بهبود عملکرد هیدرولیکی این نوع از سرریزها توسعه داده شده

است. ساخت این نوع سازه‌ها به واسطه استفاده از دیواره‌های قائم، ساده می‌باشد. لیکن جریان نزدیک‌شونده به این نوع سازه‌ها، به ویژه جریان‌های تحتانی، پس از ورود به محدوده دو دیواره قائم کلید خروجی، به شدت دچار فشردگی شده و به همین علت، کلیدهای ورودی و خروجی نیز عملکرد هیدرولیکی مناسب ندارند. اما در سرریزهای کلید پیانویی، برخلاف سرریزهای زیگزاگی، دهانه‌ها یک در میان شیب‌دار به سمت داخل مخزن و بیرون می‌باشد. سرریز کلید پیانویی یک نوع سرریز زیگزاگی اصلاح‌شده برای مکان‌هایی با عرض محدود می‌باشد. همان‌گونه که در شکل (۱) نشان داده شده است، سرریز PK تیپ A دارای یک تاج مستطیلی زیگزاگی ساده با کف شیب‌دار در کلیدهای ورودی و خروجی می‌باشد (شکل ۱).

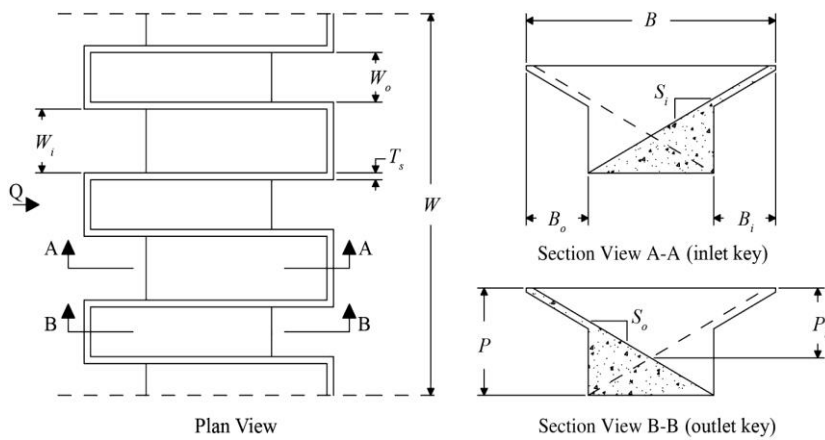
همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، α زاویه دیواره جانبی سرریز با جهت اصلی جریان، W عرض کل سیکل سرریز، L طول تاج سرریز، W_i عرض کلید ورودی، W_o عرض کلید خروجی، W_u عرض یک سیکل $(W_i + W_o)$ ، B طول بالادست تا پایین دست سرریز، B_i طول شیروانی پایین دست، B_o طول شیروانی بالادست، P ارتفاع سرریز، S_o شیب کلید خروجی و S_i شیب کلید ورودی می‌باشد. همچنین پارامترهای مربوط به خصوصیات هندسی و هیدرولیکی در سرریزهای کلید پیانویی،

روش (فیزیکی و عددی) به عمل آوردند. نتایج ایشان نشان داد که نرم‌افزار (Flow3D) می‌تواند رابطه دبی عبوری با بار هیدرولیکی سرریز زیگزاگی دوزنقه‌ای که از انجام آزمایش‌ها بر روی مدل فیزیکی بدست آمده را به خوبی پیش‌بینی کند. بررسی و تجزیه و تحلیل استهلاک انرژی جریان در سرریزهای کلیدپیانویی هدف اصلی مطالعه‌ی حاضر است. در این راستا، دو مدل فیزیکی (تعبیه‌ی مانع در کلید خروجی سرریز، با هدف تداخل تیغه‌های جریان و اختلاط هوا و آب در خروجی) و عددی (نرم‌افزار Flow3D) با هدف افزایش استهلاک انرژی مورد آزمایش و بررسی قرار گرفت. نتایج این آزمایش‌ها بیان می‌کند 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 غیره، به اقتصاد طرح کمک شایانی کرد. مطالعات Yarmohammadi, 2015 نشان داد سرریزهای کلیدپیانویی در بارهای هیدرولیکی کم، عملکرد بسیار مطلوبی دارند و با هوادهی کامل جریان، احتمال وقوع کاویتاسیون کاهش می‌یابد و از فرسایش جلوگیری می‌کنند. با این همه، با افزایش بار هیدرولیکی این مزیت از بین می‌رود و به دلیل تداخل تیغه‌های جریان عبوری از کلید خروجی، از عملکرد سرریز کاسته می‌شود و در نتیجه افت انرژی افزایش می‌یابد (Yarmohammadi, 2015). Qanavati et al., (2016) اثر ارتفاع موانع قرار گرفته در کلید خروجی سرریز کلید پیانویی مستطیلی را بر میزان تغییرات استهلاک انرژی بررسی کردند و نتیجه گرفتند که با افزایش ارتفاع موانع میزان استهلاک انرژی افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش دبی میزانی استهلاک انرژی کاهش می‌یابد.

در تحقیقی (Bremer and Oertel (2017) با استفاده از مدل عددی به بررسی تاثیر ضخامت دیواره بر روی ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی پرداختند. نتایج مطالعه ایشان نشان داد که مدل‌های سه بعدی مورد بررسی توسط Flow3D منجر به تجزیه و تحلیل کارآمد جریان آزاد در سرریزهای PKW می‌شود. طبق نتایج سرریز PKW_{0.05} (حداقل ضخامت دیواره ۰/۰۵ می‌باشد) در مقایسه با سرریز PKW با چهار برابر دیواره‌های ضخیم‌تر، در دبی‌های پایین به میزان ۴۰٪ کارایی بیشتری دارد. Delgado et al., (2015) با استفاده از روش آزمایشگاهی، ضریب دبی سرریزهای زیگزاگی دوزنقه‌ای را به وسیله نصب سازه‌های هیدرودینامیکی در قسمت دماغه‌های بالادست سرریز، مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد سازه‌های مورد استفاده، به‌عنوان یک روش هیدرودینامیکی، بر روی ضریب دبی و نیز میزان دبی عبوری سرریز، تأثیر مثبت داشته‌اند. لازم به ذکر است که در بین سازه‌های

عبارتند از: α ، نسبت طول به عرض کل سرریز (L/W)، نسبت عرض یک سیکل ورودی به ارتفاع تاج (W_i/P)، نسبت بار آبی به ارتفاع سرریز (H/P)، نسبت عرض داخلی دماغه به عرض سیکل (A/W_i)، ارتفاع تاج سرریز (P) و ضخامت دیواره سرریز (T) می‌باشند. یکی از مشخصه‌های مهمی که در سرریزهای کلیدپیانویی تاکنون کمتر به آن پرداخته شده، استهلاک انرژی است. یکی از روش‌های مستهلک کردن انرژی جریان استفاده از مانع یا زبری در ساختار سرریز است. در خصوص کاربرد مانع یا بلوک، آزمایش‌ها و نتایج بررسی‌های سازمان احیای اراضی آمریکا (USBR) نشان داد که با به کار بردن بلوک با ابعاد زیاد که باعث جدایی جت جریان و ایجاد تلاطم می‌شود، می‌توان به‌طور موثر انرژی جریان را کاهش داد (Akbariyan, 2009). (Lempèrière and Ouamane (2003). در ساختار سرریز کلید پیانویی (PKW) در تحقیق خود به بررسی زبری و پلکان بر استهلاک انرژی پرداختند. برای این هدف از چندین مدل فیزیکی با کف زبر به شکل‌های مختلف برای وجه پایین دست سد مخزنی به چند روش استفاده شد: سطح شیب‌دار صاف، سطح شیب‌دار پلکانی (دوبعدی)، سطح شیب‌دار سه بعدی منظم، سطح شیب‌دار پلکانی با موانعی که به‌صورت منظم روی پله‌ها قرار داشتند (نامنظم سه بعدی). تحقیقات نشان داد که سرریز کلید پیانویی همراه با پلکان تنها برای استفاده در سدهای متوسط تا بلند و فقط برای بخش پایینی سد مفید خواهد بود. سرریزهایی که دارای شکل پیچیده‌ای (3D) می‌باشند تاثیر زیادی بر اتلاف انرژی جریان ندارند و حتی ممکن است مقداری خطا ایجاد کنند. (Epicum and Machiels (2011) میزان استهلاک انرژی را در دو هندسه کلید پیانویی و اوجی مورد بررسی قرار دادند. آنها هر یک از این سرریزها را از پایین دست، به یک سرریز پلکانی و از بالادست به یک مخزن آزمایشگاهی وصل کردند. در هر دو سرریز کلیدپیانویی نسبت ابعاد هندسی تقریباً یکسان بود با این تفاوت که ابعاد PKW₂ حدوداً ۱/۶ برابر کوچکتر از ابعاد PKW₁ بود. نتایج بررسی‌ها نشان داد که میزان استهلاک انرژی در طول سازه برای هر سه نوع سرریز تقریباً برابر است. ولی به‌ازای دبی‌های مخصوص یکسان، بسته به نوع سرریز، تفاوت‌های معنی دار در جریان بالادست سرریز پلکانی مشاهده شد. از طرفی، در سرریزهای کلیدپیانویی نسبت به سرریز اوجی، استهلاک انرژی بیشتری مشاهده شد. (Crookston et al., (2012) عملکرد هیدرولیکی سرریزهای زیگزاگی دوزنقه‌ای را برای نسبت‌های بار هیدرولیکی بالا مورد بررسی قرار دادند. ایشان آزمایش‌های مدل فیزیکی خود را بر روی یک فلووم مستطیلی و آزمایش‌های مدل عددی را نیز با استفاده از نرم‌افزار (Flow3D) به انجام رساندند و مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از انجام آزمایش‌ها به وسیله هر دو

هیدرودینامیکی مورد مطالعه، طول تاج سازه‌ای که برابر با ۱۸۰ میلی‌متر بود، بیشترین راندمان هیدرولیکی را داشت.



شکل ۱- پارامترهای هندسی سرریز کلید پیانویی

آزمایشگاهی داشتند. طبق نتایج، سرریزهای کلید پیانویی سه گوش از ضریب دبی بیشتری نسبت به سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی برخوردار بودند. همچنین مشاهده شد، با تغییر در دماغه‌ی سرریز کلید پیانویی ضریب دبی حدود ۸۵ درصد افزایش می‌یابد.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق برای بررسی میزان استهلاک انرژی در سرریز کلید پیانویی در سه حالت (سطح شیب‌دار صاف، سطح شیب‌دار پلکانی و سطح شیب‌دار بافل‌دار)، از دو مدل عددی و فیزیکی استفاده گردید و نتایج این آزمایش‌ها با هم مقایسه شد که در قسمت نتایج و بحث به آن می‌پردازیم.

تحلیل ابعادی

برای برآورد انرژی در بالادست و پایین‌دست سرریز از روابط (۲) و (۳) استفاده شد.

$$E_0 = y_0 + \frac{V_0^2}{2g} \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$E_1 = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} \quad (\text{رابطه ۳})$$

با استفاده از ارتفاع آب در بالادست (y_0) و پایین‌دست (y_1) و سرعت جریان که از رابطه $V = \frac{Q}{y \times b}$ (ارتفاع آب، b عرض کانال (۶۰۰ میلی‌متر) و Q دبی جریان) محاسبه گردید، میزان انرژی در هر مقطع بدست آمده و از رابطه استهلاک انرژی (ΔE_F) میزان افت انرژی نسبی یا استهلاک انرژی جریان محاسبه گردید (رابطه ۴).

$$\Delta E_F = \frac{\Delta E}{E_0} = \frac{E_0 - E_1}{E_0} \quad (\text{رابطه ۴})$$

برای بررسی پارامترهای تاثیرگذار بر استهلاک انرژی ابتدا با مشخص کردن این اعداد با انجام آنالیز ابعادی اعداد بدون بعد

Gharibvand et al. (2020) در تحقیقی به بررسی عددی هیدرولیک جریان در سرریزهای کلید پیانویی و زیگزگی دوزنقه-ای پرداختند. در این تحقیق به منظور بررسی هیدرولیک جریان و مقایسه دبی عبوری، شبیه‌سازی سه بعدی میدان جریان بر روی سرریزهای زیگزگی دوزنقه‌ای (دو سیکل) و کلید پیانویی (دو سیکل) به کمک نرم‌افزار Flow3D به انجام رسید و تاثیر هر کدام از مدل‌ها بر میدان جریان روی سرریزها و ضریب دبی مورد بررسی و نتایج حاصل با اطلاعات آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت.

طبق نتایج، سرریزهای کلید پیانویی از ضریب دبی بیشتری نسبت به سرریزهای زیگزگی برخوردار بودند. در سرریز PKW، با افزایش ۵۰ درصدی در ارتفاع سرریز (P) از ۵ سانتی‌متر به ۷٫۵ سانتی‌متر، ضریب دبی حدود ۲۶ درصد افزایش می‌یابد. همچنین در سرریزهای زیگزگی نیز با افزایش ۵۰ درصدی در ارتفاع سرریز از ۵ سانتی‌متر به ۷٫۵ سانتی‌متر، ضریب دبی حدود ۲۴ درصد افزایش می‌یابد.

Ghanbari and Heidarnajad (2020) در تحقیقی به بررسی آزمایشگاهی و عددی هیدرولیک جریان در سرریزهای کلید پیانویی سه گوش و مستطیلی پرداختند. در این تحقیق اثر دماغه‌ی سه گوش بر روی ضریب دبی سرریز کلید پیانویی و همین‌طور به منظور بررسی هیدرولیک جریان و مقایسه دبی عبوری، شبیه‌سازی سه بعدی میدان جریان بر روی سرریزهای کلید پیانویی سه گوش و مستطیلی به کمک نرم‌افزار Flow3D به انجام رسید و تاثیر هر کدام از مدل‌ها بر میدان جریان روی سرریزها و ضریب دبی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که داده‌های مدل عددی هماهنگی مناسبی با داده‌های مدل

مطالعات آزمایشگاهی تحقیق حاضر در آزمایشگاه هیدرولیک سازمان آب و برق خوزستان انجام یافته است. فلوم آزمایشگاهی با مقطع مستطیلی مورد استفاده از نظر مشخصات هندسی دارای طول ۷ متر و عرض ۰/۶ متر می‌باشد ضمن آنکه در ابتدا و انتهای فلوم، مخازنی به ترتیب برای هدایت جریان به داخل و خارج از آن تعبیه شده است. دیواره‌های فلوم، شفاف و از جنس شیشه ۱۰ میلیمتر بوده که از نظر مشاهده پروفیل سطح آب و پدیده‌های هیدرولیکی بسیار مناسب است، از طرفی کف آن نیز از جنس فلز صیقل داده شده می‌باشد. پس از استقرار مدل‌های آزمایشی، آب از طریق مخزن تأمین آب و پمپ به فلوم آزمایشگاهی منتقل شده و اندازه‌گیری‌ها شامل قرائت ارتفاع سطح آب و دبی انجام پذیرفت. ارتفاع سطح آب بالادست سرریز، قبل از افت سطح آب، به وسیله عمق‌سنج ± 1 میلی‌متر و دبی جریان توسط سرریز مثلثی کالیبره و با استفاده از مانومتر اندازه‌گیری شد (شکل ۲). به منظور آرام نمودن جریان بالادست سرریز و کاهش نوسانات سطح آب، در ورودی فلوم از یک صفحه از جنس ورق PVC استفاده گردید. در مجموع در این تحقیق، تعداد ۳۰ دبی (۴۵-۵ لیتر بر ثانیه)، در حالت جریان آزاد در فلوم برقرار گردید. یادآور می‌شود که با توجه به در نظر گرفتن سیستم تخلیه فلوم، انجام تمام آزمایش‌ها، بدون کنترل پایین‌دست صورت گرفت.

به منظور انجام آزمایش‌ها از ۳ مدل سرریز (کلید پیانویی پلکانی، بافل دار و یک عدد کلیدپیانویی بدون مانع) استفاده گردید که در جدول (۱) مشخصات سرریزها نشان داده شده است. شکل (۳) نمایی از ابعاد سرریزهای کلیدپیانویی ساخته شده را نشان می‌دهد.

مشخص شد که این پارامترها در رابطه ۵ نشان داده شده است: (رابطه ۵)

$$F = f(W_i, W_0, W_u, W, B, B_i, B_o, H_r, H_s, y_c, g, \rho, \sigma, H, L_0, P, L, \mu, Q, \frac{\Delta E}{E_0})$$

در رابطه ۲، W_i عرض کلید ورودی (۱۰۰ mm)، W_0 عرض کلید خروجی (۱۰۰ mm)، W_u عرض یک سیکل، W عرض کل سیکل، B طول بالادست تا پایین‌دست سرریز (۴۰۰ mm)، B_i طول شیروانی بالادست، B_o طول شیروانی پایین‌دست، H_r عمق آب پای سرریز، H_s ارتفاع آب روی نوک سرریز، P ارتفاع سرریز (mm)، L طول تاج سرریز (۴۰۰ mm)، L_0 طول کلید خروجی، y_c عمق بحرانی ($y_c = (q^2/g)^{1/3}$)، H ارتفاع آب روی سرریز، σ کشش سطحی، ρ جرم واحد حجم آب، μ لزوجت دینامیکی، Q دبی جریان، g شتاب ثقل و $\frac{\Delta E}{E_0}$ پارامتر استهلاک انرژی می‌باشد. با استفاده از روش Π باکینگهام آنالیز ابعادی صورت گرفت و پارامترهای بدون بعد زیر بدست آمد (رابطه ۶):

$$f = \left(\frac{H_t}{P}, \frac{H_s}{P}, \frac{H_s}{D}, \frac{y_c}{H}, \frac{\Delta E}{E_0}, We, Re, Fr \right) = 0 \quad (\text{رابطه ۶})$$

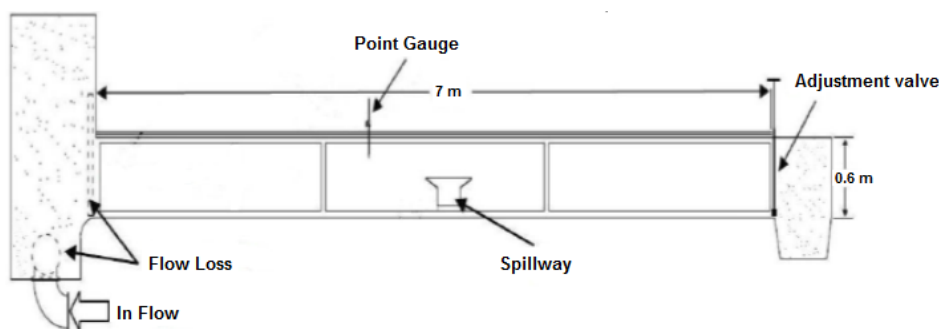
با توجه به ثابت بودن اعداد هندسی سرریز، پارامترهای $W_i, W_0, W_u, W, B, B_i, B_o$ در رابطه ۳ حذف می‌شوند. همچنین عدد رینولدز (Re) در پایین‌دست است و به علت آشفتگی بودن ($Re > 2000$)، از این عدد هم می‌توان صرف‌نظر کرد (Chow, 1959). پس افت انرژی و ضریب دبی تابعی از روابط ۷ و ۸ می‌باشد.

$$\Delta E_r = \frac{\Delta E}{E_0} = f \left(\frac{H_t}{P}, \frac{H_s}{P}, \frac{H_s}{D}, \frac{y_c}{H}, We, Fr \right) = 0 \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$C_d = f \left(\frac{H_t}{P} \right) \quad (\text{رابطه ۸})$$

برای محاسبه ضریب دبی از رابطه ۱ استفاده می‌شود.

مدل‌های آزمایشگاهی و عددی



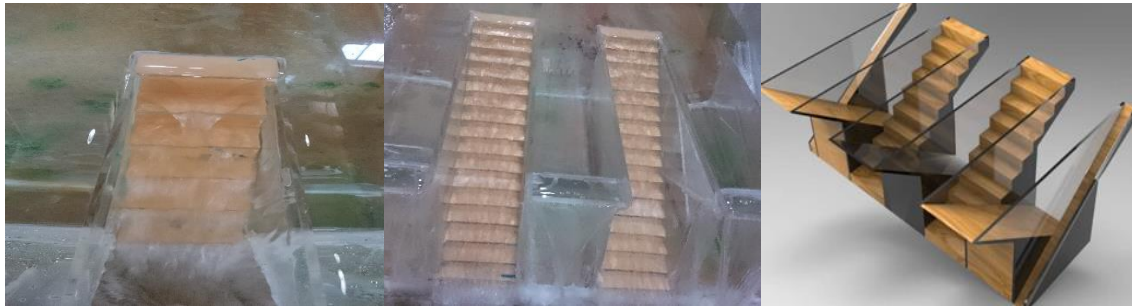
شکل ۲- نمای کلی از تجهیزات و فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در آزمایشگاه

جدول ۱- مشخصات مدل سرریزهای مورد استفاده در این تحقیق

نام سرریز	تعداد سیکل	L(m)	W(m)	P(m)	W/P
Piano Key – Base Model	۵	۰/۳	۰/۰۳	۰/۲	۳
Piano Key Traingular - Buffle	۵	۰/۳	۰/۰۳	۰/۲	۳
Piano Key Rectangular - Stepped	۵	۰/۳	۰/۰۳	۰/۲	۳



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳- مدل‌های سه بعدی سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی، (الف) شاهد. (ب) حالت پلکانی، (ج) حالت بافل

هندسه پیچیده هستند (Maroosi and Roshan, 2015). در این تحقیق از مدل RNG برای بستن معادلات متوسط‌گیری شده زمانی رینولدز استفاده شده است. برای حل عددی از نرم‌افزار FLOW3D استفاده شده و معادلات غیر دائم حاکم با روش حجم محدود، حل عددی شده‌اند. در این نرم‌افزار الگوریتم جزء سطح/حجم بیانگر مانع (FAVOR) برای تعریف هندسه در روش حجم محدود بکار رفته است. سطح آزاد جریان با استفاده از الگوریتم جزء حجم سیال (VOF) تعیین می‌شود. ترم‌های سرعت و فشار بصورت ضمنی و با استفاده از مقادیر فشار و سرعت زمان-های سابق در معادلات پیوستگی و مومنتم کوپل می‌شوند. به همین منظور و با استفاده از نرم‌افزار AutoCad ابتدا یک مدل سه بعدی منطبق بر مشخصات مدل‌های آزمایشگاهی تولید شد و سپس نتایج حاصل به نرم‌افزار FLOW3D برای تولید شبکه با بکارگیری دو ابزار مناسب VOF و FAVOR و تعیین مرزها و شبکه محاسباتی معرفی شد. پس از ورود داده‌های هندسی به محیط نرم‌افزار و تعیین مرزهای کانال اصلی و فرعی، محدوده

سرریزهای ساخته شده از جنس پلکسی گلاس (بدلیل امکان ماشین‌کاری دقیق و آراسته) با ضخامت ۵ میلی‌متر ساخته شدند. هنگام نصب سرریزها، تراز بودن تاج آنها با استفاده از تراز بنایی کنترل می‌گردید. ضمناً عمود بودن دیواره سرریز بر روی کف فلوم، هم در مرحله نصب و هم بعد از قرار گرفتن آب در پشت سرریز، با استفاده از گونیا کنترل گردید. برای شبیه‌سازی پله‌ها و بافل‌ها (Hb) ارتفاع پلکان‌ها و بافل‌ها) از قطعات جداگانه استفاده شد. پس از نصب سرریز و آب‌بند نمودن سرریز با چسب آکواریوم، دبی جریان را به‌وسیله‌ای شیر پروانه‌ای تنظیم نموده، پس از آن با استفاده از ارتفاع‌سنج، ارتفاع آب در فاصله‌ی ۰/۴ متری (ناحیه آرام که باعث افزایش دقت قرائت می‌شود) بالادست سرریز و در پایین دست سرریز اندازه‌گیری شد.

برای ارائه مدل‌های مذکور به‌صورت عددی از نرم‌افزار FLOW3D استفاده گردید. این نرم‌افزار یک مدل مناسب با بازه کاربرد وسیع برای تحلیل مسائل پیچیده سیالات از جمله جریانهای سه بعدی غیرماندگار می‌باشد که دارای سطح آزاد و

برنامه تحقیق از پیش تعیین شد. از بین تمام مدل‌های آزمایش شده، بهترین مدل‌های سرریز که بیشترین افت انرژی را نشان دادند انتخاب و مورد شبیه‌سازی قرار گرفتند. تعداد شبیه‌سازی‌های سه بعدی صورت‌گرفته برای این تحقیق ۶۰ آزمایش بود. بعد از ساخت هندسه سرریزها و انتقال به نرم‌افزار FLOW3D اقدام به مش‌بندی و تعیین شرایط مرزی و همین‌طور شرایط ورودی شد. برای این منظور تعداد ۳۰ آزمایش در شرایط مدل فیزیکی و ۳۰ شبیه‌سازی در شرایط مدل عددی انجام شد که در مجموع ۶۰ آزمایش صورت گرفت که در جدول (۲) نشان داده شده است.

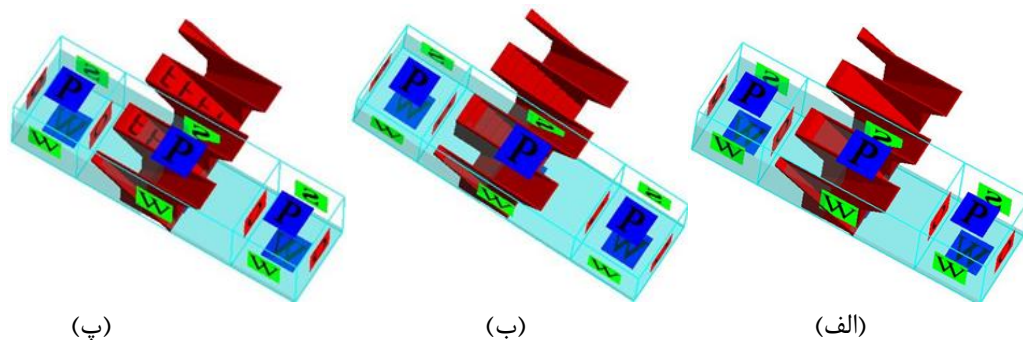
مورد نظر با استفاده از روش‌های VOF و FAVOR شبکه‌بندی شد. ابعاد بهینه شبکه بر مبنای دقت لازم و زمان اختصاص یافته برای انجام محاسبات، انتخاب شده و شبکه میدان به گونه‌ای تنظیم شد که خطوط شبکه متعامد باشند. در این تحقیق برای انجام محاسبات، در مجموع به طور متوسط ۲۰۶۵۰۱۲ سلول برای سه مش بلاک هر کدام به ابعاد $2/5 \times 2/5 \times 2/5$ (برحسب میلی‌متر) برای شبکه‌بندی مدل‌ها انتخاب شد. پس از تولید شبکه محاسباتی، شرط مرزی و شرایط اولیه، شبیه‌سازی جریان آب انجام شد (شکل ۴).

انجام آزمایش‌ها

برای مقایسه نتایج حاصل از مدل عددی و آزمایشگاهی، یک

جدول ۲- آزمایش‌های صورت‌گرفته شده

ردیف	Q(lit/s)	نوع آزمایش	مشخصات
۱	۵۰-۱۰ (دبی)	شاهد فیزیکی	-
۲	۵۰-۱۰ (دبی)	پلکانی فیزیکی	ارتفاع پله ۰/۳ متر
۳	۵۰-۱۰ (دبی)	بافل فیزیکی	ارتفاع بافل ۰/۳ متر
۴	۵۰-۱۰ (دبی)	شاهد عددی	-
۵	۵۰-۱۰ (دبی)	پلکان عددی	ارتفاع پله ۰/۳ متر
۶	۵۰-۱۰ (دبی)	بافل عددی	ارتفاع بافل ۰/۳ متر



شکل ۴- شرایط مرزی ایجاد شده برای سرریزهای کلید پیانویی مورد استفاده در این تحقیق: الف) سرریز کلید پیانویی بافل، ب) سرریز کلید پیانویی پلکان، پ) سرریز کلید پیانویی شاهد

نسبی مورد بررسی قرار گرفت. عدد y/H نشان‌دهنده‌ی میزان دبی جریان و تاثیر ارتفاع آب بر روی سرریز است و عدد وبر نیز نشان‌دهنده‌ی کشش سطحی (به علت تماس مستقیم سرریز با جریان عبوری، کشش سطحی بر میزان افت انرژی تاثیر گذار است) در هیدرولیک می‌باشد.

تاثیر y/H بر میزان افت انرژی نسبی

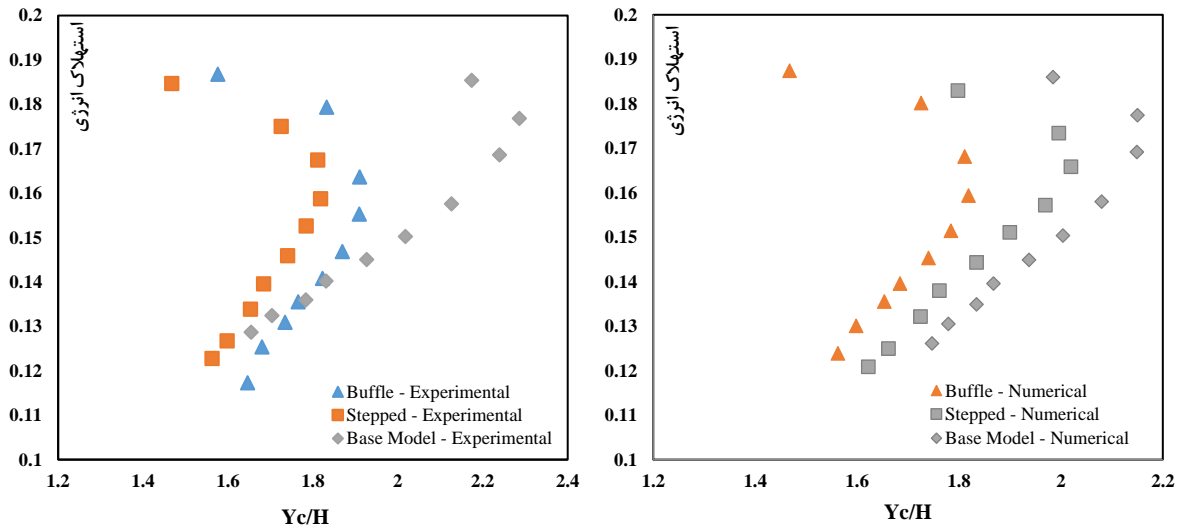
در این قسمت تغییرات استهلاک انرژی در برابر پارامتر بدون بعد y/H برای حالت‌های مختلف موانع نسبت به مدل شاهد بررسی شده است. بدین منظور تاثیر پلکان‌ها و بافل‌ها بر میزان افت انرژی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. یادآوری می‌شود پارامتر H

نتایج و بحث

برای بررسی تاثیر پلکان‌ها و بافل بر روی افت انرژی در سرریز P.K.W چند آزمایش طراحی شد؛ در یک مدل ارتفاع پلکان ۳۰ میلی‌متر، در یک مدل بافل مکعبی (۳۰ میلی‌متر ابعاد هر ضلع) و ۱۵ درصد ارتفاع سرریز بود و در یک مدل سرریز کلید پیانویی (P.K.W) بدون مانع (نمونه شاهد) مورد آزمایش قرار گرفت. این آزمایش‌ها در ۱۰ دبی جریان از ۱۰ الی ۵۰ لیتر بر ثانیه و در مجموع ۳۰ آزمایش انجام شد. برای اندازه‌گیری افت انرژی نسبی $(\frac{\Delta E}{E_0})$ از رابطه‌ی ۴ استفاده می‌شود و تاثیر دو عدد بدون بعد y/H و عدد وبر (We) (در بازه ۴۰ الی ۱۶۰۰) بر میزان افت انرژی

و بعد از اندازه‌گیری چهار برابر این ارتفاع به عنوان نقطه‌ای برای اندازه‌گیری ارتفاع آب در بالادست سرریز انتخاب گردید و با بدست آوردن ارتفاع آب در بالادست، این مقدار را از ارتفاع سرریز کم کرده و به این روش مقدار بار آبی در هر آزمایش بدست آمد.

ارتفاع تیغه آب روی تاج سرریز است که در شکل (۲) مکان قرارگیری Point Gauge (محل اندازه‌گیری H) می‌باشد که چهار برابر بار آبی روی سرریز در بیشترین دبی مورد آزمایش است، به این صورت که بعد از نصب هر سرریز یک دبی حداکثر (۵۰ لیتری) اجرا گردید و مقدار ارتفاع آب روی سرریز اندازه‌گیری شد



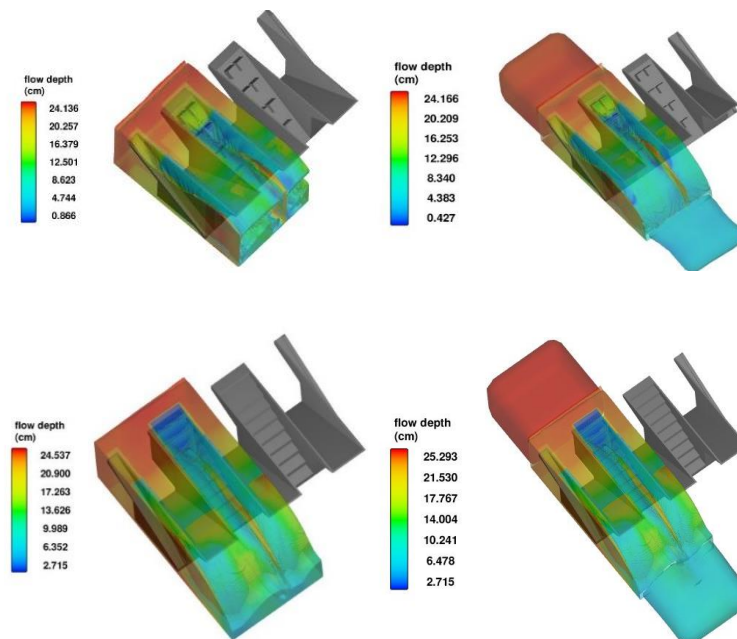
شکل ۵- تاثیر Y_c/H بر میزان استهلاک نسبی انرژی برای موانع متفاوت نسبت به مدل شاهد

حاضر (کلیدپیانویی)، طول موثر سرریز بسیار بیشتر از عرض فلوم است و به این ترتیب بار آبی ایجاد شده بر روی سرریز کاهش می‌یابد، در حالی که Y_c در اینجا با فرض خطی بودن در عرض مورد استفاده است، بنابراین نشان می‌دهد که عمق آب خطی است، اما مقدار H مربوط به سرریز غیر خطی است. در واقع مقادیر بالای Y_c/H به همین دلیل است. همچنین استهلاک انرژی در مدل پلکانی بیشتر از میزان استهلاک انرژی در مدل بافل و شاهد است. بنابراین در دبی یکسان، تفاوت در مانع باعث ایجاد تفاوت در میزان استهلاک انرژی می‌شود و می‌توان گفت در مدل پلکانی، تداخل تیغه‌های جریان بیشتر شده و در نتیجه ورود هوا نیز بیشتر شده است. اما در مدل عددی بیشترین تاثیرگذاری در حالت بافل مشاهده شد که باعث افت بیشتری در سرریز می‌شود. بافل تا ۱۴ درصد، میزان افت انرژی را نسبت به حالت شاهد افزایش می‌دهد.

همان‌طور که از شکل (۵) مدل فیزیکی برمی‌آید، میزان استهلاک انرژی در مدل‌های مانع‌دار بیشتر از میزان استهلاک انرژی در مدل شاهد است. به عبارت دیگر، وجود مانع در کلید خروجی باعث افزایش استهلاک انرژی در سرریزهای کلید پیانویی می‌شود. با توجه به این شکل، در دبی‌های پایین در حدود ۵ تا ۱۵ لیتر بر ثانیه، مانع مورد نظر تاثیر چندانی بر میزان استهلاک نسبی انرژی ندارد. اما پس از آن برای دبی بزرگتر از ۱۵ لیتر بر ثانیه مقدار استهلاک انرژی در حالت مانع‌دار نسبت به مدل شاهد تا ۲۰ درصد افزایش می‌یابد. در واقع در دبی‌های پایین، به دلیل تاثیر کشش سطحی (عدد وبر)، جریان به طور کامل با مانع در تماس است و موانع تأثیری بر شرایط جریان (سرعت و عمق جریان) در سرریز نخواهند داشت. اما در دبی‌های بالا، اثر کشش سطحی بر جریان کمتر است و استهلاک انرژی افزایش می‌یابد. یادآوری می‌شود که با توجه به نوع سرریز مورد استفاده در تحقیق

جدول ۲- مقادیر حداقل، حداکثر و نقطه عطف استهلاک انرژی در برابر Y_c/H برای موانع متفاوت (مدل عددی)

مدل	Q (lit/s)	Y_c/H	$\Delta E/E_0$	درصد کاهش استهلاک انرژی
شاهد	۱-۵۰	۲/۱۷-۱/۶۵	۱/۱۱-۱/۹۸	۴۴/۰۵
بافل	۱-۵۰	۱/۵۸-۱/۶۵	۱/۱۲-۲/۱۸	۵۹/۲۶
پلکانی	۱-۵۰	۱/۴۷-۱/۵۶	۱/۱۳-۲/۱	۵۰/۵



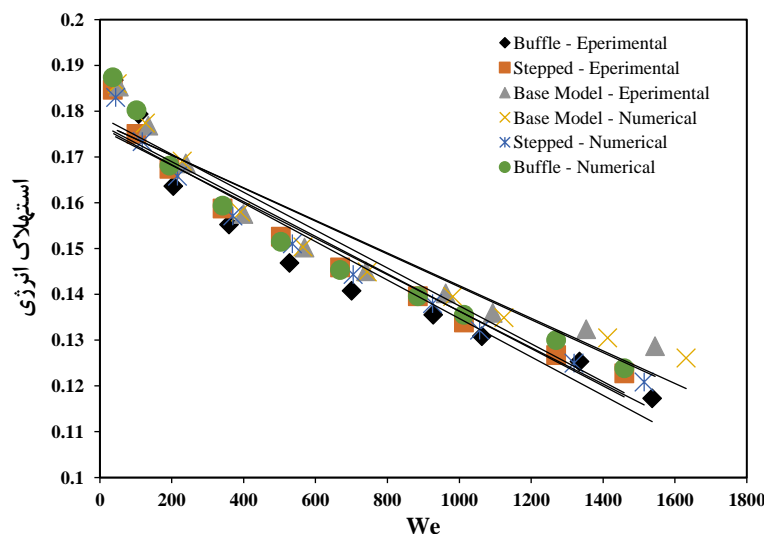
شکل ۶- الگوی عمومی جریان شبیه‌سازی شده بر روی سرریزهای کلید پیانویی پلکانی و بافل‌دار

که در آن، ρ چگالی آب، σ کشش سطحی، H_s ارتفاع آب روی تاج سرریز و V سرعت جریان روی تاج سرریز می‌باشد. دمای متوسط آب ۲۰ درجه سلسیوس و کشش سطحی در این دما حدود 0.074 نیوتن بر متر است. چاو بیان می‌کند که اگر عمق آب روی سرریز بیش از ۳-۴ سانتیمتر باشد، می‌توان تاثیرات عدد وبر را نادیده گرفت (Chow, 1959). در این بخش به بررسی محدوده مؤثر عدد وبر بر میزان استهلاک انرژی پرداخته می‌شود (شکل ۷).

تاثیر عدد وبر بر میزان افت انرژی نسبی

از آنجا 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 که نشان‌دهنده کشش سطحی در مهندسی هیدرولیک است، استفاده می‌شود. برای محاسبه عدد وبر از رابطه ۸ استفاده می‌شود.

$$We = \frac{\rho V^2 H_s}{\sigma} \quad (\text{رابطه ۸})$$



شکل ۷- تغییرات استهلاک نسبی انرژی- عدد وبر

استهلاک انرژی در مدل شاهد از حدود 0.18 به حدود 0.13 ، در مدل بافل از 0.186 به حدود 0.117 و در مدل پلکانی از حدود

همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش عدد وبر، مقدار استهلاک انرژی کاهش می‌یابد، در حالی که میزان

میلی‌متر و جایی است که کشش سطحی بر شرایط جریان بیشتر تاثیر می‌گذارد. به همین دلیل است که شیب نمودار در این محدوده بیشتر است.

در جدول (۳) مشاهده می‌شود که به ازای مقادیر عدد وبر، میزان استهلاک انرژی در مدل پلکانی ۵۰/۵، در مدل بافل ۵۹/۲۶ و در مدل شاهد ۴۴/۰۵ درصد کاهش می‌یابد.

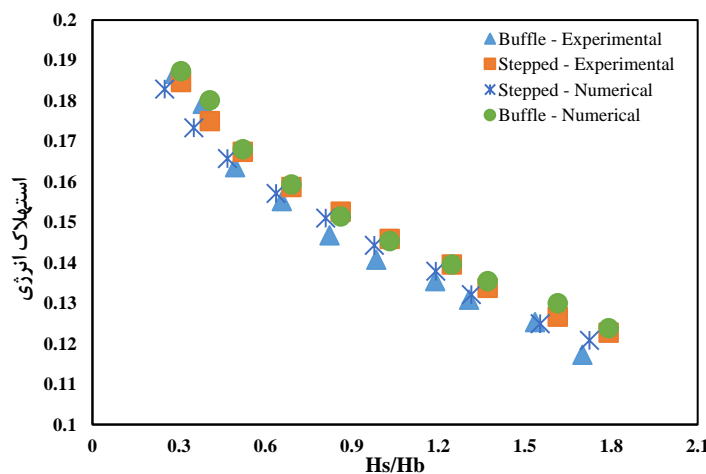
تاثیر عدد بدون بعد Hs/Hb بر میزان افت انرژی نسبی

در شکل (۸)، تغییرات استهلاک انرژی در برابر پارامتر بی‌بعد Hs/Hb برای آرایش متفاوت مانع رسم شده است. پارامتر Hs، ارتفاع تیغه آب روی نوک سرریز و Hb، ارتفاع مانع است.

۰/۱۸۴ به حدود ۰/۱۲۳ کاهش می‌یابد. در واقع، با افزایش عدد وبر از حد بسیار کم (۳۵) تا مقدار زیاد (۱۵۰۰)، میزان کاهش استهلاک انرژی در مدل شاهد، ۴۴/۰۵ درصد، در مدل پلکانی ۵۰/۵ درصد و در مدل بافل ۵۹/۲۶ درصد است. به ازای عدد وبر در محدوده ۳۵-۱۰۰، تغییرات معنی‌داری در میزان استهلاک انرژی دیده نمی‌شود. ولی برای مقادیر عدد وبر در محدوده ۱۵۰۰-۵۰۰، تفاوت‌های معنی‌داری در میزان استهلاک انرژی وجود دارد. در ابتدا با توجه به شیب کمتر نمودار، شدت کاهش کمتر است و به ازای مقادیر پایین عدد وبر در محدوده ۱۵۰۰-۳۵ (در این حالت دبی جریان ۵۰-۵ لیتر بر ثانیه است)، میزان استهلاک انرژی در مدل شاهد از حدود ۰/۱۸۵ به ۰/۱۲۵ کاهش می‌یابد. در این محدوده ارتفاع تیغه آب روی سرریز ۵۱-۶/۲

جدول ۲- مقادیر حداقل، حداکثر و نقطه عطف استهلاک انرژی در برابر عدد وبر برای مانع متفاوت (مدل عددی)

مدل	Q(lit/s)	We	Yc/H	$\Delta E/E_0$	درصد کاهش استهلاک انرژی
شاهد	۱-۵۰	۳۵-۱۵۰۰	۲/۱۷-۱/۶۵	۱/۱۱-۱/۹۸	۴۴/۰۵
بافل	۱-۵۰	۳۵-۱۵۰۰	۱/۵۸-۱/۶۵	۱/۱۲-۲/۱۸	۵۹/۲۶
پلکانی	۱-۵۰	۳۵-۱۵۰۰	۱/۴۷-۱/۵۶	۱/۱۳-۲/۱	۵۰/۵



شکل ۸- نمودار تغییرات استهلاک نسبی انرژی Hs/Hb

انرژی در مدل پلکان است، اما در مدل فیزیکی حالت پلکان بهتر از بافل می‌باشد. در جدول (۴) مقادیر استهلاک انرژی نسبت به پارامتر بی‌بعد Hs/Hb برای تنظیم آرایش متفاوت مانع، نسبت به مدل شاهد، نمایش داده شده است.

در شکل (۸) با افزایش نسبت Hs/Hb که ناشی از افزایش دبی است، مقدار استهلاک انرژی جریان در دو آرایش مورد نظر، به دلیلی که قبلاً توضیح داده شد، کاهش می‌یابد. بر اساس این شکل، در مدل عددی در دبی ثابت و مانع بار ارتفاع یکسان، مقدار استهلاک انرژی در مدل بافل بیشتر از میزان استهلاک

جدول ۴- مقادیر حداقل، حداکثر و نقطه عطف استهلاک انرژی در برابر نسبت بدون بعد Hs/Hb برای مانع متفاوت (مدل عددی)

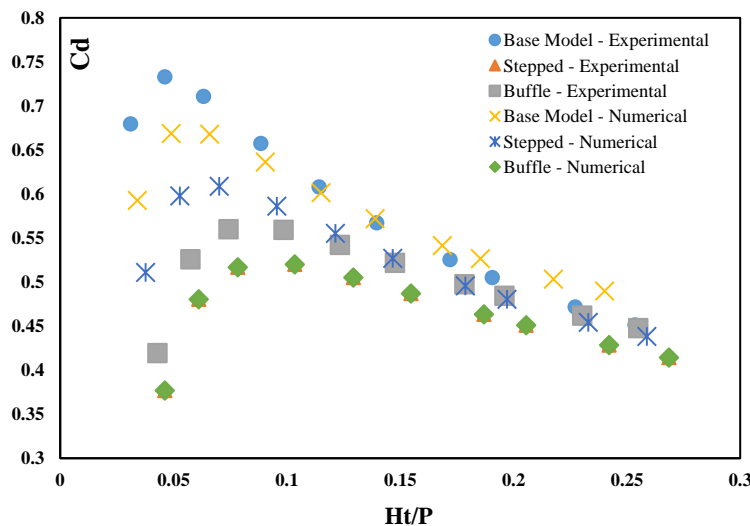
مدل	Q(lit/s)	Hs/Hb	Yc/H	$\Delta E/E_0$	درصد کاهش استهلاک انرژی
بافل	۰/۲۸۶-۱/۷۰	۲/۱ - ۰/۳	۱/۵۸-۱/۶۵	۱/۱۲-۲/۱۸	۵۹/۲۶
پلکانی	۰/۳۰۷-۱/۷۹	۲/۱ - ۰/۳	۱/۴۷-۱/۵۶	۱/۱۳-۲/۱	۵۰/۵

Ht/P را نشان می‌دهد. به طور کلی و مطابق این شکل، ضریب دبی جریان در ابتدا با افزایش نسبت Ht/P، به علت تأثیرات کشش سطحی (تماس دائم تیغه جانبی با تاج جانبی سرریز)، روندی صعودی دارد و پس از رسیدن به مقدار بیشینه خود، با افزایش بیشتر Ht/P به دلیل تداخل جریان در کلید خروجی سرریز (بالادست تاج جانبی) شروع به کاهش می‌کند. این شکل در واقع به نحوی بیانگر راندمان بالای سرریزهای کلید پیانویی در تراز کم آب نیز هست. همچنین، مشاهده می‌شود که با افزایش ۰/۰۵ $Ht/P =$ ضریب دبی به حداکثر مقدار خود یعنی ۰/۷۳ افزایش می‌یابد با افزایش Ht/P به بیش از ۰/۱۵، ضریب دبی تا مقدار ۰/۴۵ کاهش می‌یابد. این مسئله، همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، نشانگر بازدهی سرریز کلید پیانویی در دبی‌های کم است. همچنین میزان اختلاف خطای مدل عددی و فیزیکی کمتر از ۰/۲ درصد می‌باشد.

با توجه به نمودارهای ارائه شده در این تحقیق، با افزایش دبی، اختلاف بین مقادیر استهلاک انرژی افزایش می‌یابد؛ به عبارت دیگر در دبی کم، اختلاف مقادیر استهلاک انرژی در مدل-های مورد آزمایش کم است اما در مقدار زیاد این تفاوت بیشتر است. در دبی کم براساس تئوری جریان ریزشی (غیر لغزشی)، جریان کاملاً با موانع در تماس است؛ با افزایش دبی بر اساس این تئوری، جریان‌های گردابه‌ای ایجاد شده در منطقه جدایی، مانع تماس جریان با مانع می‌شود و در نتیجه از تأثیرات مانع بر مقاومت جریان کاسته خواهد شد و مقدار استهلاک انرژی کاهش می‌یابد.

بررسی تاثیر موانع بر ضریب تخلیه (Ca)

در این قسمت به بررسی تاثیر موانع بر میزان ضریب تخلیه (Ca) که نشان‌دهنده راندمان سرریز می‌باشد پرداخته می‌شود. بر این اساس، شکل (۹) تغییرات ضریب دبی در مقابل پارامتر بدون بعد



شکل ۹- تغییرات C_d در برابر Ht/P برای آزمایش‌ها (مدل عددی و فیزیکی)

میزان استهلاک انرژی در موانع بافل به میزان 8/75 درصد بیشتر از میزان استهلاک انرژی در موانع پلکانی و 15/21 درصد بیشتر از میزان استهلاک انرژی در حالت بدون مانع است. با افزایش نسبت y_c/H ، میزان استهلاک نسبی جریان کاهش می‌یابد. در واقع با افزایش دبی ابتدا نسبت y_c/H از ۱/۴ تا مقدار ۱/۶۵ افزایش می‌یابد و با افزایش این نسبت، میزان استهلاک انرژی کاسته می‌شود. در این محدوده، به دلیل تأثیر کشش سطحی و تداخل تیغه‌های جریان، مقدار استهلاک انرژی واقعی نیست.

با افزایش عدد وبر، مقدار استهلاک انرژی کاهش می‌یابد، در حالی که میزان استهلاک انرژی در مدل شاهد از حدود ۰/۱۸

نتیجه‌گیری

در این تحقیق استهلاک انرژی در سرریزهای کلید پیانویی با شیب پایین دست پلکانی و بافل بررسی شد. در این راستا تأثیر سه پارامتر بی بعد نسبت بار هیدرولیکی به ارتفاع تاج سرریز (H_t/H_b)، استهلاک انرژی، پارامتر بدون بعد (H_s/H_b) و عدد وبر و همچنین عمق بحرانی جریان روی تاج سرریز به عمق آب روی تاج سرریز مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین مقایسه بین نتایج مدل آزمایشگاهی و مدل عددی صورت پذیرفت. در ادامه نتایج حاصل از تحقیق ارائه شده است:

در مدل‌های مختلف سرریزهای مانع دار، با افزایش دبی، اختلاف بین مقادیر استهلاک انرژی افزایش می‌یابد.

دو حالت بافل و پلکان بیشتر از حالت شاهد افت انرژی ایجاد می‌کند اما در مدل عددی حالت بافل بیشتر از پلکان تاثیرگذار است اما در مدل عددی پلکان بیشتر از بافل تاثیرگذار می‌باشد.

سپاس‌گزاری

این مقاله مستخرج از پایان‌نامه می‌باشد. نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از سازمان آب و برق خوزستان برای در اختیار قرار دادن تجهیزات آزمایشگاهی قدردانی نمایند. همچنین مقاله مزبور برگرفته از رساله دکتری سید مهدی نقیب‌زاده دانشجوی دوره دکتری سازه‌های آبی واحد علوم و تحقیقات خوزستان و واحد اهواز دانشگاه آزاد اسلامی می‌باشد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Akbariyan, A. (2009). *Design of Hydraulic Structures Canals*. Amidi Publication, Iran. (in Farsi).
- Beyrami, M.K. (1999). *Water Transfer Structure*. Isfahan University of Technology. Isfahan, Iran. (in Farsi).
- Blanc, P. and Lempérière, F. (2001). Labyrinth spillways have a promising future. *International Journal of Hydropower and Dams*, 8, 129-131.
- Bremer, F.L. and Oertel, M. (2017). Numerical investigation of wall thickness influence on Piano Key Weir discharge coefficients: A preliminary study. *Labyrinth and Piano Key Weirs III – PKW 2017*. (pp: 101 -108).
- Crookston, B.M., Paxson, G.S. and Savage, B.M. (2012). Hydraulic Performance of Labyrinth Weirs for High Headwater Ratios. In: *Proceedings of 4th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures*, 9-11 Feb, Porto, Portugal, pp.1-7.
- Delgado, F.G.A., Paulina, M.A. and Camino S.F.G. (2015). Discharge Coefficients Spillways Labyrinth Implementing Hydrodynamic Devices in the upstream side. In: *Proceedings of 36th IAHR World Congress*. 28 Jun- 3 July, Hague, Netherlands. pp. 1-7.
- Erpicum, S. and Machiels, O. (2011). Energy dissipation on a stepped spillway downstream of a Piano key weirs – experimental study. In: *Proceedings of International Conference on Labyrinth and Piano Key Weirs*, Taylor & Francis Group, London.
- Ghanbari R and Heidarnjad, M. (2020). Experimental and numerical analysis of flow hydraulics in triangular

به ۰/۱۳، در مدل بافل از ۰/۱۸۶ به ۰/۱۱۷ و در مدل پلکانی از حدود ۰/۱۸۴ به ۰/۱۲۳ کاهش می‌یابد. در واقع، با افزایش عدد وبر از حد بسیار کم (۳۵) تا مقدار زیاد (۱۵۰۰)، میزان کاهش استهلاک انرژی در مدل شاهد، ۴۴/۰۵ درصد، در مدل پلکانی ۵۰/۵ درصد و در مدل بافل ۵۹/۲۶ درصد است. به ازای عدد وبر در محدوده ۱۰۰-۳۵، تغییرات معنی‌داری در میزان استهلاک انرژی دیده نمی‌شود. ولی بین مقادیر عدد وبر در محدوده ۱۵۰۰-۵۰۰ تفاوت‌های معنی‌داری در میزان استهلاک انرژی وجود دارد. حداکثر ضریب دبی جریان برابر ۰/۷۳ و برای حالت بدون استفاده از مانع (حالت شاهد) است.

مقایسه بین نتایج حاصل از انجام آزمایش‌ها به وسیله هر دو روش (آزمایشگاهی و عددی) نشان داد که نرم‌افزار Flow3D با نتایج کار آزمایشگاهی مقدراری متفاوت است به گونه‌ای که در

and rectangular piano key weirs. *Water Science*. (pp:1110-4929)

Gharibvand, R. Heidarnjad, M Kashkouli, . H. A. Hasoonizadeh, H. and A. A. Kamanbedast. (2020). Numerical Analysis of Flow Hydraulic in Trapezoidal Labyrinths and Piano Key Weirs. *Journal of Water and Soil Science Vol. 24, No. 1, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran*. (in Farsi).

Henderson, F. M. (1966). Channel controls. *Open Channel Flow*, Gene Nordby, Macmillan, NY, (pp. 174-175).

Lempérière, F. and Ouamane, A. (2003). The piano keys weir: A new cost-effective solution for spillways. *International Journal on Hydropower and Dams*, (5), 144-149.

Maroosi, M. and Roshan, R. (2015). *Analysis and design with FLOW-3D software*. Isatis, Fadak, Iran. (in Farsi).

Qanavati, M., Sajjadi, S. M. and Ahadiyan, J. (2016). The effect of block height on flow hydraulic behavior in rectangular piano key weir with baffled outlet key. In: *Proceedings of 3rd International Conference on Geographical Science*. 3 Nov. Shiraz University. Shiraz, Iran. (in Farsi).

Yarmohammadi, B. (2015). Effect of parapet wall on the inlet submergence in piano key weirs. M. Sc. Thesis. Faculty of Water Engineering. Shahid Chamran University of Ahwaz. Ahwaz, Iran. (in Farsi).