

بررسی آزمایشگاهی اتلاف انرژی جریان در سرریز کلیدپانویی پله‌ای دوزنقه‌ای

امیرحسین فتحی^۱، چنور عبدی چوپلو^۲، مسعود قدسیان^{۳*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس.
۲. دانشجوی دکتری مهندسی عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس.
۳. استاد هیدرولیک، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

Email: ghods@modares.ac.ir

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۱۳

دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۲

چکیده

سرریزهای کلیدپانویی، تکامل یافته‌ی سرریزهای کنگره‌ای هستند که در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری قرار گرفته‌اند. با توجه به اینکه اطلاعات کمی در خصوص اتلاف انرژی در سرریزهای کلیدپانویی وجود دارد؛ لذا این مقاله به مطالعه‌ی آزمایشگاهی اتلاف انرژی در سرریز کلیدپانویی دوزنقه‌ای نوع A می‌پردازد. آزمایش‌ها با سرریز بدون پله و با پله در کلیدهای خروجی سرریز و برای دبی‌های مختلف انجام شد. سه مدل سرریز با ابعاد و تعداد متفاوت پله‌ها در کلیدهای خروجی سرریز استفاده شد. سرریز اول با تعداد ۵ پله، سرریز دوم با تعداد ۱۰ پله و سرریز سوم با تعداد ۱۵ پله مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که در دبی‌های پایین نسبت به دبی‌های بیشتر، اتلاف انرژی بیشتر است. میانگین اتلاف انرژی نسبت به سرریز بدون پله، در سرریز ۵ پله‌ای ۱۵/۷۳ درصد، در سرریز ۱۰ پله‌ای ۲۴/۹۳ درصد و در سرریز ۱۵ پله‌ای ۱۸/۵۲ درصد است. ضریب آبگذری با دو روش محاسبه و مقایسه شدند. ضریب آبگذری محاسبه شده با رابطه‌ی انتگرالی ۲/۶۴ درصد بیشتر از ضریب آبگذری محاسبه شده با رابطه‌ی عمومی سرریزها است. افزون بر این، ضریب آبگذری با افزایش نسبت طول تاج سرریز به عرض سرریز افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی: اتلاف انرژی، سرریز کلیدپانویی، پله، کلیدهای خروجی، ضریب آبگذری

۱. مقدمه

سدها و مخازن از جمله موثرترین راه‌ها برای ذخایر آبی بلند مدت و محافظت در برابر سیل هستند. برای بهبود شرایط آبی و برقی هر کشوری، سدها و مخازن نقش حیاتی دارند [1]. در چنین مواردی کنترل سیل باید طوری تضمین شود که عبور و یا رهاسازی سیل، بدون ایجاد هیچ‌گونه حادثه‌ی خطرناکی

انجام پذیرد. کنترل سیل و یا رهاسازی سیلاب، یکی از جنبه‌های اساسی محافظت از سد است؛ زیرا می‌تواند بسته به مقدار آب موجود اثرات قابل توجهی داشته باشد [2]. زیاد بودن جریان می‌تواند ناشی از وجود سری داده‌های هیدرولوژیکی گسترده‌تر و تغییرات آب و هوایی باشد که باعث سرریز شدن جریان در سرریزهای کم اندازه می‌شود. در نتیجه، افزایش

ظرفیت آبگذری این سازه‌ها برای بهبود حفاظت ایمنی آن‌ها ضروری است. معرفی سرریزهای غیر خطی یکی از رایج‌ترین راه‌حل‌ها است. در واقع، این شکل از سرریز دبی را افزایش می‌دهد و در حالی که طول یک سرریز خطی سنتی را حفظ می‌کند [3]. سرریزهای کلیدپیانویی جزء سرریزهای غیر خطی و تکامل یافته‌ی سرریزهای کنگره‌ای هستند که برای بهبود شرایط، اولین بار در سال ۲۰۰۳ معرفی شدند. اولین توسعه دهندگان قصد داشتند یک نوع سرریز غیر خطی جدید با پی کوچکتر ایجاد کنند و در عین حال ساختار اقتصادی و ساده را حفظ کنند [4]. اولین سرریز کلیدپیانویی روی سد *Goulours* در کشور فرانسه ساخته شد [5]. سرریزهای کلیدپیانویی به شکل‌های مثلثی، مستطیلی و دوزنقه‌ای در پلان و مطابق شکل (۱)، در چهار نوع *A*، *B*، *C* و *D* ارائه می‌شوند. این سرریزها دارای کلیدهای خروجی و ورودی هستند که کلیدهای ورودی دارای شیب منفی و کلیدهای خروجی دارای شیب مثبت هستند. سرریز کلیدپیانویی نوع *A* دارای پیشانی در بالادست و پایین‌دست، نوع *B* دارای پیشانی در بالادست، نوع *C* دارای پیشانی در پایین‌دست و نوع *D* فاقد پیشانی است. مطالعات زیادی در مورد تأثیر پارامترهای هیدرولیکی و هندسی بر آبگذری این نوع سرریزها انجام شده است؛ اما مطالعات بسیار کمی روی اتلاف انرژی در آن‌ها صورت گرفته است. محققانی مانند، بیری و همکاران (۲۰۱۱)، اریکوم و همکاران (۲۰۱۳)، هوتاخان و همکاران (۲۰۱۰) و لیت ریبری و همکاران (۲۰۰۷)، روی اتلاف انرژی سرریزهای کنگره‌ای و کلیدپیانویی مطالعاتی انجام داده‌اند [6, 7, 8, 9]. الشکور و الخفاجی (۲۰۱۸) تأثیر شیب‌های سرریز کلیدپیانویی بر اتلاف انرژی را بررسی و مشاهده کردند که با کاهش شیب، انرژی هم کاهش می‌یابد. آن‌ها فاصله‌ی پرش هیدرولیکی از پنجه‌ی سرریز را اندازه‌گیری کردند که برای شیب‌های کم این فاصله برابر صفر بود؛ آن‌ها معتقد بودند که اگر فاصله‌ی پنجه‌ی سرریز تا پرش هیدرولیکی افزایش یابد، اتلاف انرژی کاهش می‌یابد [10]. اسلینگر و کروکستون (۲۰۲۰)، با مطالعات آزمایشگاهی روی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع *A*، معادله‌های تجربی برای پیش بینی انرژی نسبی باقی مانده در پایین سرریز ارائه دادند که تابعی از

ظرفیت آبگذری این سازه‌ها برای بهبود حفاظت ایمنی آن‌ها ضروری است. معرفی سرریزهای غیر خطی یکی از رایج‌ترین راه‌حل‌ها است. در واقع، این شکل از سرریز دبی را افزایش می‌دهد و در حالی که طول یک سرریز خطی سنتی را حفظ می‌کند [3]. سرریزهای کلیدپیانویی جزء سرریزهای غیر خطی و تکامل یافته‌ی سرریزهای کنگره‌ای هستند که برای بهبود شرایط، اولین بار در سال ۲۰۰۳ معرفی شدند. اولین توسعه دهندگان قصد داشتند یک نوع سرریز غیر خطی جدید با پی کوچکتر ایجاد کنند و در عین حال ساختار اقتصادی و ساده را حفظ کنند [4]. اولین سرریز کلیدپیانویی روی سد *Goulours* در کشور فرانسه ساخته شد [5]. سرریزهای کلیدپیانویی به شکل‌های مثلثی، مستطیلی و دوزنقه‌ای در پلان و مطابق شکل (۱)، در چهار نوع *A*، *B*، *C* و *D* ارائه می‌شوند. این سرریزها دارای کلیدهای خروجی و ورودی هستند که کلیدهای ورودی دارای شیب منفی و کلیدهای خروجی دارای شیب مثبت هستند. سرریز کلیدپیانویی نوع *A* دارای پیشانی در بالادست و پایین‌دست، نوع *B* دارای پیشانی در بالادست، نوع *C* دارای پیشانی در پایین‌دست و نوع *D* فاقد پیشانی است. مطالعات زیادی در مورد تأثیر پارامترهای هیدرولیکی و هندسی بر آبگذری این نوع سرریزها انجام شده است؛ اما مطالعات بسیار کمی روی اتلاف انرژی در آن‌ها صورت گرفته است. محققانی مانند، بیری و همکاران (۲۰۱۱)، اریکوم و همکاران (۲۰۱۳)، هوتاخان و همکاران (۲۰۱۰) و لیت ریبری و همکاران (۲۰۰۷)، روی اتلاف انرژی سرریزهای کنگره‌ای و کلیدپیانویی مطالعاتی انجام داده‌اند [6, 7, 8, 9]. الشکور و الخفاجی (۲۰۱۸) تأثیر شیب‌های سرریز کلیدپیانویی بر اتلاف انرژی را بررسی و مشاهده کردند که با کاهش شیب، انرژی هم کاهش می‌یابد. آن‌ها فاصله‌ی پرش هیدرولیکی از پنجه‌ی سرریز را اندازه‌گیری کردند که برای شیب‌های کم این فاصله برابر صفر بود؛ آن‌ها معتقد بودند که اگر فاصله‌ی پنجه‌ی سرریز تا پرش هیدرولیکی افزایش یابد، اتلاف انرژی کاهش می‌یابد [10]. اسلینگر و کروکستون (۲۰۲۰)، با مطالعات آزمایشگاهی روی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع *A*، معادله‌های تجربی برای پیش بینی انرژی نسبی باقی مانده در پایین سرریز ارائه دادند که تابعی از

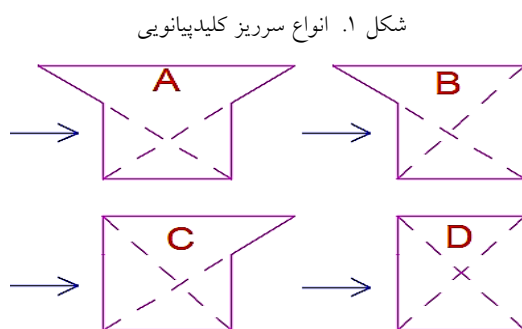


Fig. 1. Types of Piano key weir

۲. تحلیل ابعادی

شکل (۲) جریان از روی سرریز کلیدپیانویی و پارامترهای آن را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، مقدار انرژی در بالادست و پایین‌دست سرریز را می‌توان از رابطه‌ی (۱) و رابطه‌ی (۲) محاسبه کرد و برای مقدار اتلاف انرژی رابطه‌ی (۳) قابل استفاده است. در روابط زیر h عمق جریان در بالادست سرریز، Y_t عمق پایاب، P ارتفاع سرریز، V_1 سرعت جریان در بالادست سرریز، V_2 سرعت جریان در پایین‌دست سرریز، g شتاب ثقل، E_1 انرژی مخصوص در بالادست سرریز و E_2 انرژی مخصوص در پایین‌دست سرریز هستند.

$$E_1 = P + h + \frac{V_1^2}{2g} \quad (1)$$

$$E_2 = Y_t + \frac{V_2^2}{2g} \quad (2)$$

$$E_L = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \quad (3)$$

$$E_r = \frac{E_2}{E_1} \quad (4)$$

پارامترهای موثر بر اتلاف انرژی (E_L) در سرریز کلیدپیانویی با مشخصات هندسی ثابت و وجود پله در کلیدهای خروجی آن را می‌توان به صورت تابع زیر نوشت:

$$E_L = f(H, V_1, \rho, \mu, \sigma, P, Ns, h_s, L_s) \quad (5)$$

در این رابطه H عمق جریان بعلاوه ارتفاع معادل انرژی جنبشی، ρ چگالی آب، μ لزجت دینامیکی، σ ضریب کشش سطحی، P ارتفاع سرریز، Ns تعداد پله، h_s ارتفاع پله و L_s طول کف پله در مسیر جریان هستند. به دلیل آشفتگی زیاد جریان، از لزجت دینامیکی و عدد رینولدز ($Re = \rho V_1 H / \mu \geq 40000$) صرف نظر (سامر و فردسو، ۱۹۹۱) و به دلیل عمق کافی جریان روی تاج سرریز از اثر کشش سطحی و عدد وبر ($We = \rho H V_1^2 / \sigma$) صرف نظر شده است (نواک و همکاران ۱۹۸۱) [15, 14]. با در نظر گرفتن سه متغیر تکراری ρ ، g و H و با استفاده از تئوری پی باکینگهام و پس از ساده‌سازی، اتلاف انرژی تابع اعداد بدون بعد زیر می‌شود.

$$E_L = f\left(\frac{H}{P}, \frac{h_s}{L_s}, Ns\right) \quad (6)$$

با توجه به هندسه‌ی ثابت سرریزهای مورد بررسی در این تحقیق، نسبت ارتفاع پله‌ها به طول کف پله‌ها در مسیر جریان ثابت بود و قابل حذف هستند. بنابراین رابطه (۶) به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$E_L = f\left(\frac{H}{P}, Ns\right) \quad (7)$$

شکل ۲. نمایی از جریان روی سرریز کلیدپیانویی

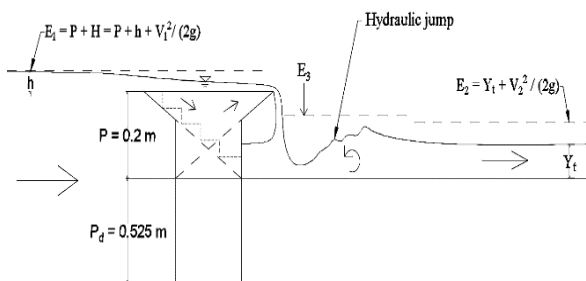
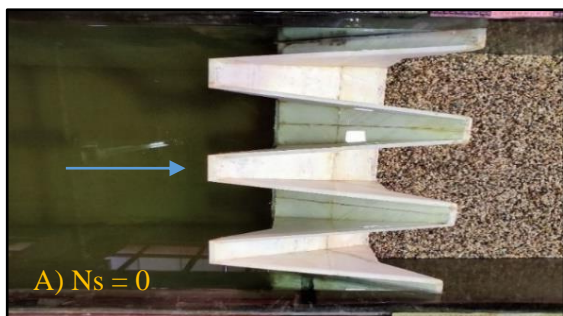


Fig. 2. Flow over Piano key weir

۳. مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک گروه آب و سازه‌های هیدرولیکی دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس، در یک فلوم به طول ۱۰ متر، عرض ۰/۷۵ و ارتفاع ۰/۸۰ متر انجام شد. جریان از یک مخزن زیرزمینی به وسیله یک پمپ تأمین می‌شود. شکل (۳) بیانگر محل نصب سرریز و فلوم آزمایشگاهی است. جریان از مخزن بالادست به طول ۲/۰۵ متر، توسط یک دیوار هدایت کننده و پس از طی یک متر وارد سرریز می‌شود. سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای شکل نوع A با تعداد سه کلید استفاده شد. سرریزهای مورد بررسی با عرض کلید ورودی $W_i = 0.175$ m، عرض کلیدخروجی $W_o = 0.051$ m، طول پیشانی‌های بالادست و پایین دست $B_i = B_o = 0.125$ m، طول دیوار جانبی سرریز $B = 0.5$ m، عرض سرریز $W = 0.75$ m، ارتفاع سرریز $P = 0.2$ m، ضخامت سرریز $T_s = 0.012$ m و شیب کلیدهای ورودی و خروجی ۰/۵۳ است. همچنین مقدار طول کل سرریز (مجموع عرض کلید خروجی و ورودی و دو برابر طول دیوار جانبی سرریز $L = W_i + W_o + 2B$) برابر است با ۳/۷ متر. شکل (۴)، مشخصات سرریز کلیدپیانویی استفاده شده در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد.

شکل ۵. سرریز کلیدپیانویی: الف) بدون پله، ب) ۵ پله، ج) ۱۰ پله، و د) ۱۵ پله



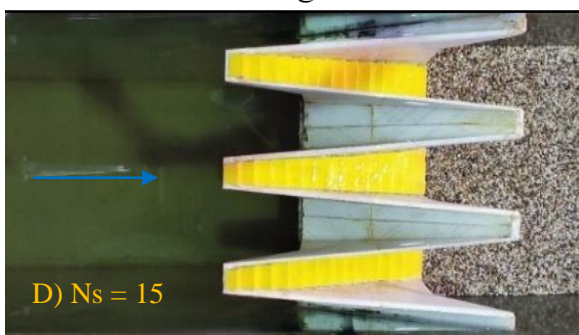
الف



ب



ج



د

Fig. 5. Piano key weirs: a) without steps, b) with 5 steps, c) with 10 steps, and d) with 15 steps

جدول (۱) مشخصات داده‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

شکل ۳. نمایی از فلوم آزمایشگاهی

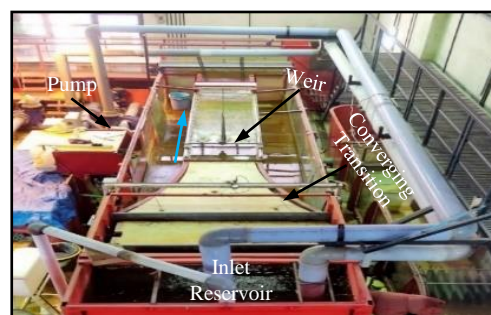


Fig. 3. Experimental flume

شکل ۴. مشخصات هندسی سرریز کلیدپیانویی

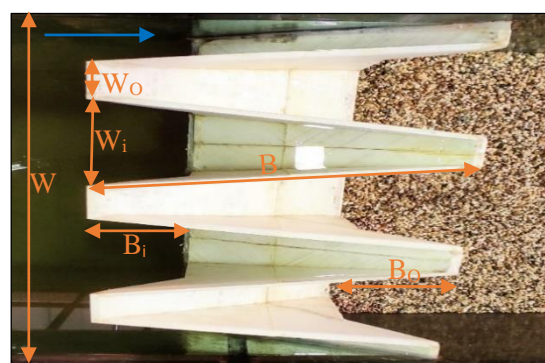


Fig. 4. Geometric specifications of piano key weir

در این مطالعه از یک سرریز بدون پله و سه سرریز با ابعاد و تعداد متفاوت پله‌های نصب شده در کلیدهای خروجی سرریز استفاده شد (شکل ۵). سرریز پله‌دار اول (قرمز رنگ) با تعداد ۵ پله، ارتفاع ۰/۰۴ و طول کف پله‌ی ۰/۰۷۵ متر، سرریز پله‌دار دوم (آبی رنگ) با تعداد ۱۰ پله، ارتفاع ۰/۰۲ و طول کف پله‌ی ۰/۰۳۷۵ متر و سرریز پله‌دار سوم (زرد رنگ) با تعداد ۱۵ پله، ارتفاع ۰/۰۱۳۳ و طول کف پله‌ی ۰/۰۲۵ متر مورد بررسی قرار گرفتند.

به دلیل نوسانات جریان روی پله‌ها عمق جریان روی پله‌ها در سه نقطه چپ و راست و وسط پله‌ها برداشت شد و سپس میانگین آن‌ها استفاده گردید. عمق جریان در بالادست و پایین دست به ترتیب در فاصله‌ی 4h و 10P از سرریز و روی هر پله اندازه‌گیری و با استفاده از رابطه‌های ۱، ۲ و ۳ میزان اتلاف انرژی محاسبه شدند. تمام آزمایش‌ها با جریان آزاد انجام شد.

به رابطه‌ی (۹) برای کمترین دبی و کمترین ارتفاع پله‌ی استفاده شده در این تحقیق، نسبت عمق بحرانی به ارتفاع پله بیشتر از عدد ۰/۸ می‌شود و جریان به صورت پیوسته است.

$$0.2 \leq \frac{h_s}{L_s} \leq 0.6 \quad (8)$$

$$\frac{h_c}{h_s} > 0.8 \quad (9)$$

شکل ۶. جریان عبوری از سرریز کلیدپیانویی همراه با پله

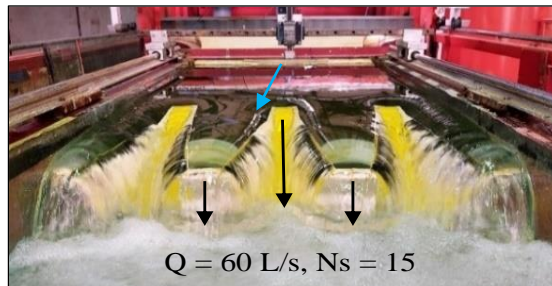


Fig. 6. Flow through the weir of the piano key with step

شکل (۷) الگوی متفاوت جریان پیوسته روی پله‌ها در آزمایش‌های این تحقیق را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل نشان داده شده است، جریان در روی پله‌های کلیدهای خروجی، افزایش عمق (استغراق موضعی) را تجربه می‌کند. موقعیت افزایش عمق در سرریزهای استفاده شده، با تعداد پله‌های مختلف، متفاوت بود. بیشترین افزایش ارتفاع جریان در سرریز با تعداد ده پله مشاهده شد. پس از آن، بیشترین افزایش عمق جریان در سرریز با پنج پله و سرریز با پانزده پله اندازه‌گیری شد.

شکل ۷. نمایی از پروفیل جریان روی پله‌ها

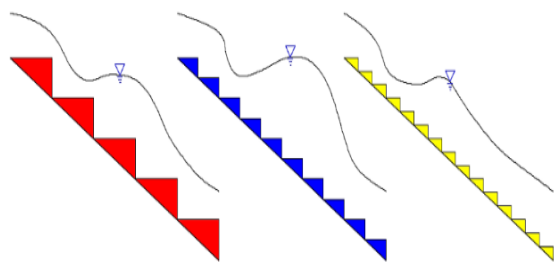


Fig. 7. A view of the flow profile on the steps

³Skimming flow

¹Transition flow
²Nappe flow

جدول ۱. مشخصات آزمایش‌های انجام شده

$Q \left(\frac{m^3}{s} \right)$	N_s	$P + h$ (m)	$E_r = \frac{E_2}{E_1}$	E_L
0.03	0	0.23	0.470	0.530
0.03	5	0.23	0.379	0.621
0.03	10	0.23	0.313	0.697
0.03	15	0.23	0.361	0.639
0.04	0	0.24	0.488	0.512
0.04	5	0.24	0.392	0.608
0.04	10	0.24	0.326	0.674
0.04	15	0.24	0.374	0.629
0.05	0	0.251	0.507	0.493
0.05	5	0.251	0.409	0.591
0.05	10	0.251	0.336	0.664
0.05	15	0.251	0.387	0.613
0.06	0	0.26	0.528	0.472
0.06	5	0.26	0.439	0.561
0.06	10	0.26	0.353	0.647
0.06	15	0.26	0.415	0.585

Table 1. Specifications of tests performed

۴. نتایج و بحث

شکل (۶)، جریان عبوری از روی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل پیدا است، جریان به صورت جت مایل از کلیدهای خروجی و جت ریزشی آزاد از کلیدهای ورودی به پایین دست و داخل کلیدهای خروجی منتقل می‌شود. پرش هیدرولیکی ضعیفی نیز در پایین دست سرریز مشاهده شد. طبق مطالعات انجام شده توسط چانسون (۱۹۹۴) بر روی سرریزهای پلکانی، چنانچه نسبت ارتفاع به طول کف پله‌ها، بین ۰/۲ تا ۰/۶ باشد، جریان روی پله‌ها به صورت انتقالی^۱ (مابین جریان پیوسته و ریزشی) است؛ اما مشاهدات اینچنین بود که جریان روی پله‌ها در این تحقیق به صورت گذرا یا پیوسته^۳ است. همچنین ایشان رابطه‌ی (۸) را برای جریان انتقالی همراه با پرش و رابطه‌ی (۹) را برای جریان پیوسته در سرریزهای پلکانی ارائه داد که در آن h_s ارتفاع پله، L_s طول کف پله و h_c عمق بحرانی جریان است [1]. با توجه

به دلیل افزایش ارتفاع ناحیه‌ی استغراق، گردابه‌ها شدت کمتری به خود می‌گیرند. وجود پله باعث می‌شود تا سه گردابه‌ی داخل کلیدهای خروجی، سطحی‌تر شوند و همین امر باعث افزایش اتلاف انرژی می‌گردد.

شکل ۹. گردابه‌های ایجاد شده روی پله‌ها

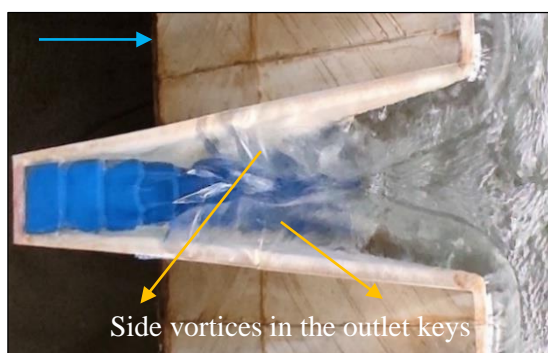


Fig. 9. Vortices created on the steps

ضریب آبدگزی سرریز کلیدپیانویی با استفاده از رابطه‌ی (۱۰) قابل محاسبه است؛ که در آن Q دبی، C_d ضریب آبدگزی، L طول تاج سرریز و H عمق جریان بعلاوه ارتفاع معادل انرژی جنبشی در بالادست است.

$$C_d = \frac{Q}{\frac{2}{3} L \sqrt{2gH^3}} \quad (10)$$

شکل (۱۰)، تغییرات ضریب آبدگزی را بر حسب $\frac{H}{p}$ نشان می‌دهد. داده‌های کبیری سامانی و همکاران (۲۰۱۲) برای سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نیز برای مقایسه در این شکل اضافه شده است. ایشان آزمایش‌های خود را در کانالی به عرض ۰/۴ متر و برای سرریزی با ارتفاع ۰/۲ متر انجام دادند [16]. از این شکل، روشن است که هرچه طول تاج سرریز بیشتر باشد، ضریب آبدگزی هم بیشتر می‌شود و هرچه نسبت هد بالادست به ارتفاع سرریز یا دبی بیشتر شود، ضریب آبدگزی کاهش می‌یابد. میانگین ضریب آبدگزی در سرریز کلیدپیانویی ذوزنقه‌ای حدود ۲۴/۸۷ درصد بیشتر از کلیدپیانویی مستطیلی با نسبت $\frac{L}{w} = 4$ و حدود ۶/۹۷ درصد بیشتر از کلیدپیانویی مستطیلی با نسبت $\frac{L}{w} = 6$ است. L طول تاج سرریز و W عرض کل سرریز است. وجود پله در کلیدهای خروجی طبق

تفاوت شکل پروفیل جریان در سرریز کلیدپیانویی با سرریزهای پلکانی، به دلیل تفاوت هندسه‌ی ذوزنقه‌ای کلیدهای خروجی در سرریزهای کلیدپیانویی است که با افزایش تدریجی دبی در طول کلیدهای خروجی آن همراه است. افزایش عمق جریان روی پله‌ها از فاصله‌ای حدود ۰/۱۲۵ متری از ابتدای کلید خروجی شروع شده (ناحیه‌ی استغراق) و به اصطلاح، شکل زنگوله‌ای به خود گرفته است.

شکل ۸. فرورفتگی‌های ایجاد شده روی سطح جریان و ورود هوا به جریان

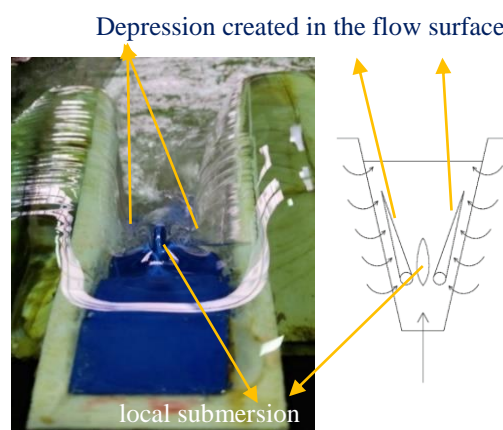


Fig. 8. Holes created on the steps and air entering the flow

در اطراف این برآمدگی دو فرورفتگی به وجود آمده است که از طریق آن‌ها کمی هوا وارد جریان می‌گردد (شکل‌های ۸ و ۹) و سپس وارد گردابه‌های تشکیل شده ناشی از تداخل آب ریزشی از کلیدهای ورودی بر جریان کلیدهای خروجی می‌شود. سه گردابه در عرض کلیدهای خروجی نیز مشاهده شد که گردابه‌های کناری به دلیل تداخل آب و یکی به صورت ساعتگرد و دیگری بر خلاف آن تا آخر کلید خروجی ادامه می‌یابند. گردابه‌ی میانی در محدوده یک سوم آخر کلیدهای خروجی و بعد از بالا آمدن سطح آب به خاطر گردابه‌های کناری و به دلیل سرعت بالای جریان، شکل می‌گیرد که از دو گردابه‌ی کناری قدرت چرخش بیشتری دارد. در آزمایش‌ها مشاهده شد که هرچه دبی افزایش پیدا کند، ناحیه‌ی استغراق در کلیدهای خروجی به سمت جلو حرکت می‌کند و باعث افزایش شدت گردابه‌ی میانی می‌شود. در سرریز ده پله‌ای،

ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی از رابطه‌ی (۱۱) هم قابل محاسبه است که به آن رابطه‌ی انتگرالی نیز گفته می‌شود. ترم اول، میزان دبی عبوری از کلید ورودی، ترم دوم میزان دبی عبوری از کلید خروجی و ترم سوم، میزان دبی عبوری از دیواره‌های جانبی سرریز را نشان می‌دهد. با جمع ضرایب آبگذری به دست آمده از هر ترم توسط دبی عبوری می‌توان ضریب آبگذری نهایی را محاسبه کرد [19].

$$Q = \frac{2}{3} Cd \sqrt{2g} (Nw_i) H^3 + \frac{2}{3} Cd \sqrt{2g} (Nw_o) H^3 + 2 Cd \sqrt{2g} (NB) H^3 \quad (11)$$

شکل (۱۲)، میزان تفاوت ضریب آبگذری محاسبه شده با رابطه‌های (۱۰) و (۱۱) را نشان می‌دهد.

شکل ۱۲. تفاوت ضریب آبگذری توسط رابطه‌ی ۱۰ و ۱۱

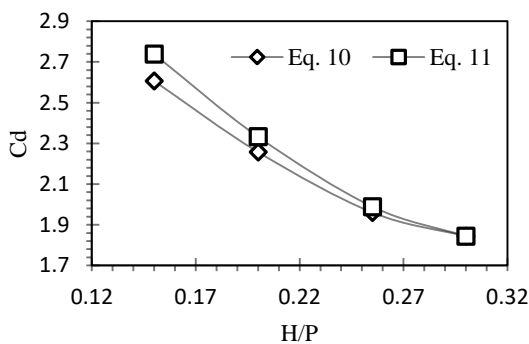


Fig. 12. The difference in discharge coefficient by equations 10 and 11

مقدار ضریب آبگذری به دست آمده از رابطه‌ی (۱۱) حدود ۲/۶۴ درصد بیشتر از مقدار ضریب آبگذری به دست آمده از رابطه‌ی (۱۰) است. به دلیل اندک بودن مقدار تفاوت، لذا می‌توان پذیرفت که محاسبه‌ی ضریب آبگذری از هر دو رابطه یکسان است. در شکل (۱۳)، تفاوت اتلاف انرژی بین مقاطع ۲ و ۳ (با توجه به شکل ۱) مورد بررسی قرار گرفته است. تفاوت اتلاف انرژی در سرریز بدون پله ۲/۹۶ درصد، در سرریز با تعداد پله‌ی ۵ معادل ۲/۸۴ درصد، در سرریز با تعداد پله‌ی ۱۰ معادل ۳/۰۴ درصد و در سرریز با تعداد پله‌ی ۱۵ معادل ۳/۱۶ درصد است. به دلیل کم بودن میزان تفاوت اتلاف انرژی محاسبه شده بین مقطع ۲ و ۳ که حدوداً برابر ۳ درصد است و همچنین

جدول (۱)، هیچ تأثیری بر عمق بالادست و ضریب آبگذری ندارد.

شکل ۱۰. مقایسه ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی مستطیلی با دوزنقه‌ای نوع A

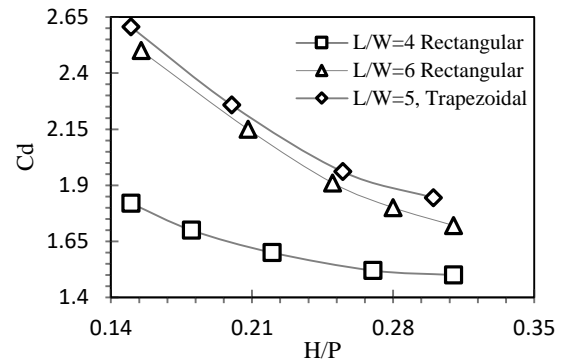


Fig. 10. Comparison of discharge coefficient of rectangular and type A trapezoidal piano keys

شکل (۱۱)، بیانگر تغییرات دبی-ارتفاع جریان (Q-h) در سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای با مشخصات ثابت است. در این شکل از میانگین داده‌های غفوری و همکاران (۲۰۲۰) و داده‌های عبدی چوپلو و همکاران (۲۰۲۲)، برای منحنی دبی-ارتفاع جریان نیز استفاده شده است [17,18]. طبق این شکل هرچه دبی افزایش یابد، عمق جریان در بالادست نیز افزایش پیدا می‌کند؛ اختلاف هدهای اندازه‌گیری شده توسط افراد می‌تواند به دلیل شرایط متفاوت آزمایشگاهی و یا نوسانات دبی باشد.

شکل ۱۱. تغییرپذیری‌های دبی-ارتفاع جریان در سرریزهای کلیدپیانویی دوزنقه‌ای

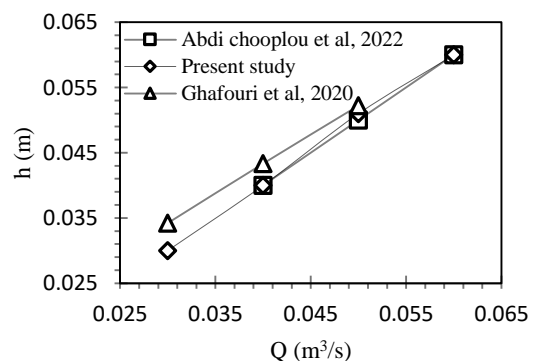
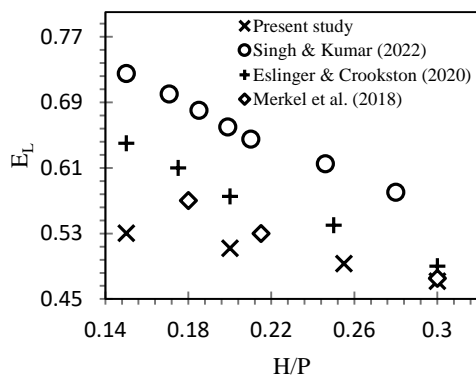


Fig. 11. Head difference-discharge rating curve for trapezoidal PKWs

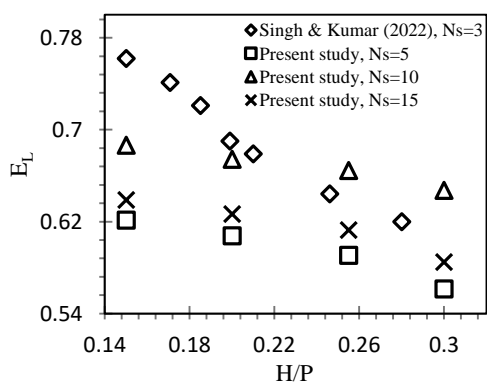
در شکل (۱۵-الف و ب) از داده‌های سینگ و کومار (۲۰۲۲) برای مقایسه نیز استفاده شد. این داده‌ها برای سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B و با ارتفاع ۰/۱۵ متر، تعداد ۳ پله در کلیدهای خروجی، عرض سرریز ۰/۳ متر و با نسبت طول تاج سرریز به عرض سرریز ۵ است [12]. در شکل (۱۵-الف) از داده‌های اسلینگر و کروکسون (۲۰۲۰) برای سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع A با ارتفاع ۰/۲ متر، عرض ۰/۹۳ متر، نسبت طول تاج سرریز به عرض سرریز ۵ و نسبت عرض کلید ورودی به عرض کلید خروجی ۱/۲۵ نیز استفاده شد [11].

شکل ۱۵. تغییرات اتلاف انرژی نسبت به هد نسبی بالادست: الف)

بدون پله، و ب) با پله



الف



ب

Fig. 15. Energy loss versus H/P: a) without steps, and b) with steps

در شکل (۱۵-الف) از داده‌های مرکل و همکاران (۲۰۱۸) برای سرریز کنگره‌ای با ارتفاع ۰/۲۶ متر و نسبت عرض کلید ورودی به خروجی برابر یک، برای مقایسه نیز استفاده شد [20]. تفاوت

برای راحتی کار، اتلاف انرژی در مقاطع ۱ و ۲ (با توجه به شکل ۱۶) محاسبه شده است.

شکل ۱۳. اتلاف انرژی نسبت به هد نسبی بالادست در مقاطع ۲ و ۳

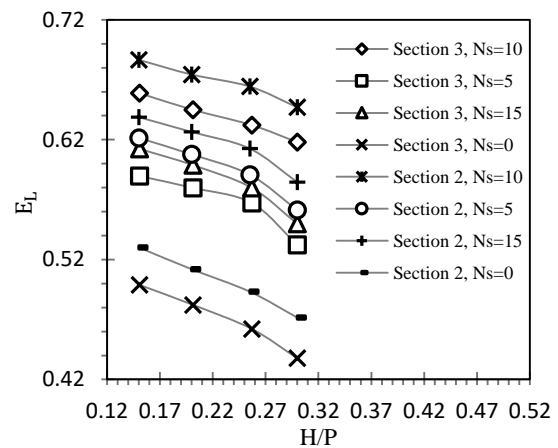


Fig. 13. Energy loss versus H/P in sections 2 and 3

شکل (۱۴)، تأثیر دبی در واحد عرض (q) که تابعی از سرعت و عمق جریان است را نسبت به تغییرات انرژی پایین دست و بالادست سرریز نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود، هرچه دبی در واحد عرض افزایش پیدا کند، مقدار انرژی در پایین دست هم افزایش می‌یابد و روند صعودی را نشان می‌دهد. این روند در سرریز بدون پله بیشتر است؛ زیرا اتلاف انرژی در آن کمتر است.

شکل ۱۴. تغییرات انرژی نسبت به دبی در واحد عرض

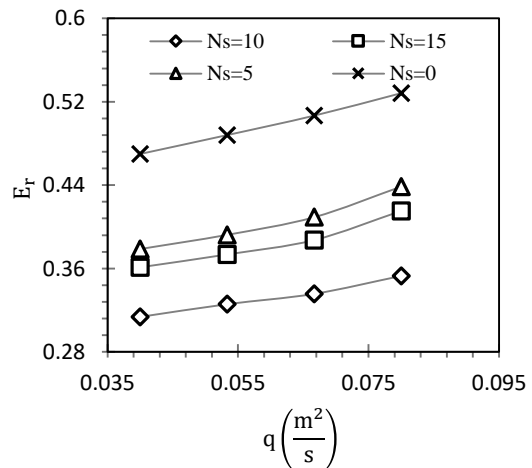


Fig. 14. Energy loss versus per unit width

در این رابطه K ضریبی است که تأثیر تعداد پله را در نظر می‌گیرد. مقادیر این ضریب و ضریب همبستگی در جدول (۲) ارائه شده است.

$$E_L = k \left(-0/5391 \left(\frac{H}{P} \right)^2 - 0/1407 \frac{H}{P} + 0/5629 \right) \quad (12)$$

جدول ۲. مقادیر ضریب همبستگی (R^2) و ضریب k

Ns	k	RMSE	R^2
0	1	0.002	0.9981
5	1.1867	0.005	0.9977
10	1.3327	0.045	0.9967
15	1.2275	0.011	0.9975

Table 2. R^2 and k coefficient values

شکل (۱۷)، مقادیر اتلاف انرژی محاسبه شده (رابطه ۱۲) و مشاهده شده را نشان می‌دهد. طبق این شکل رابطه ۱۲ با دقت مناسبی قابل استفاده هست.

شکل ۱۷. مقایسه‌ی مقادیر محاسبه شده و مشاهده شده اتلاف

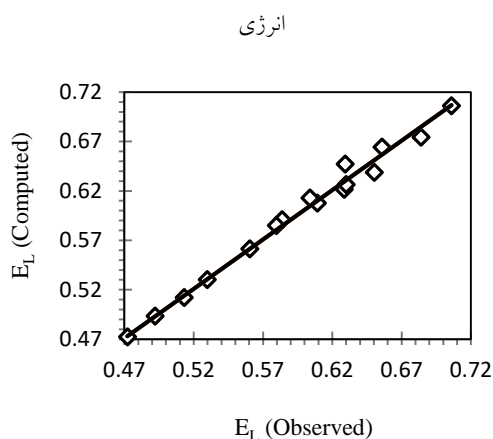


Fig. 17. Computed versus observed energy loss

تغییرات عمق نسبی جریان روی هر پله، برای آزمایش‌های مختلف، در شکل (۱۸) نشان داده شده است. عمق جریان روی هر پله (H_s) را می‌توان با توجه به شکل (۱۸) و یا رابطه‌ی (۱۳) محاسبه کرد. ضریب همبستگی ناشی از رابطه ۱۳ برابر ۷۶/۷۱ درصد با میزان خطای ± 20 درصد است.

اتلاف انرژی در این شکل‌ها قابل مشاهده است که می‌تواند به دلیل نوع سرریز، تعداد پله و ارتفاع سرریز باشد. با توجه به شکل (۱۵-الف)، اتلاف انرژی در سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B بیشتر از سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع A و در هر دو بیشتر از سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع A هستند. اتلاف انرژی در سرریز کنگره‌ای حدود ۴/۴۳ درصد بیشتر از سرریز مورد بررسی در این تحقیق است. مقدار تفاوت اتلاف انرژی در سرریز بدون پله در این تحقیق با سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B حدود ۲۳/۷۳ درصد و با سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع A حدود ۱۴/۱۱ درصد است. همانطور که گفته شد، ارتفاع سرریز می‌تواند روی اتلاف انرژی تأثیر بگذارد. در سرریز با ارتفاع ۰/۱۵ متر نسبت به سرریزهای با ارتفاع ۰/۲ متر، اتلاف انرژی بیشتر است. با توجه به شکل (۱۵-ب)، مقدار اتلاف انرژی در سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع A با تعداد ۱۰ پله، ۳/۷۲ درصد کمتر از مقدار اتلاف انرژی در سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B با تعداد ۳ پله است.

شکل ۱۶. تأثیر تعداد پله و هد نسبی جریان بر اتلاف انرژی

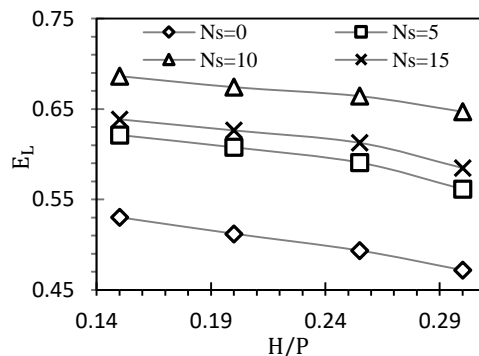


Fig. 16. Effect of H/P and number of steps on ratio of energy loss

شکل (۱۶)، تأثیر وجود پله بر اتلاف انرژی برای سرریزهای استفاده شده در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد. با توجه به شکل‌های بالا، میانگین اتلاف انرژی در سرریز ۵ پله‌ای ۱۵/۷۳ درصد، در سرریز ۱۰ پله‌ای ۲۴/۹۳ درصد و در سرریز ۱۵ پله‌ای ۱۸/۵۲ درصد برآورد می‌شود. همچنین با توجه به داده‌های شکل (۱۶)، رابطه‌ی زیر برای محاسبه‌ی اتلاف انرژی ارائه شده است.

۵. نتیجه گیری

۱. ضریب آبگذری محاسبه شده از رابطه‌ی عمومی سرریزها ۲/۶۴ درصد کمتر از ضریب آبگذری محاسبه شده با رابطه‌ی انتگرالی است.
۲. میزان تفاوت اتلاف انرژی محاسبه شده قبل از پرش هیدرولیکی و در فاصله‌ی 10P حدود ۳ درصد است.
۳. با افزایش دبی و یا عمق جریان در بالادست سرریز، اتلاف انرژی کاهش می‌یابد.
۴. وجود پله در کلیدهای خروجی سرریز، بر افزایش اتلاف انرژی تأثیرگذار است و اتلاف انرژی را افزایش می‌دهد.
۵. در سرریز ۱۰ پله‌ای، بیشترین اتلاف انرژی مشاهده شد که نسبت به سرریز بدون پله برابر ۲۴/۹۳ درصد است.
۶. روابطی برای اتلاف انرژی سرریز کلیدپیانویی پله‌ای دوزنقه‌ای و همچنین اتلاف انرژی روی هر پله ارائه شد.

۶. مراجع

- 1- Chanson, H., 1994. Hydraulics of nappe flow regime above stepped chutes and spillways. Transactions-Institution of engineers Australia, civil engineering, 36, pp.69-69.
- 2- Pinto, M.M.M., Matos, J.D.S.G. and dos Santos Viseu, M.T.F., 2017. Energy dissipation on stepped spillways with a piano key weir: experimental study.
- 3- Anderson, R.M. and Tullis, B.P., 2012. Piano key weir: Reservoir versus channel application. Journal of irrigation and drainage engineering, 138(8), pp.773-776.
- 4- Lempérière, F. and Ouamane, A., 2003. The Piano Keys weir: a new cost-effective solution for spillways. International Journal on Hydropower & Dams, 10(5), pp.144-149.
- 5- Crookston, B.M., Erpicum, S., Tullis, B.P. and Laugier, F., 2019. Hydraulics of labyrinth and piano key weirs: 100 years of prototype structures, advancements, and future research needs. Journal of Hydraulic Engineering, 145(12), p.02519004.
- 6- Bieri, M., Federspiel, M., Boillat, J.L., Houdant, B., Faramond, L. and Delorme, F., 2011. Energy dissipation downstream of piano key weirs—case

شکل ۱۸. ارتفاع جریان روی هر پله

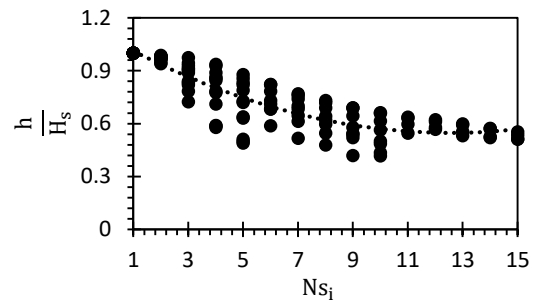


Fig. 18. Flow height on each step

شکل ۱۹. اتلاف انرژی روی هر پله نسبت به عمق جریان در بالادست و عمق جریان روی هر پله

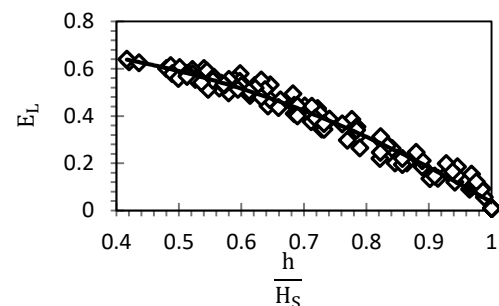


Fig. 19. Energy dissipation on each step relative to the h/H_s

$$\frac{h}{H_s} = 0/0035 (Ns_i)^2 - 0/0871 Ns_i + 1/0951 \quad (13)$$

در رابطه بالا، Ns_i شماره‌ی پله‌ی مورد نظر است. با استفاده از عمق اندازه‌گیری شده روی پله‌ها، عمق جریان و محاسبه‌ی انرژی در بالادست سرریز و با توجه به شکل (۱۹)، می‌توان مقدار اتلاف انرژی روی هر پله را به‌دست آورد. اتلاف انرژی روی اولین پله‌ها حدوداً نزدیک به صفر و در آخرین پله‌ها نزدیک به مقدار اتلاف انرژی قبل از پرش هیدرولیکی (نشان داده شده در شکل‌های ۲ و ۱۳) است. خط برازش استفاده شده در شکل (۱۹) دارای خطای ± 8 درصد است. برای مقدار اتلاف انرژی روی هر پله و با توجه به ۱۲۰ داده‌ی شکل بالا، رابطه‌ی زیر با مقدار ضریب همبستگی ۹۷/۸۱ درصد ارائه شد.

$$E_L = -0/9128 \left(\frac{h}{H_s}\right)^2 + 0/2594 \frac{h}{H_s} + 0/6885 \quad (14)$$

- 14- Sumer, B.M. and Fredsoe, J., 1991, Onset of scour below a pipeline exposed to waves. In The First International Offshore and Polar Engineering Conference. OnePetro.
- 15- Novák, P. and Čabelka, J., 1981. Models in hydraulic engineering: Physical principles and design applications. Monographs & surveys in water resources engineering.
- 16- Kabiri-Samani, A. and Javaheri, A., 2012. Discharge coefficients for free and submerged flow over Piano Key weirs. *Journal of Hydraulic Research*, 50(1), pp.114-120.
- 17- Ghafouri, A., Ghodsian, M. and Abdi Chooplou, Ch., 2020. Experimental study on the effect of discharge and tailwater depth on bed topography downstream of a piano key weir. *Journal of Hydraulics*, 15(3), pp.107-122.
- 18- Abdi Chooplou, Ch., Bodaghi, E., Ghodsian, M. and Vaghefi, M., 2022. Temporal evolution of scouring downstream of a trapezoidal piano key weir. *International Journal of River Basin Management*, pp.1-14.
- 19- Yarmohammadi, B., Ahadiyan, J. and Fathimoghadam, M., 2017. Analytical integration investigation of hydraulic of piano key weirs (PKW) with Continues and discontinues parapet walls. *Irrigation and Water Engineering*, 7(4), pp.1-14.
- 20- Merkel, J., Belzner, F., Gebhardt, M. and Thorenz, C., 2018. Energy dissipation downstream of labyrinth weirs. 7th International Symposium on Hydraulic Structures, DOI: 10.15142/T32D2V.
- study of Gloriettes dam (France). *Labyrinth and piano key weirs-PKW 2011*, pp.123-130.
- 7- Erpicum, S., Laugier, F., Pfister, M., Piroton, M., Cicero, G.M. and Schleiss, A.J. eds., 2013. *Labyrinth and piano key weirs II*. CRC Press.
- 8- Khanh, M.H.T., Hien, T.C. and Quat, D.S., Study and construction of PK Weirs in Vietnam (2004 to 2011).
- 9- Leite Ribeiro, M., Boillat, J.L., Schleiss, A., Laugier, F. and Albalat, C., 2007. Rehabilitation of St-Marc dam experimental optimization of a piano key weir. In *Proceedings of the 32nd Congress of IAHR (No. CONF)*.
- 10- Al-Shukur, A.H.K. and Al-Khafaji, G.H., 2018. Experimental study of the hydraulic performance of piano key weir. *International Journal of Energy and Environment*, 9(1), pp.63-70.
- 11- R. Eslinger, K. and Crookston, B.M., 2020. Energy dissipation of type A piano key weirs. *Water*, 12(5), p.1253.
- 12- Singh, D. and Kumar, M., 2022. Gene expression programming for computing energy dissipation over type-B piano key weir. *Renewable Energy Focus*, 41, pp.230-235.
- 13- Abdi Chooplou, Ch., Ghodsian, M., Abediakbar, D. and Ghafouri, A., 2023. An experimental and numerical study on the flow field and scour downstream of rectangular piano key weirs with crest indentations. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(5), p.140.

An Experimental Study on Energy Loss in Trapezoidal Stepped Piano Key Weirs

Amirhossein Fathi¹, Chonoor Abdi Chooplou², Masoud Ghodsian^{*3}

1. M.Sc. Student, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University
2. PhD Student, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University
3. Prof., Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University

*ghods@modares.ac.ir

Abstract:

Weir is a structure that is made in the body or in supports of a dam to safely discharge the excess volume of water from a reservoir. It is the main factor of safety for dams during floods. A Piano Key Weir (PKW) is a modified type of labyrinth weir that is designed and built for increasing weir capacity at a specified water head on the weir crest compared to linear weirs. It can provide a specified discharge with a significantly lower upstream water depth. Considering that there is little information about energy loss in PKWs, this study dealt with the experimental study of energy loss in a type-A trapezoidal PKW. The experiments were conducted in a flume with a length, width, and height of respectively 10, 0.75, and 0.80 m in the hydraulic laboratory of the Department of Water and Hydraulic Structures in the Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran. They were performed with weirs with and without steps in their outlet keys at the different flow rates of 30, 40, 50, and 60 L/s. The flow from the upstream tank of 2.05 m length was conducted by a guiding wall to enter the weirs after passing a distance of 1 m. A type-A trapezoidal PKW with 6 keys was utilized. The examined weir had an inlet key width of 0.175 m, outlet key width of 0.051 m, upstream and downstream overhang length of 0.125 m, lateral wall length of 0.5 m, weir height of 0.2 m, weir wall thickness of 0.012 m, and inlet and outlet key slope of 0.53. 3 with different number of steps were employed at the outlet keys. The first, second, and third weirs were investigated with 5, 10, and 15 steps, respectively. The PKW geometry creates a 3D flow field that can be characterized by inclined jet and free fall jet exiting the inlet and outlet keys, respectively. The results showed that the energy loss was higher at lower flow rates. The average energy losses were 15.73, 24.93, and 18.52% in the 5, 10, and 15 steps weir, compared to those without steps, respectively. The discharge coefficients were calculated and compared via two methods. The discharge coefficient calculated with an integral equation was 2.64% higher than that calculated with the general equation for weirs. In addition, the discharge coefficient increased with an increase in the ratio of the weir crest length to its total width. The energy loss decreased with an increase in the flow rate and depth of flow upstream of the weir. The presence of steps at the weir outlet keys had an increasing effect on the energy loss. The highest energy loss (i.e. 24.93%) was observed in the 10-step weir. Also, the local depth of flow in outlet keys is the highest with 10 steps weir. New equations were presented for calculating the amount of energy loss in the type-A trapezoidal stepped PKW, as well as its amount on each step.

Keywords: Energy Loss, Piano Key Weir (PKW), Step, Outlet Key, Discharge Coefficient