مجله علمی – پژوهشی مهندسی عمران مدرس دوره ۲۳، شماره ۴، سال ۱۴۰۲ صفحات ۱۶۵ تا ۱۷۶



بررسی آزمایشگاهی اتلاف انرژی جریان در سرریز کلیدپیانویی پلهای ذوزنقهای

امیرحسین فتحی'، چنور عبدی چوپلو'، 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

یذیر ش: ۱۴۰۲/۰۴/۱۳

چکیدہ

سرریزهای کلیدپیانویی، 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 کلیدپیانویی وجود دارد؛ لذا این مقاله به مطالعهی آزمایشگاهی اتلاف انرژی در سرریز کلیدپیانویی ذوزنقهای نوع A میپردازد. آزمایش ها با سرریز بدون پله و با پله در کلیدهای خروجی سرریز و برای دبی های 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 ۱۹ په مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که در دبی های پایین نسبت به دبی های بیشتر، اتلاف انرژی بیشتر است. میانگین اتلاف انرژی نسبت به سرریز بدون پله، در سرریز ۵ پلهای ۲۵/۷۳ درصد، در سرریز ۱۰ پلهای ۲۴/۹۳ درصد و در سرریز ۱۵ پلهای ۲۸/۵۲ درصد است. 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 میابد.

واژ گان کلیدی: اتلاف انرژی، سرریز کلیدپیانویی، پله، کلیدهای خروجی، ضریب آبگذری

در یافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۲

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 هیچ گونه حادثهی خطرناکی

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

H / P و Wi / Wo هستند. در اینجا H عمق جریان بعلاوهی انرژی جنبشی، P ارتفاع سرریز، W_i و W_o عرض کلیدهای ورودي و خروجي سرريز هستند [11]. سينگ و كومار (۲۰۲۲)، اثرات هندسهی متفاوت سرریز کلیدییانویی مستطیلی نوع B را بر اتلاف انرژی بررسی کردند. ایشان تأثیر وجود سه پله در کلیدهای خروجی سرریز بر اتلاف انرژی را نیز مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که وجود پله باعث افزایش اتلاف انرژی می شود [12]. عبدی چوپلو و همکاران (۲۰۲۳)، به مطالعه آزمایشگاهی و عددی تأثیر شکل تاج دیوار جانبی بر میدان جريان و آبشستگی پاييندست سرريز كليدپيانويي مستطيلي شکل پرداختند. نتایج تحقیقات ایشان نشان داد که تغییر شکل هندسی تاج دیوارهای جانبی سرریز در تمامی مدلها، بیشینه عمق آبشستگی و گستردگی حفره آبشستگی پاییندست سرریز را کاهش داده است [13]. افزایش اتلاف انرژی در سرریز کلیدپیانویی موجب کاهش میزان آبشستگی در پاییندست این سرریز میشود. مروری بر تحقیقات قبلی نشان میدهد که محققان کمی به بررسی تأثیر پله در کلیدهای خروجی این سرریز بر افزایش اتلاف انرژی پرداختند. با وجود مطالعات ارزشمند در مورد اتلاف انرژی روی سرریزهای کنگرهای و کلیدپیانویی، همچنان دانش کافی روی این مهم و تأثیر تعداد پله در کلیدهای خروجی سرریز کلیدپیانویی وجود ندارد. برای درک بهتر این موضوع، در این مقاله از سرریزهای کلیدپیانویی ذوزنقهای نوع A همراه با تعداد متفاوت پله در کلیدهای خروجی آن و تخمین اتلاف انرژی در پاییندست سرریز، استفاده شد.



Fig. 1. Types of Piano key weir

ظرفیت آبگذری این سازهها برای بهبود حفاظت ایمنی آنها ضروری است. معرفی سرریزهای غیر خطی یکی از رایجترین راه حلها است. در واقع، این شکل از سرریز دبی را افزایش میدهد و در حالی که طول یک سرریز خطی سنتی را حفظ مىكند [3]. سرريزهاى كليدپيانويى جزء سرريزهاى غير خطى 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 کلیدییانویی به شکلهای مثلثی، مستطیلی و ذوزنقهای در پلان و مطابق شکل (۱)، در چهار نوع A، B، C و D ارائه می شوند. 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)، ارپیکوم و همکاران (۲۰۱۳)، هوتاخان و همکاران (۲۰۱۰) و لیت ریبیرو و همکاران (۲۰۰۷)، روی اتلاف انرژی سرریزهای کنگرهای و کلیدپیانویی مطالعاتی انجام دادهاند [6, 7, 8, 9]. الشكور و الخفاجي (۲۰۱۸) تأثير شیبهای سرریز کلیدپیانویی بر اتلاف انرژی را بررسی و مشاهده کردند که با کاهش شیب، انرژی هم کاهش می یابد. 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

مجله علمي – پژوهشي مهندسي عمران مدرس

۲. تحلیل ابعادی

شکل (۲) جریان از روی سرریز کلیدپیانویی و پارامترهای آن را نشان می دهد. با توجه به این شکل، مقدار انرژی در بالادست و پایین دست سرریز را می توان 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، ۲ عمق پایاب، P ارتفاع سرریز، V سرعت جریان در بالادست سرریز، g شتاب ثقل، E1 انرژی مخصوص در بالادست سرریز و E2 انرژی مخصوص در پایین دست سرریز هستند.

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

$$E_2 = Y_t + \frac{V_2^2}{2g}$$
 (7)

$$E_{\rm L} = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \tag{(7)}$$

$$E_r = \frac{E_2}{E_1} \tag{(f)}$$

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:

$$E_{L} = f(H, V_{1}, \rho, \mu, \sigma, P, Ns, h_{S}, L_{S})$$
^(a)

در این رابطه H عمق جریان بعلاوه ارتفاع معادل انرژی جنبشی، ρ چگالی آب، μ لزجت دینامیکی، σ ضریب کشش سطحی، ρ ارتفاع سرریز، Ns تعداد پله، $_{\rm s}$ ارتفاع پله و $_{\rm S}$ طول کف پله در مسیر جریان هستند. به دلیل آشفتگی زیاد جریان، از لزجت دینامیکی و عدد رینولدز (40000 $\leq \mu/\mu + \rho P$) صرف نظر (سامر و فردسو، ۱۹۹۱) و بهدلیل عمق کافی جریان روی نظر (سامر و فردسو، ۱۹۹۱) و بهدلیل عمق کافی جریان روی نظر (سامر از اثر کشش سطحی و عدد وبر ((-15,14]) با در تاج سرریز از اثر کشش سطحی و عدد وبر ((-15,14]). با در ضرف نظر شده است (نواک و همکاران ۱۹۸۱) [15,14]. با در نظر گرفتن سه متغیر تکراری ρ و μ و با استفاده از تئوری پی باکینگهام و پس از سادهسازی، اتلاف انرژی تابع اعداد بدون بعد زیر می شود.

$$E_{L} = f\left(\frac{H}{P}, \frac{h_{s}}{L_{s}}, Ns\right)$$
(9)

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) بهصورت زیر نوشته می شود.

$$E_{L} = f\left(\frac{H}{P}, Ns\right) \tag{V}$$

شکل ۲. نمایی از جریان روی سرریز کلیدپیانویی



Fig. 2. Flow over Piano key weir

۳. مواد و روشها

آزمایش ها 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 ۸۰/۰ متر انجام شد. جریان از یک مخزن زیرزمینی به وسيله يک پمپ تأمين مي شود. شکل (۳) بيانگر 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 ذوزنقهای شکل نوع A با تعداد سه کلید استفاده شد. سرریزهای مورد بررسی با عرض کلید ورودی $W_i = 0.175 \text{ m}$ ، عرض كليدخروجي W_o = 0.051 m، طول پيشاني هاي بالادست و پايين دست B_i = B_o = 0.125 m، طول ديوار جانبي سرريز P = 0.75 m، ارتفاع سرریز W = 0.75 m، ارتفاع سرریز B = 0.5 m0.2 m سرريز Ts = 0.012 m و شيب كليدهاي ورودي و خروجي ٥٣/٠ است. همچنين مقدار طول کل سرريز (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.

190

شكل ۵. سرريز كليدپيانويي: الف) بدون پله، ب) ۵ پله، ج) ۱۰ پله، و







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.

بررسی آزمایشگاهی اتلاف انرژی جریان در سرریز ...

شکل ۳. نمایی از فلوم آزمایشگاهی



Fig. 3. Experimental flume

شكل ۴. مشخصات هندسي سرريز كليدپيانويي



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 ۲۰/۰ و طول کفپلهی ۲۰/۰۷ متر، سرریز پلهدار دوم (آبی رنگ) با تعداد ۱۰ پله، ارتفاع ۲۰/۰ و طول کفپلهی ۱۰۳۷۵ متر و سرریز پلهدار سوم (زرد رنگ) با تعداد ۱۵ پله، ارتفاع ۲۰/۰۳ و طول کفپلهی ۲۵۰/۰ متر مورد بررسی قرار گرفتند.

بهدلیل 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 پاییندست 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.

مجله علمي – پژوهشي مهندسي عمران مدرس

جدول ۱. مشخصات آزمایشهای انجام شده

$Q\left(\frac{m^3}{S}\right)$	Ns	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. نتايج و بحث

شکل (۶)، جریان عبوری از روی سرریز کلیدپیانویی ذوزنقه ای را نشان میدهد. همانطور که از شکل پیدا است، جریان بهصورت جت مایل از کلیدهای خروجی و جت ریزشی آزاد از کلیدهای ورودی به پاییندست و داخل کلیدهای خروجی منتقل میشود. پرش هیدرولیکی ضعیفی نیز در پاییندست سرریز مشاهده شد. طبق مطالعات انجام شده توسط چانسون (۱۹۹۴) بر روی سرریزهای پلکانی، چنانچه نسبت ارتفاع به طول کف پلهها، بین ۲/۰ تا 2/۰ باشد، جریان روی پلهها بهصورت انتقالی (مابین جریان پیوسته و ریزشی) است؛ اما مشاهدات اینچنین بود که جریان روی پلهها در این تحقیق برای جریان انتقالی همراه با پرش و رابطهی (۹) را برای جریان پیوسته در سرریزهای پلکانی ارائه داد که در آن r_{1} ارتفاع پله، پیوسته در سرریزهای پلکانی ارائه داد که در آن r_{1} ارتفاع پله،

Transition flow Nappe flow

دوره بیست و سوم / شماره ۴ / سال ۱۴۰۲

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

$$0.2 \le \frac{h_S}{L_S} \le 0.6 \tag{(A)}$$

 $\frac{h_c}{h_s} > 0.8 \tag{(4)}$

شکل ۶. جریان عبوری از سرریز کلیدپیانویی همراه با پله



Fig. 6. Flow through the weir of the piano key with step شـــكل (۷) الگوی متفاوت جریان پیوســـته روی پله ها در آزمایش های این تحقیق را نشـان می دهد. همانطور که در این شکل نشان داده شده است، جریان در روی پله های کلیدهای نحروجی، افزایش عمق (اسـتغراق موضـعی) را تجربه می کند. موقعیت افزایش عمق در سـریزهای اسـتفاده شـده، با تعداد پله های مختلف، متفاوت بود. بیشــترین افزایش ارتفاع جریان پله های مختلف، متفاوت بود. بیشــترین افزایش ارتفاع جریان افزایش عمق جریان در سرریز با پنج پله و سرریز با پانزده پله اندازه گیری شد.





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

³Skimming flow

تفاوت شکل پروفیل جریان در سرریز کلیدپیانویی با سرریزهای پلکانی، بهدلیل 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 ۱۲۵/۰ 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

Depression created in the flow surface



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 می گردد (شکلهای ۸ و ۹) و سپس وارد گردابههای تشکلیل 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 می یابند. گردابهی میانی در محدوده یک سوم آخر کلیدهای خروجی و بعد از بالا آمدن سطح آب به خاطر گردابههای 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 می شود. در سرریز ده پله ای،

بهدلیل افزایش ارتفاع ناحیهی استغراق، گردابهها شدت کمتری به خود می گیرند. وجود پله باعث می شود تا سه گردابهی داخل کلیدهای خروجی، سطحی تر شوند و همین امر باعث افزایش اتلاف انرژی می گردد.

شکل ۹. گردابههای ایجاد شده روی پلهها



Fig. 9. Vortices created on the steps

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

$$Cd = \frac{Q}{\frac{2}{3}L\sqrt{2g}H^{\frac{3}{2}}}$$
(1.)

شکل (۱۰)، تغییرات ضریب آبگذری را بر حسب $\frac{H}{P}$ نشان می دهد. داده های کبیری سامانی و همکاران (۲۰۱۲) برای سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نیز برای مقایسه در این شکل اضافه شده است. ایشان آزمایش های خود را در کانالی به عرض ۴/۰ متر و برای سرریزی با ارتفاع ۲/۰ متر انجام دادند [16]. از این شکل، روشن است که هرچه طول تاج سرریز بیشتر باشد، ضریب آبگذری هم بیشتر می شود و هرچه نسبت هد بالادست به ارتفاع سرریز یا دبی بیشتر شود، ضریب آبگذری کاهش می یابد. میانگین ضریب آبگذری در سرریز کلیدپیانویی نوزنقه ای حدود ۲۴/۸۷ درصد بیشتر از کلیدپیانویی مستطیلی با نسبت $4 = \frac{L}{w}$ و حدود ۷/۹ درصد بیشتر از کلیدپیانویی مستطیلی با نسبت $6 = \frac{L}{w}$ است. L طول تاج سرریز و W ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی از رابطهی (۱۱) هم قابل محاسبه است که به آن رابطهی انتگرالی نیز گفته می شود. 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 می دهد. با جمع ضرایب آبگذری به دست آمده از هر ترم توسط دبی عبوری می توان ضریب آبگذری نهایی را محاسبه کرد [19].

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

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





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

مقدار ضریب آبگذری بهدست آمده از رابطهی (۱۱) حدود ۲/۶۴ درصد بیشتر از مقدار ضریب آبگذری بهدست آمده از رابطهی (۱۰) است. بهدلیل 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 ۲۰۱۴ درصد و در سرریز با تعداد پلهی ۱۵ معادل ۲/۱۶ درصد است. بهدلیل کم بودن میزان تفاوت اتلاف انرژی محاسبه شده بین مقطع ۲ و ۳ که حدودا برابر ۳ درصد است و همچنین جدول (۱)، هیچ تأثیری بر عمق بالادست و ضریب آبگذری ندارد.



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 ذوزنقه ای با مشخصات ثابت است. در این شکل از میانگین داده های غفوری و همکاران (۲۰۲۰) و داده های عبدی چوپلو و همکاران (۲۰۲۲)، برای منحنی دبی-ارتفاع جریان نیز استفاده شده است [18,17]. طبق این شکل هرچه دبی افزایش یابد، عمق جریان در بالادست نیز افزایش پیدا می کند؛ اختلاف هدهای اندازه گیری شده توسط افراد می تواند به دلیل شرایط متفاوت آزمایشگاهی و یا نوسانات دبی باشد.



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

بررسی آزمایشگاهی اتلاف انرژی جریان در سرریز ...

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



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 پاییندست و بالادست سرریز نشان میدهد. همانگونه که مشاهده میشود، هرچه دبی در واحد عرض افزایش پیدا کند، مقدار انرژی در پاییندست هم افزایش مییابد و روند صعودی را نشان میدهد. این روند در سرریز بدون پله بیشتر است؛ زیرا اتلاف انرژی در آن کمتر است.





Fig. 14. Energy loss versus per unit width

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 ۱۵/۰ متر، تعداد ۳ پله در کلیدهای خروجی، عرض سرریز ۳/۰ 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 ۲/۰ متر، عرض ۹۳/۰ 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)



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

اتلاف انرژی در این شکلها قابل مشاهده است که می تواند بهدلیل 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 کلیدییانویی ذوزنقهای 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 سرريز بدون پله در اين تحقيق با سرريز كليدپيانويي 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 می تواند روی اتلاف انرژی تأثیر بگذارد. در سرریز با ارتفاع ۱۵/۰ 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 ذوزنقهای نوع A با تعداد ۱۰ یله، ۳/۷۲ درصد کمتر از مقدار اتلاف انرژی در سرريز كليدييانويي مستطيلي نوع B با تعداد ۳ پله است.



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.

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

$$\begin{split} E_L &= k \, (-\,0/5391 \, (\frac{H}{P})^2 \, - \, 0/1407 \, \frac{H}{P} \qquad \ \ (117) \\ &+\, 0/5629) \end{split}$$

k	ضہ ہ	٩	(\mathbb{R}^2))	ھمىستگ	فيد يب	مقادر م	.۲	J.	دە
		7	\ <u>-</u> -	/ /	200000000	~ ~			<u> </u>	700

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 ۱۲با دقت مناسبی قابل استفاده هست.

شکل ۱۷. مقایسهی مقادیر محاسبه شده و مشاهده شده اتلاف انرژی



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 می توان با توجه به شکل (۱۸) و یا رابطهی (۱۳) محاسبه کرد. ضریب همبستگی ناشی از رابطه ۱۳ برابر ۷۶/۷۱ درصد با میزان خطای ۲۰± درصد است. ۸. 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.
۸. 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 نسبت به سرریز باتلاف انرژی مشاهده شد که نسبت به سرریز بادون پله برابر ۲۴/۹۳ درصد است.

۶. مراجع of nappe flow

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

بررسی آزمایشگاهی اتلاف انرژی جریان در سرریز ...

Fig. 18. Flow height on each step





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

$$\frac{h}{H_s} = 0/0035 (Ns_i)^2 - 0/0871 Ns_i$$
(17)
+ 1/0951

در رابطه بالا، NS_i شمارهی پلهی مورد نظر است. با استفاده از عمق اندازه گیری شده روی پلهها، عمق جریان و محاسبهی انرژی در بالادست سرریز و با توجه به شکل (۱۹)، می توان مقدار اتلاف انرژی روی هر پله را بهدست آورد. اتلاف انرژی روی اولین پلهها حدودا 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 ۸ ± درصد است. برای مقدار اتلاف انرژی روی هرپله و با توجه به ۱۲۰ دادهی شکل بالا، رابطهای زیر با مقدار ضریب همبستگی ۹۷/۸۱ درصد ارائه شد.

$$E_{\rm L} = -0/9128 \left(\frac{\rm h}{\rm H_s}\right)^2 + 0/2594 \frac{\rm h}{\rm H_s} \tag{14}$$

+ 0/6885

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., Pirotton, 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