

Experimental Study of the Effect of Parapet Wall Location on the Performance of Trapezoidal Labyrinth and Piano-Key Weirs

MARZIEH HAMIDINIA¹, MOHAMMAD HEIDARNEJAD^{*2}, MOHAMMAD HOSSEIN PURMOHAMMADI³, ALIREZA MASJEDI⁴, AMIN BORDBAR⁵

1. Ph.D. Student, Department of Water Science Engineering, Khuzestan Science and Research Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran and Department of Water Science Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

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

3. Assistant Professor, Department of Water Science Engineering, Shoushtar Branch, Islamic Azad University, Shoushtar, Iran.

4. Associate Professor, Department of Water Science Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

5. Assistant Professor, Department of Water Science Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

(Received: Nov. 2, 2018- Revised: Dec. 27, 2018- Accepted: Dec. 30, 2018)

ABSTRACT

Nonlinear weirs have relatively high discharge capacities in low hydraulic loads and their performance is reduced due to submergence of the outlet key in high hydraulic loads. Labyrinth weirs are hydraulic structures used for water level adjustment and flow control in reservoirs. The labyrinth weirs performance is not satisfactory in high hydraulic loads due to interference of flow blades, turbulence and submergence in the outlet key. Therefore, the purpose of this study was to investigate the effect of parapet wall location on weir inlet submergence. Thus, the inclined parapet walls were used on trapezoidal labyrinth and piano-key weirs, which had 60 and 30 cm length ($B = 60$ and 30 cm) with 1 and 0.5 in slope ($B' = 1$ and 0.5). The results showed increasing the parapet wall heights and lengths leads to a 50-percent decrease in the discharge coefficient. The weirs performance also increases by 33 percent as the flow rate increases. The installation of parapet walls on the labyrinth weirs showed better performance (up to 30%) as compared to the piano-key weirs with the same plan. Also the installation of parapet walls at the weir outlet showed a better performance (5-10%) as installed at the weir inlet. It was found that the flow rate is directly related to the discharge coefficient; hence, the efficiency drop is reduced about 40% in high discharge rates by setting the parapet walls at labyrinth and piano-key weirs.

Keywords: Piano-key weir, labyrinth weir, parapet wall, inlet submergence, discharge coefficient, hydraulic performance

بررسی آزمایشگاهی تأثیر محل قرارگیری دیواره سپری بر عملکرد سرریز زیگزاگی و کلید پیانویی با مقطع دوزنقه‌ای

مرضیه حمیدی نیا^۱، محمدحیدر نژاد^۲، محمدحسین پورمحمدی^۳، علیرضا مسجدی^۴، امین بردبار^۵

۱. دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، پردیس علوم و تحقیقات خوزستان، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران و

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

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

۳. استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران.

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

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

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۸/۱۱ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۱۰/۶ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۱۰/۹)

چکیده

سرریزهای غیر خطی در بارهای آبی کم، ظرفیت تخلیه نسبتاً بالایی داشته و در بارهای آبی زیاد به دلیل استغراق در کلید خروجی سرریز، راندمان آن‌ها کاهش می‌یابد. سرریزهای زیگزاگی از جمله سازه‌های هیدرولیکی است که برای تنظیم سطح آب و کنترل جریان در مخازن سدها استفاده می‌شوند. عملکرد سرریزهای زیگزاگی در بارهای زیاد جریان، به دلیل تداخل تیغه‌های جریان، تلاطم و استغراق در کلید خروجی، مطلوب نمی‌باشد؛ از این رو، هدف این پژوهش بررسی اثر محل قرارگیری دیواره سپری بر استغراق ورودی سرریز است که برای این منظور از دیواره‌های سپری شیب‌دار با شیب‌های ($B'=1$ و $B'=0.5$) و طول‌های ($B=30$ cm و $B=60$ cm) بر روی دو مدل سرریز زیگزاگی و کلید پیانویی با مقطع دوزنقه‌ای استفاده شد. نتایج نشان داد که افزایش ارتفاع و طول دیواره‌های سپری باعث کاهش ۵۰ درصدی ضریب آگذری می‌گردد و راندمان سرریزها با افزایش دبی جریان به میزان ۳۳ درصد افزایش می‌یابد. وجود این سپرها در سرریز زیگزاگی نسبت به کلید پیانویی با پلان مشابه، تا ۳۰ درصد عملکرد بهتری را نشان داد. این تحقیق نشان داد که دیواره‌های سپری نصب شده در خروجی سرریز حدود ۵ الی ۱۰ درصد عملکرد بهتری نسبت به حالت نصب در ورودی از خود نشان می‌دهند، همچنین نتایج حاصله نشان می‌دهد سرعت جریان با ضریب آگذری رابطه مستقیم دارد از این رو افزودن دیواره سپری به سرریزهای زیگزاگی و کلید پیانویی مشکل افت راندمان در دبی‌های بالا برای این سرریزها را به میزان ۴۰ درصد مرتفع می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: سرریز کلید پیانویی، سرریز زیگزاگی، دیواره‌ی سپری، استغراق ورودی، ضریب دبی، عملکرد هیدرولیکی.

مقدمه

سطح افقی، سرریز از دیواره‌های چسبیده به هم تشکیل شده و هندسه مثلثی، دوزنقه‌ای، مستطیلی و قوسی با تناوب در عرض جریان، تکرار می‌شود (شکل ۱- الف).

فرضیه اصلی در طرح زیگزاگی سرریزها، افزایش ظرفیت انتقال جریان روی سرریز با تاج ثابت و به ازای ارتفاع معین سطح آب در بالادست سرریز است (Lux and Hinchliff, 1985). جهت محاسبه ظرفیت تخلیه سرریزها از رابطه (۱) استفاده می‌شود (Anderson and Tullis, 2013).

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

در رابطه (۱) به ترتیب، Q دبی مؤثر، C_d ضریب دبی جریان، g شتاب ثقل، L طول تاج توسعه یافته و H_t بار کل (مجموع بار سرعت و بار هیدرواستاتیکی) بر روی سرریز می-

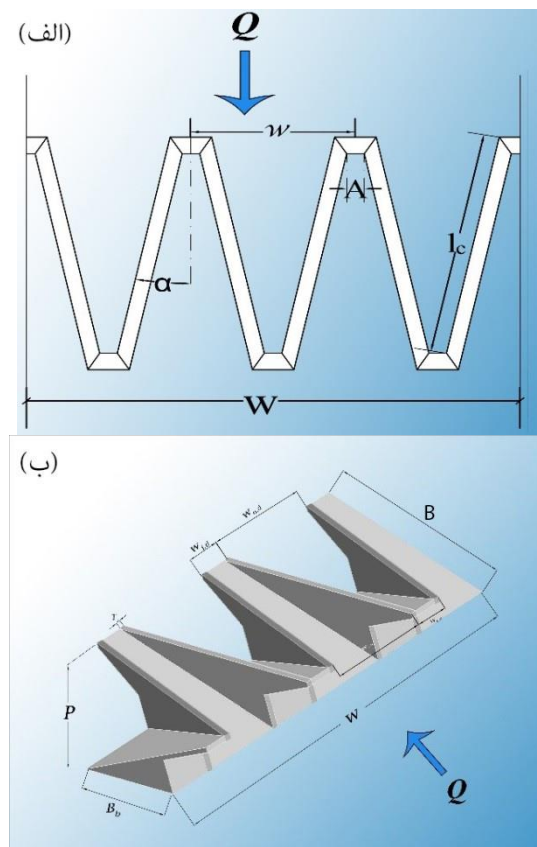
با افزایش روزافزون تقاضا برای ذخیره آب در سال‌های اخیر نیاز به ساخت سازه‌هایی همچون سدها بیشتر شده است که این امر احتمال وقوع سیل با حجم‌های بزرگ‌تر را بیشتر می‌کند (Anderson and Tullis, 2013). به همین منظور جهت افزایش ایمنی سدها نیاز به ساخت سازه‌های سرریز با راندمان بالاتر، بیشتر احساس می‌شود (Gonzalez and Chanson, 1995). سرریزهای زیگزاگی از جمله سازه‌های هیدرولیکی هستند که برای تنظیم سطح آب و کنترل جریان در مخازن سدها استفاده می‌شوند. محور تاج این نوع سرریز، غیر مستقیم است و در نمای

برخلاف سرریزهای زیگزاگی، دهانه‌ها یک در میان شیب‌دار به سمت داخل مخزن و بیرون بوده و اجرای این نوع سرریزها نسبت به سرریزهای زیگزاگی فضای کمتری نیاز داشته و لذا فونداسیون این نوع سرریزها می‌تواند ابعاد کوچک‌تری داشته باشد به نحوی که این مزیت باعث شده است تا بتوان از این نوع سرریز در تاج سدهای بتنی نیز استفاده نمود (Lempérière, 2017).

Machiels *et al.* (2013) با بررسی اثر دیواره سپری با ثابت نگه‌داشتن ارتفاع سرریز، نقش اصلی دیواره سپری را افزایش ارتفاع کل سرریز بیان نمودند. Javaheri and Kabiri Samani (2011) با بررسی تأثیر پارامترهای هندسی مختلف رابطه‌ای جهت برآورد ضریب دبی در حالت جریان آزاد ارائه دادند. Afzalian and Ahadian (2015a,b) با بررسی اثر دیواره-ی سپری شیب‌دار بر راندمان سرریز کلید پیانویی در جهت جریان و در خلاف آن، بیان نمودند که استفاده از دیواره سپری شیب‌دار منجر به افزایش تراز آبی بالادست می‌گردد و همچنین با بررسی اثر شکل پایه‌های مختلف اعم از مثلثی، تخت و نیم‌دایره بر عملکرد سرریز کلید پیانویی بیان نمودند که پایه مثلثی بیشترین راندمان را در میان پایه‌های بررسی شده از خود نشان می‌دهد. در همین خصوص در این تحقیق سعی گردید با ساخت مدل آزمایشگاهی، ضریب دبی و سایر پارامترهای هیدرولیکی بین سرریز کلید پیانویی و سرریز زیگزاگی در حضور دیواره سپری و با مقطع دوزنقه‌ای شکل با هم مقایسه شوند. تحقیقاتی که صورت گرفته نشان می‌دهد که مناسب‌ترین روش مطالعات و ارزیابی سرریزهای زیگزاگی، ساخت مدل فیزیکی در مقیاس مناسب، با استقرار حداقل یک سیکل از سرریز در فلوام آزمایشگاهی تحت شرایط جریان زیر بحرانی است. در این صورت، نتایج به دست آمده می‌تواند از دقت کافی برخوردار بوده و در مراحل طراحی مقدماتی مورد استفاده قرار گیرد. بدیهی است برای طرح نهائی، لازم است که مدل فیزیکی بر اساس نتایج طرح مقدماتی ساخته و مورد ارزیابی دقیق قرار گیرد (Lux, 1993). انتخاب صحیح زاویه دیواره جانبی (α) (شکل ۱) تأثیری روی هزینه‌های ساختمانی ندارد و در طراحی لازم است برای نیل به حداکثر کارائی هیدرولیکی، بزرگ‌ترین مقدار را برای زاویه (α) در نظر گرفت. اگر بنا به دلایلی شکل مثلثی در پلان مورد قبول نباشد، یک سرریز زیگزاگی با پلان دوزنقه‌ای که در آن $a/w = 0.756$ یا $\alpha = 0.756 \alpha_{max}$ باشد، توصیه می‌گردد (Hay and Taylor, 1970).

Tullis *et al.* (1995) با انجام آزمایش‌هایی دریافتند که با افزایش بار هیدرولیکی (h) میزان ضریب دبی جریان (C_d) افزایش می‌یابد و بهترین کارکرد سرریزهای زیگزاگی در بارهای

باشد. با توجه به معادله بالا، افزایش دبی مؤثر (Q) در یک سرریز می‌تواند به سه روش، افزایش عرض سرریز، کاهش ارتفاع تاج سرریز یا افزایش طول L با فونداسیون سرریز موجود، یا با جایگزینی سرریز فعلی با یک سرریز غیر خطی (نوع زیگزاگی) صورت پذیرد (Babb, 1976). افزایش طول L سرریز خطی و به تبع آن عرض آبراهه تخلیه، اغلب به دلیل هندسه سد و یا دلایل اقتصادی غیر عملی می‌باشد. علاوه بر این کاهش ارتفاع تاج، باعث کاهش ارتفاع نرمال مخزن پشت سد و کاهش مقدار آب ذخیره در دسترس می‌شود (Kabiri-Samani, 2010). با توجه به مطالب بالا استفاده از سرریزهای غیرخطی به عنوان یک گزینه متداول و مناسب مورد پذیرش واقع می‌شود. همچنین سرریزهای زیگزاگی نوع کلید پیانویی به عنوان گزینه‌ای مناسب برای اصلاح سرریزهایی که برای عبور دبی حداکثر محتمل با مشکل روبرو هستند (شکل ۱-ب)، مطرح می‌شوند (Lempérière and Ouamane, 2003).



شکل ۱. نمای شماتیک سرریزها، الف) سرریز زیگزاگی دوزنقه‌ای، ب) سرریز کلید پیانویی با مقطع دوزنقه‌ای

سرریزهای کلید پیانویی دارای تاج غیر خطی بوده و در یک عرض معین نسبت به سرریزهای با تاج مستقیم در یک ارتفاع مشابه، دبی عبوری بیشتری را سبب می‌شوند (Lempérière and Ouamane, 2003). در این نوع از سرریزها،

می‌تواند اثر مثبتی در عملکرد سرریز کلید پیاپویی داشته باشد؛ لذا، در این تحقیق به بررسی اثر محل قرارگیری دیواره‌ی سپری شیب‌دار بر روی سرریزهای کلید پیاپویی و زیگزاگی پرداخته شده است. در این بخش تحلیل ابعادی و تجهیزات آزمایشگاهی ارائه می‌شود.

آنالیز ابعادی

پارامترهای تأثیرگذار بر روی راندمان سرریز در رابطه ۲ نشان داده شده است:

(رابطه ۲)

$F = (W_i, W_o, W_u, W, B, B_i, B_o, B', L, R, P, S, N, H, V, Q, g, \mu, \rho, \sigma) = 0$
در رابطه ۲، W_i عرض کلید ورودی، W_o عرض کلید خروجی، $W_u = [W_i + W_o + 2T_s]$ عرض یک سیکل W ، B عرض فلوم، B_i طول بالادست تا پایین دست سرریز، B_o طول شیروانی پایین دست، L طول سرریز، R ارتفاع دیواره سپری، P ارتفاع سرریز، S شیب دیواره سپری روی تاج جانبی، N تعداد سیکل می‌باشد. پارامترهای مربوط به خصوصیات جریان و سیال نیز شامل، H ارتفاع آب روی سرریز، μ لزجت دینامیکی، σ کشش سطحی، ρ جرم واحد حجم آب، g شتاب ثقل، Q دبی جریان و V سرعت جریان در بالادست می‌باشد.
با استفاده از تکنیک Π باکینگهام پارامترهای بدون بعد زیر به دست آمد (رابطه ۳):

(رابطه ۳)

$f = \left(\frac{W_i}{W_o}, \frac{L}{W}, \frac{H}{W_u}, \frac{P}{W_u}, \frac{B_i}{B_o}, \frac{H_i}{P}, \frac{H}{R}, \frac{P}{L}, \frac{R}{B}, \frac{L}{B}, N, S, \frac{Q}{\sqrt{2g}LH^{1.5}}, \frac{\sigma}{\rho V^2 H}, \frac{\rho V H}{\mu}, \frac{V}{\sqrt{gH}} \right) = 0$
در رابطه ۳، S نسبت R/B بوده و نسبت‌های $\frac{Q}{\sqrt{2g}LH^{1.5}}$ ، $\frac{\sigma}{\rho V^2 H}$ ، $\frac{\rho V H}{\mu}$ ، $\frac{V}{\sqrt{gH}}$ به ترتیب عدد فرود (Fr)، عدد رینولدز (Re)، عدد وبر (We) و ضریب تخلیه (Cd) می‌باشند. با توجه به اینکه کمترین مقدار عدد رینولدز در این پژوهش ۳۵۰۰ می‌باشد از بررسی تأثیر عدد رینولدز صرف‌نظر می‌شود. همچنین با توجه به ثابت بودن هندسه سرریز، رابطه‌ی نهایی پارامترهای بدون بعد مؤثر بر ضریب تخلیه در این تحقیق به صورت معادله (۴) خواهد بود:

(رابطه ۴) $C_d = f\left(\frac{H_t}{P}, \frac{H}{R}, \frac{P}{W_u}, S, We, Fr\right)$

لازم به ذکر است که عدد فرود بالادست سرریز در همه مدل‌های آزمایش شده کمتر از یک بوده است که شرایط جریان زیر بحرانی را در بالادست سرریز ایجاد می‌نمود.

تجهیزات آزمایشگاهی

جهت انجام آزمایش‌ها، یک مدل فیزیکی به همراه تجهیزات مربوطه مهیا گردید. آزمایش‌های این مطالعه در فلوم آزمایشگاهی واقع در سازمان آب و برق خوزستان- ایران به طول ۷ متر و عرض و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر انجام گردید. اسکلت بدنه-

هیدرولیکی نسبتاً کم می‌باشد. Lempérière and Ouamane (2003) با بررسی دو مدل تیپ‌های A و B (مدل A دارای طاق ولی مدل B فاقد طاق و دارای شیب طولانی‌تری نسبت به مدل A داشت) سرریز کلید پیاپویی به ازای P (ارتفاع سرریز) و N (تعداد سیکل‌های سرریز) یکسان، راندمان تیپ B را ۱۰ درصد بیشتر از تیپ A گزارش نمودند. Lempérière and Jun (2005) با بررسی تیپ A به این نتیجه رسیدند که تعداد سیکل (N) باید بین چهار تا شش باشد و همچنین نسبت W_i/W_o را نیز برای حالت بهینه برابر دو و مینیمم شیب را نیز ۲:۱ پیشنهاد کردند. Barcouda et al. (2006) با بررسی تیپ‌های A و B سرریز کلید پیاپویی بیان نمودند که افزایش شیب کلیدها از ۲:۱ به ۳:۲، موجب افزایش ۲۰ درصدی در بازدهی تخلیه می‌شود و مقدار بهینه‌ی N را برابر شش و نسبت بهینه‌ی W_i/W_o را نیز ۱/۲ پیشنهاد نمودند. همچنین نصب دماغه در زیر شیروانی بالادست و بهبود شکل تاج را در افزایش بازدهی سرریز، مؤثر بیان نمودند.

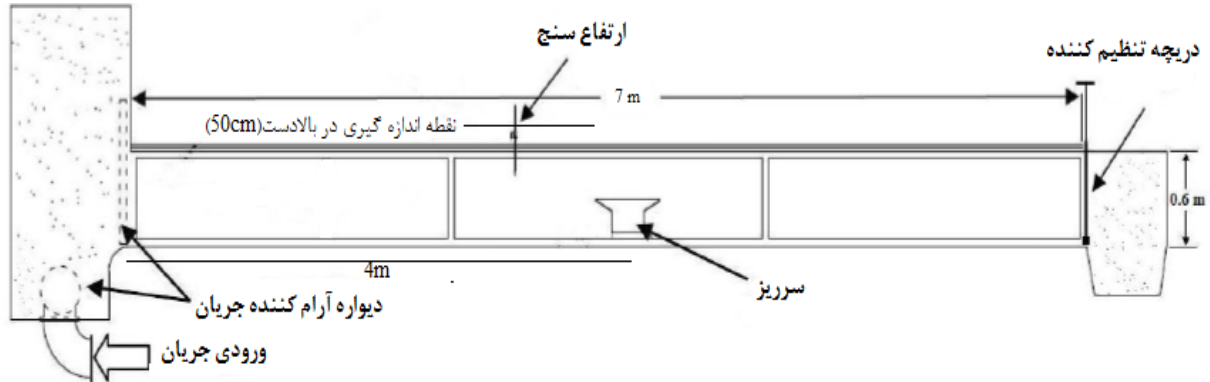
Anderson and Tullis (2013) با بررسی هندسه‌های مختلف سرریزهای کلید پیاپویی، اثر مثبت نصب دماغه‌ها در زیر شیروانی بالادست، بالا بردن ارتفاع تاج با استفاده از دیواره‌ی سپری، بهبود شکل تاج (نیم‌دایره)، بر راندمان سرریز کلید پیاپویی را تأیید نمودند. همچنین با بررسی هندسه‌های مختلف سرریز کلید پیاپویی به این نتیجه رسیدند که ضریب دبی سرریز با افزایش نسبت W_i/W_o افزایش می‌یابد و محدوده‌ی بهینه‌ی آن را بین ۱/۲۵ الی ۱/۵ پیشنهاد نمودند. همچنین بیان نمودند شیروانی‌های بالادست و پایین‌دست به افزایش راندمان تخلیه کمک می‌کند و نصب دماغه جهت افزایش راندمان مؤثر می‌باشد. سرریزهای غیرخطی از جمله سرریز زیگزاگی و نیز سرریز کلید پیاپویی از جدیدترین نوع سرریزها می‌باشند که استفاده از آن‌ها در سال‌های اخیر متداول شده است. بیشتر تحقیقات بر روی ابعاد بهینه این نوع سرریزها در حالت‌های مستطیلی می‌باشد اما تحقیقات کامل و همه‌جانبه بر روی راه‌های جدید افزایش طول مؤثر بدون تغییر در ابعاد بهینه در ساختار سرریزهای کلید پیاپویی و زیگزاگی صورت نگرفته است؛ از این‌رو، در تحقیق حاضر تلاش می‌شود با نصب دیواره‌های سپری بر روی سرریزهای مورد آزمایش، راندمان این سرریزها با همدیگر سنجیده شده و جهت تخلیه بهتر جریان آب از روی سرریز به بهترین راه‌حل دست یافت.

مواد و روش‌ها

با توجه به آنچه که در بخش مقدمه اشاره شد، دیواره سپری

می‌باشد. مدل‌ها نیز از جنس پلاکسی گلاس با ضخامت ۵ میلی‌متر ساخته شده‌اند.

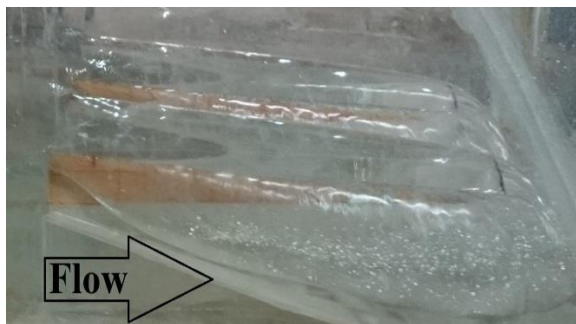
ی فلوم فلزی، دیواره‌های آن از جنس پلاکسی گلاس، کف فلوم فولاد ضد زنگ و شیب کف فلوم صفر درجه می‌باشد (شکل ۲). محدوده تغییرات دبی در ۱۰ جریان بین ۱ تا ۵۰ لیتر بر ثانیه



شکل ۲. فلوم آزمایشگاهی

آزمایش سرریز کلید پیانویی با مقطع دوزنقه‌ای بدون دیواره سپری و سرریز زیگزاگی با مقطع دوزنقه‌ای بدون دیواره سپری (مدل‌های شاهد) آزمایش‌هایی برای بررسی اثر ارتفاع دیواره سپری (بال‌ها) روی تاج‌های جانبی سرریز کلید پیانویی و زیگزاگی با مقطع دوزنقه‌ای. آزمایش‌هایی برای بررسی تأثیر محل قرارگیری (ورودی و خروجی سرریز) دیواره‌های سپری بر روی سرریز کلید پیانویی و زیگزاگی با مقطع دوزنقه‌ای (شکل ۳).

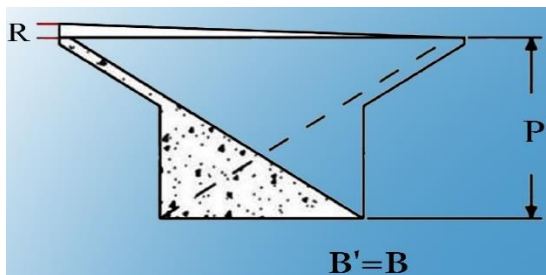
دبی این آزمایش‌ها از طریق مخزن آزمایشگاه توسط دو پمپ سانتریفیوژ به یک ارتفاع تانک وارد و سپس دبی فلوم از ارتفاع تانک تأمین می‌گردد. در قسمت ورودی فلوم، مستهلک کننده‌هایی از جنس فوم برای آرام‌تر شدن جریان ورودی به سرریز استفاده می‌شود و مقدار دبی با استفاده از سرریز مثلثی کالیبره شده و مانومتري که در انتهای فلوم نصب گردیده، اندازه‌گیری شد. به منظور قرائت ارتفاع سطح آب در قسمت‌های مورد نیاز از عمق‌یاب مستقر روی فلوم استفاده گردید. به منظور نیل به اهداف تحقیق حاضر، متغیرها و مدل‌های آزمایشگاهی به شکل زیر بررسی شدند:



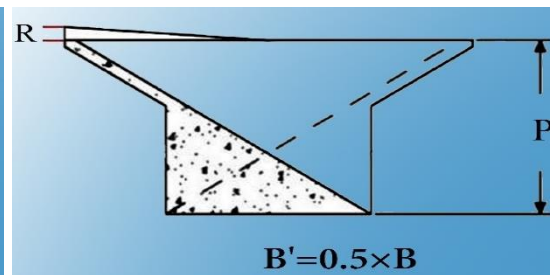
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۳. نحوه قرارگیری دیواره سپری روی سرریز: (الف) نصب در خروجی سرریز، (ب) نصب در ورودی سرریز (ج) شماتیک سرریز کلید پیانویی در حضور دیواره سپری با $(B/B=1/2)$ ، (د) شماتیک سرریز کلید پیانویی در حضور دیواره سپری با $(B/B=1)$

نحوه انجام آزمایش‌ها

با توجه به مطالعات (Machiels et al., 2012)، در پژوهش حاضر و به لحاظ نسبت بهینه اقتصادی W_i/W_o برابر با ۳ و نسبت بهینه هیدرولیکی و اقتصادی P/W_u برابر با ۰/۵ می‌باشد. با توجه به محدودیت آزمایشگاهی و در نظر گرفتن عرض کل سرریز برابر با ۶۰ سانتی‌متر، سرریز کلید پیانویی با ۳/۵ سیکل طراحی و ساخته شد. در هر آزمایش، پس از استقرار مدل‌های آزمایشی دیواره‌ی سپری بر روی تاج سرریز، 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 عمق سنج

نقطه‌ای با دقت $\pm 0/5$ میلی‌متر و دبی جریان توسط یک سرریز مثلثی واسنجی شده مستقر در انتهای فلوم با دقت ± 1 لیتر بر ثانیه تعیین گردید. به منظور آرام نمودن جریان بالادست سرریز و کاهش نوسانات سطح آب، در ورودی فلوم از شبکه مشبک و صفحات آرام کننده جریان استفاده گردید. در مجموع با به کارگیری ۳ ارتفاع دیواره سپری (۲، ۴ و ۶ سانتی‌متر) در دو مدل سرریز کلید پیانویی و زیگزاگی با پلان دوزنقه‌ای با نسبت R/P ۰/۱۳، ۰/۲۶ و ۰/۴ انجام شد که در مجموع ۲۶۰ آزمایش صورت گرفت، در جدول (۱) می‌توان آزمایش‌های انجام شده را مشاهده نمود.

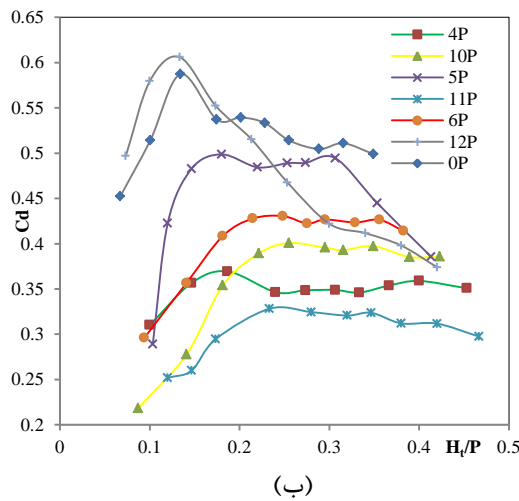
جدول ۱. متغیرها در آزمایش‌های انجام شده

نحوه قرارگیری سرریز	دبی جریان (m^3/s)	مدل سرریز	R/B'	نوع سپری (cm)	کد آزمایش
ورودی	۰/۰۰۱-۰/۰۵	کلید پیانویی	۰/۱	$R=6\text{ cm}, B'=60\text{ cm}$	1P
ورودی	۰/۰۰۱-۰/۰۵	کلید پیانویی	۰/۰۶	$R=4\text{ cm}, B'=60\text{ cm}$	2P
ورودی	۰/۰۰۱-۰/۰۵	کلید پیانویی	۰/۰۳	$R=2\text{ cm}, B'=60\text{ cm}$	3P
ورودی	۰/۰۰۱-۰/۰۵	کلید پیانویی	۰/۲	$R=6\text{ cm}, B'=30\text{ cm}$	4P
ورودی	۰/۰۰۱-۰/۰۵	کلید پیانویی	۰/۱۳	$R=4\text{ cm}, B'=30\text{ cm}$	5P
ورودی	۰/۰۰۱-۰/۰۵	کلید پیانویی	۰/۰۶	$R=2\text{ cm}, B'=30\text{ cm}$	6P
خروجی	۰/۰۰۱-۰/۰۵	کلید پیانویی	۰/۱	$R=6\text{ cm}, B'=60\text{ cm}$	7P
خروجی	۰/۰۰۱-۰/۰۵	کلید پیانویی	۰/۰۶	$R=4\text{ cm}, B'=60\text{ cm}$	8P
خروجی	۰/۰۰۱-۰/۰۵	کلید پیانویی	۰/۰۳	$R=2\text{ cm}, B'=60\text{ cm}$	9P
خروجی	۰/۰۰۱-۰/۰۵	کلید پیانویی	۰/۲	$R=6\text{ cm}, B'=30\text{ cm}$	10P
خروجی	۰/۰۰۱-۰/۰۵	کلید پیانویی	۰/۱۳	$R=4\text{ cm}, B'=30\text{ cm}$	11P
خروجی	۰/۰۰۱-۰/۰۵	کلید پیانویی	۰/۰۶	$R=2\text{ cm}, B'=30\text{ cm}$	12P
-	۰/۰۰۱-۰/۰۵	کلید پیانویی	۰	$R=0\text{ cm}, B'=0\text{ cm}$	P0
ورودی	۰/۰۰۱-۰/۰۵	زیگزاگی	۰/۱	$R=6\text{ cm}, B'=60\text{ cm}$	1T
ورودی	۰/۰۰۱-۰/۰۵	زیگزاگی	۰/۰۶	$R=4\text{ cm}, B'=60\text{ cm}$	2T
ورودی	۰/۰۰۱-۰/۰۵	زیگزاگی	۰/۰۳	$R=2\text{ cm}, B'=60\text{ cm}$	3T
ورودی	۰/۰۰۱-۰/۰۵	زیگزاگی	۰/۲	$R=6\text{ cm}, B'=30\text{ cm}$	4T
ورودی	۰/۰۰۱-۰/۰۵	زیگزاگی	۰/۱۳	$R=4\text{ cm}, B'=30\text{ cm}$	5T
ورودی	۰/۰۰۱-۰/۰۵	زیگزاگی	۰/۰۶	$R=2\text{ cm}, B'=30\text{ cm}$	6T
خروجی	۰/۰۰۱-۰/۰۵	زیگزاگی	۰/۱	$R=6\text{ cm}, B'=60\text{ cm}$	7T
خروجی	۰/۰۰۱-۰/۰۵	زیگزاگی	۰/۰۶	$R=4\text{ cm}, B'=60\text{ cm}$	8T
خروجی	۰/۰۰۱-۰/۰۵	زیگزاگی	۰/۰۳	$R=2\text{ cm}, B'=60\text{ cm}$	9T
خروجی	۰/۰۰۱-۰/۰۵	زیگزاگی	۰/۲	$R=6\text{ cm}, B'=30\text{ cm}$	10T
خروجی	۰/۰۰۱-۰/۰۵	زیگزاگی	۰/۱۳	$R=4\text{ cm}, B'=30\text{ cm}$	11T
خروجی	۰/۰۰۱-۰/۰۵	زیگزاگی	۰/۰۶	$R=2\text{ cm}, B'=30\text{ cm}$	12T
-	۰/۰۰۱-۰/۰۵	زیگزاگی	۰	$R=0\text{ cm}, B'=0\text{ cm}$	T0

۲۶۰ آزمایش انجام گردید و نتایج این آزمایش‌ها در سه بخش مورد بررسی قرار گرفت. در طول این بخش ابتدا تأثیر دیواره‌های سپری بر بازدهی هیدرولیکی سرریز کلید پیانویی و سرریز زیگزاگی با مقطع دوزنقه‌ای ارزیابی و با هم مقایسه می‌شوند.

تأثیر دیواره‌ی سپری بر عملکرد سرریزهای کلید پیانویی و زیگزاگی دوزنقه‌ای:

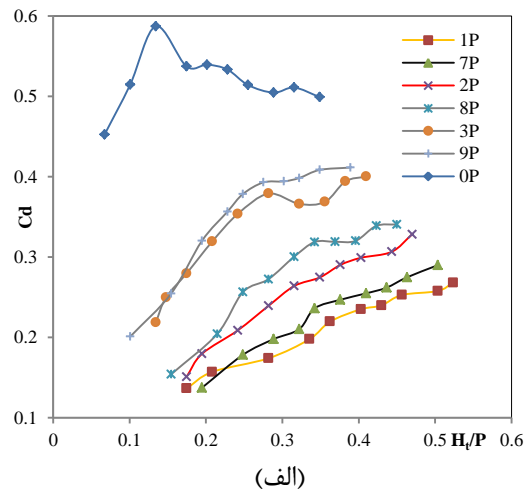
به منظور تجزیه و تحلیل ظرفیت تخلیه سرریزها، از رابطه‌ی (۱) که در مقدمه توضیح داده شده است، استفاده شد.



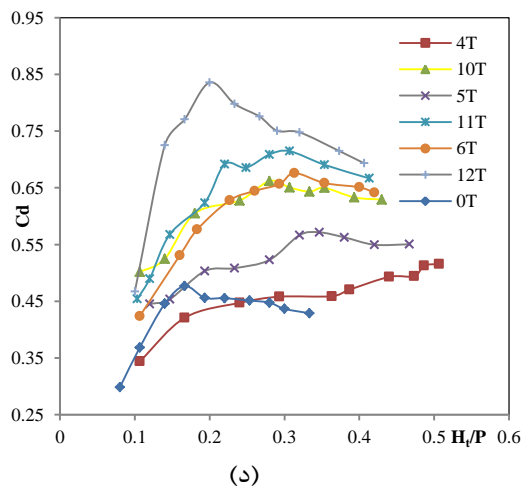
(ب)

نتایج و بحث

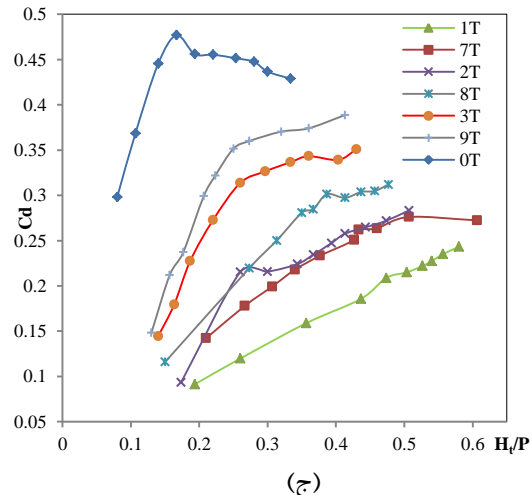
عملکرد سرریزهای کلید پیانویی در بارهای زیاد جریان، به دلیل تداخل تیغه‌های جریان، تلاطم و استغراق در کلید خروجی، مطلوب نمی‌باشد؛ لذا، در این پژوهش به بررسی تأثیر دیواره‌ی سپری شیب‌دار بر استغراق ورودی سرریز پرداخته شد. دیواره‌های سپری نصب شده دارای دو طول (۳۰ و ۶۰ سانتی‌متری)، سه ارتفاع (۲، ۴ و ۶ سانتی‌متری) و دو حالت نصب (نصب در خروجی و نیز نصب در ورودی سرریز) می‌باشد که در مجموع



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۴. بررسی تغییرات Cd به H_1/P : الف) سرریز کلید پیانویی در حضور دیواره سپری با $(B/B=1)$ ، ب) سرریز کلید پیانویی در حضور دیواره سپری با $(B/B=1/2)$ ، ج) سرریز زیگزاگی در حضور دیواره سپری با $(B/B=1)$ ، د) سرریز زیگزاگی در حضور دیواره سپری با $(B/B=1/2)$

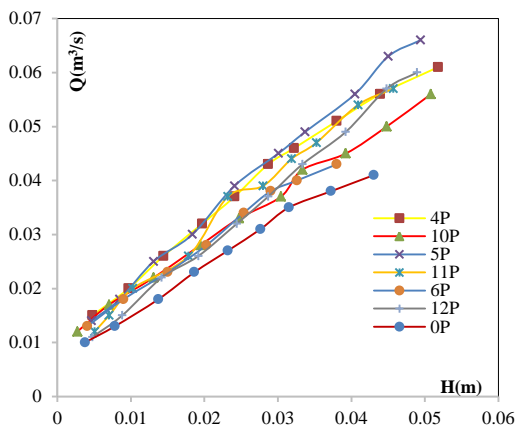
باعث افزایش ضریب آگذری (C_d) در سرریزها خواهد شد. نتایج نشان داد که ضریب آگذری حالت شاهد در سرریز زیگزاگی (مدل 0T) برابر با ۰/۴۵ است و بیشترین مقدار ضریب آگذری در ۲۶۰ آزمایش مدل 12T با ضریب آگذری (C_d) ۰/۸۵ و در جایگاه دوم مدل 12P با ضریب آگذری (C_d) ۰/۶۱ می‌باشد. در این شرایط مدل 12T حدود ۲۸/۲۳ درصد با مدل 12P اختلاف دارد، بنابراین تأثیر دیواره‌های سپری در سرریز زیگزاگی بهتر از

مطابق مطالعات (Machiels *et al.*, 2010) اثر اصلی دیواره سپری، افزایش ارتفاع ورودی و از این رو کاهش سرعت طولی ناشی از افزایش تخلیه جانبی می‌باشد. در شکل (۴) تأثیر دیواره‌های سپری نصب شده بر روی سرریزهای زیگزاگی و کلید پیانویی بررسی شده است. این شکل‌ها نشان می‌دهد که با افزایش طول دیواره‌های سپری مقدار ضریب آگذری (C_d) سرریز هم کمتر خواهد شد ولی کاهش ارتفاع دیواره سپری

گرفت این نتیجه حاصل شد که دیواره‌های سپری نصب شده در خروجی سرریز تأثیری حدود ۵ الی ۱۰ درصدی نسبت به دیواره‌های سپری نصب شده در ورودی از خود نشان می‌دهند. همچنین دیواره سپری ($B/B=1/2$) نصب شده در خروجی سرریز زیگزگی دوزنقه‌ای باعث افزایش راندمان تا ۸۵ درصد شد.

منحنی‌های دبی- بار آبی:

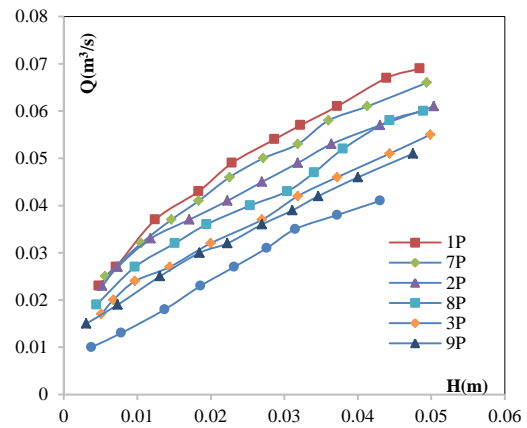
در این بخش به بررسی تأثیر دیواره‌های سپری بر دبی خروجی در یک بار آبی ثابت می‌پردازیم.



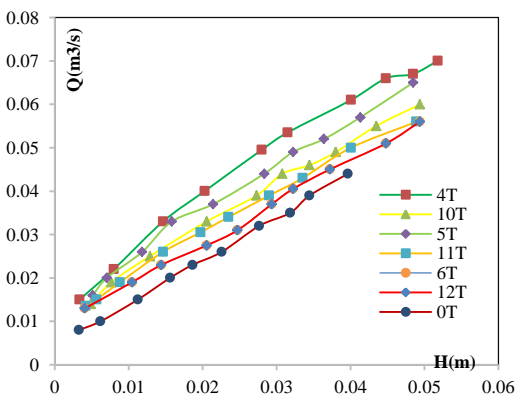
(ب)

سرریز کلید پیانویی می‌باشد. نحوه تغییرات ضریب دبی جریان در این شکل‌ها در همه‌ی موارد به صورت افزایشی است که این امر بسیار مهم بوده و به این معنی است که بر خلاف تحقیقات قبلی، در یک دبی خاص تغییرات ضریب دبی جریان به صورت وارونه می‌باشد. در این تحقیق با افزایش دبی جریان، خروجی هم افزایش یافته که این امر باعث کاهش هزینه‌های ساخت و ساز خواهد شد.

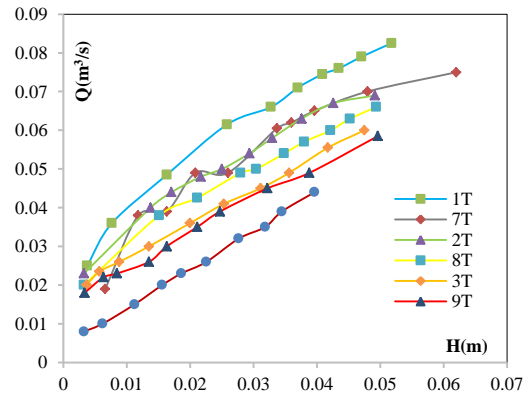
همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، نصب دیواره در خروجی سرریز تأثیر بهتری نسبت به ورودی دارد و باعث افزایش راندمان سرریزها می‌شود. در بررسی‌هایی که صورت



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۵. بررسی منحنی دبی- بار آبی؛ (الف) سرریز کلید پیانویی در حضور دیواره سپری با ($B/B=1$)، (ب) سرریز کلید پیانویی در حضور دیواره سپری با ($B/B=1/2$)، (ج) سرریز زیگزگی در حضور دیواره سپری با ($B/B=1$)، (د) سرریز زیگزگی در حضور دیواره سپری با ($B/B=1/2$)

باعث کاهش ۲۵ الی ۴۵ درصدی ارتفاع آب در بالادست سرریز یا افزایش سرعت تخلیه جریان می‌شوند. همچنین دیواره‌هایی که در ورودی نصب می‌شوند سرعت تخلیه بیشتری (ارتفاع بار آبی 0.15 متر) نسبت به حالت نصب در خروجی (ارتفاع بار آبی بیشتر از 0.2 متر) دارند.

در دبی جریان ثابت (0.4 مترمکعب بر ثانیه)، سرریز زیگزگی در مدل 1T بار آبی کمتر از 0.1 متر دارد و مقدار این پارامتر در مدل 1P بیشتر از 0.1 متر می‌باشد. اگر در شرایط

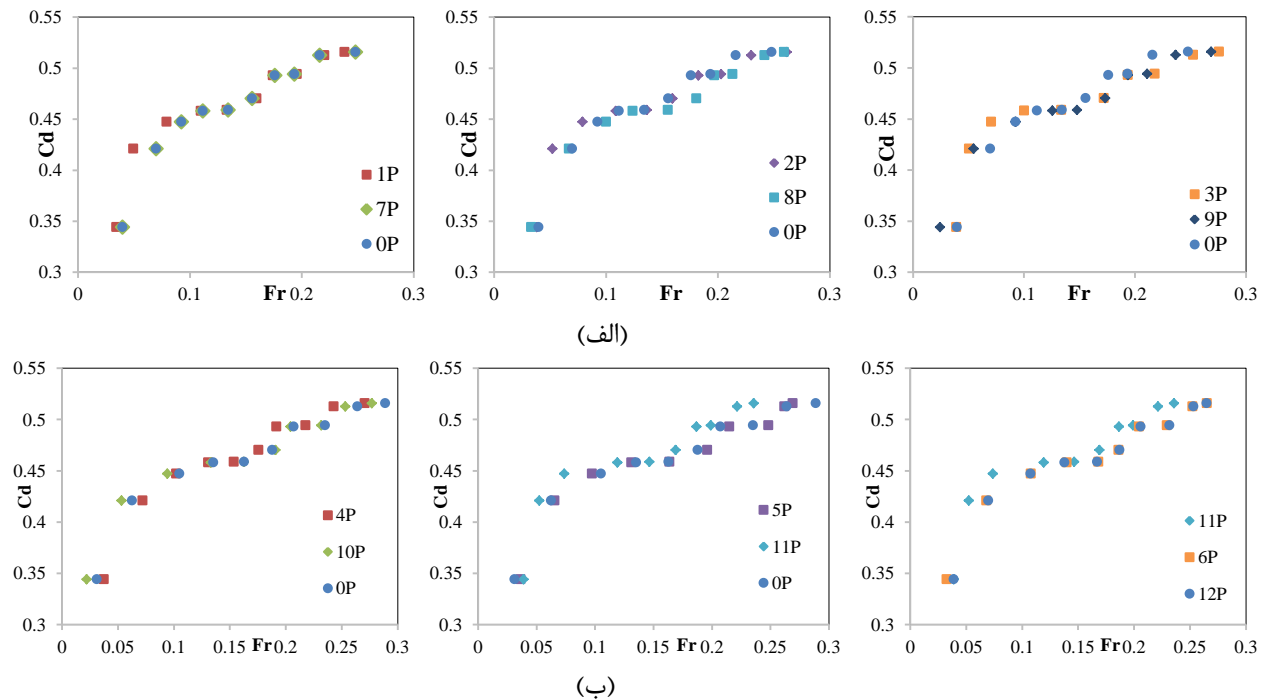
همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود در دبی جریان ثابت (0.4 مترمکعب بر ثانیه)، بیشترین بار آبی ایجاد شده (H) در هر چهار نمودار این شکل مربوط به مدل مشاهده‌ای (0P) و کمترین مقدار بار آبی (H)، متعلق به مدل 1T ($H=0.1$ m) می‌باشد؛ می‌توان به این نتیجه رسید که سرعت تخلیه در این حالت (1T) بیشتر از حالت مشاهده‌ای (0P) می‌باشد.

نمودارهای شکل (۵) نشان می‌دهد که دیواره‌های سپری

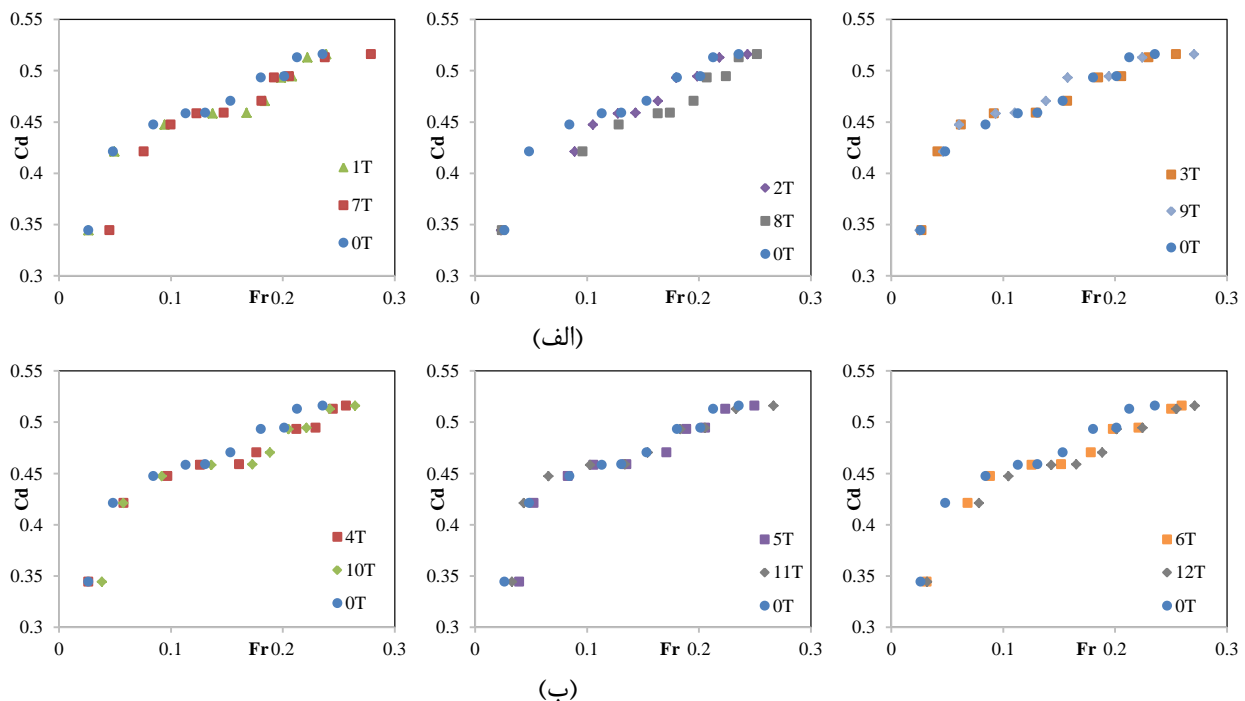
نمی‌باشد؛ بلکه، تابعی از سرعت در جهت ورودی است؛ پس می‌توان گفت که عدد فرود (سرعت جریان) بر ضریب دبی جریان تأثیرگذار می‌باشد. بر همین اساس در شکل‌های (۶) و (۷) تغییرات ضریب تخلیه (C_d) مدل‌های مورد آزمایش در حضور دیواره‌های سپری در مقابل عدد فرود (Fr) بالادست ترسیم گردیده است.

بهره‌برداری هدف ثابت نگه‌داشتن ارتفاع آب بالادست باشد سرریزهای با دیواره‌های شیب‌دار با ارتفاع بالا، توان خروج دبی بیشتری از خود نشان می‌دهند.

رابطه ضریب تخلیه (C_d) با عدد فرود (Fr) تحقیقات *Machiels et al. (2012)* نشان می‌دهد که تخلیه جانبی به طور مستقیم تابعی از ارتفاع آب بالای تاج جانبی



شکل ۶. تأثیر Fr بالادست بر C_d در سرریز کلید پیانویی در حضور دیواره سپری با الف: $(B/B=1)$. ب: $(B/B=1/2)$



شکل ۷. تأثیر Fr بالادست بر C_d در سرریز زیگزاگی در حضور دیواره سپری با الف: $(B/B=1)$. ب: $(B/B=1/2)$

در نهایت با استفاده از نرم افزار آماری SPSS رابطه‌ای برای محاسبه ضریب دبی ارائه شد.

$$C_d = \frac{0.26Fr^{0.28} \times 4(Ht/p)^8}{0.392S^{0.11}} \quad (\text{رابطه ۵})$$

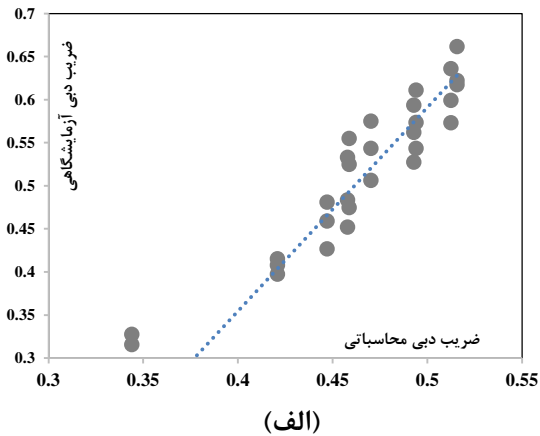
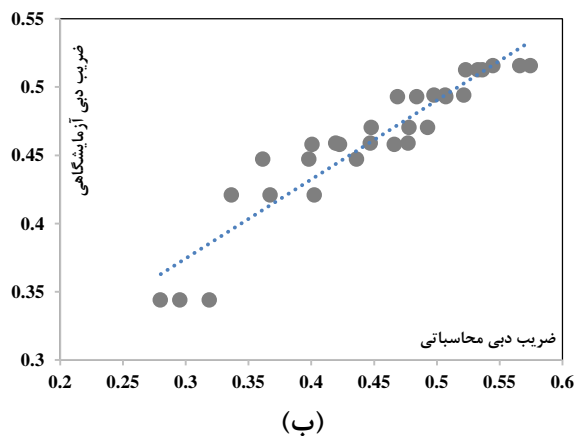
$(R^2 = 0.81)$

(رابطه ۶)

$$C_d = \frac{0.311Fr^{0.365} \times 0.185 \sqrt{Ht/p}}{0.435^{0.2}} \quad (\text{رابطه ۵})$$

$(R^2 = 0.8779)$

رابطه (۵) مربوط به سرریز کلید پیانویی و رابطه (۶) مربوط به سرریز زیگزاگی می‌باشد.



شکل ۸. مقایسه ضریب تخلیه محاسباتی و ضریب تخلیه آزمایشگاهی الف: سرریز کلید پیانویی ب: سرریز زیگزاگی

داده‌اند. همچنین نتایج حاصله نشان می‌دهد که راندمان با افزایش دبی جریان افزایش می‌یابد. وجود این دیواره‌ها در سرریز زیگزاگی مورد آزمایش نسبت به سرریز کلید پیانویی با پلان مشابه، عملکرد بهتری داشته است. بیشترین ضریب آبگذری (C_d) را سرریز زیگزاگی دوزنقه‌ای در حضور دیواره سپری به طول ۳۰ (B/B=1/2) و ارتفاع ۲ سانتی‌متر (مدل 12T) داشته که حدود ۰/۸۵ می‌باشد که این مقدار حدود ۰/۴ بیشتر از ضریب دبی حالت مشاهده‌ای (مدل 0T) است؛ این امر نشان دهنده راندمان بیشتر مدل 12T نسبت به حالت شاهد می‌باشد. همچنین سرعت جریان با ضریب دبی جریان رابطه مستقیم داشته است. دیواره‌های سپری باعث افزایش سرعت تخلیه جریان می‌شود که این امر باعث کاهش ارتفاع آب نسبت به حالت مشاهده‌ای شده است. این افزایش در راندمان تخلیه به دلیل افزایش حجم کلید خروجی و کاهش افت ورودی ناشی از استقرار دیواره سپری می‌باشد. بنابراین با افزودن دیواره سپری به سرریزهای زیگزاگی و کلید پیانویی مشکل افت راندمان در دبی‌های بالا برای این سرریزها مرتفع می‌گردد. در پایان هم

همان‌طور که در شکل‌های (۶) و (۷) مشخص است با افزایش سرعت جریان راندمان هم افزایش می‌یابد، اما نکته حائز اهمیت این است که افزایش راندمان در سرعت‌های بالا صورت گرفته در حالی که در تحقیقات قبلی بیشترین راندمان در سرعت‌های پایین اتفاق می‌افتاد که این نشان‌دهنده مثبت بودن تأثیر دیواره‌های سپری در دبی‌های بالا است که باعث می‌شود با افزایش دبی جریان راندمان هم افزایش یابد. بنابراین با افزودن دیواره سپری به سرریزهای زیگزاگی و کلید پیانویی مشکل افت راندمان در دبی‌های بالا برای این سرریزها مرتفع می‌گردد.

نتیجه‌گیری

سرریزهای کلید پیانویی سازه‌های نسبتاً جدیدی با عملکرد بالای هیدرولیکی در بارهای آبی کم می‌باشند. در این تحقیق اثر دیواره سپری شیب‌دار با دو طول مختلف (1 و B/B=) و سه ارتفاع (R = ۲ و ۴ و ۶ cm) و دو حالت نصب (نصب در ورودی و در خروجی سرریز) بر روی دو مدل سرریز کلید پیانویی و زیگزاگی با مقطع دوزنقه‌ای در ۱۰ دبی جریان که در مجموع ۲۶۰ آزمایش می‌باشد، مورد بررسی قرار گرفت. مطالعات و آزمایش‌های این تحقیق نشان داد که افزایش ارتفاع و طول دیواره‌های سپری باعث کاهش ضریب آبگذری می‌گردد، به نحوی که ضریب دبی در سرریز زیگزاگی با دیواره‌های سپری به طول ۶۰ سانتی‌متر (B/B=1) و ارتفاع ۶ سانتی‌متر (مدل 1T) در حدود ۰/۳۵ و نیز در سرریز کلید پیانویی با حالت مشابه (مدل IP) در حدود ۰/۴۵ کمتر از مدل شاهد (سرریزهای مورد آزمایش بدون دیواره سپری) می‌باشد که نشان‌دهنده راندمان کمتر نسبت به حالت شاهد است. اما دیواره‌های سپری نصب شده در خروجی ۴۷ درصد افزایش راندمان از خود نشان

خود لازم می‌دانند از سازمان آب و برق خوزستان به خاطر در اختیار قرار دادن تجهیزات آزمایشگاهی قدردانی نمایند. همچنین مقاله مزبور برگرفته از رساله دکتری مرضیه حمیدی‌نیا دانشجوی دوره دکتری سازه‌های آبی واحد علوم و تحقیقات خوزستان و واحد اهواز دانشگاه آزاد اسلامی می‌باشد.

REFERENCES

- Afzalian, A.R. and Ahadian, J. (2015a) Piano Key Weirs with Positive Parapet Wall. *Water and Soil Science*, 25 (4-2), 97-107. (In Farsi)
- Afzalian, A.R. and Ahadian, J. (2015b) Piano key weir with sloped parapet wall. *Journal of Irrigation Science and Engineering*, 38 (2), 92-102. (In Farsi)
- Anderson, R.M., Tullis, B.P. and ASCE, M. (2013) Piano Key Weir Hydraulics and Labyrinth Weir Comparison, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139 (3), 246-253.
- Babb, A. (1976) Hydraulic model study of the Boardman Reservoir Spillway. *R.L Albook Hydraulic Laboratory*, Washington State University, Pullman, Wash.
- Barcouda, M., Cazaillet, O., Cochet, P., Jones, B.A., Lacroix, S., Laugier, F., Odeyer, C. and Vingny, J.P. (2006) Cost-effective increase in storage and safety of most dams using fusegates or P. K. weirs. In: Proceedings of the *International Commission on Large Dams, 22nd ICOLD Congress*. Barcelona, Spain.
- Gonzalez, C.A. and Chanson, H. (1995) Hydraulic Design of Stepped Cascades, Channels, Weirs and Spillways, *Dam Engineering*, 17(4), 223-244.
- Hay, N. and Taylor, G. (1970) Performance and design of labyrinth weirs. *Journal of Hydraulic Division (ASCE)*, 96(2), 2337-2357.
- Javaheri, A. and Kabiri Samani, A.R. (2011) Determining the discharge coefficient of piano-key weirs in free flow. In: Proceedings of the *1th International Conference on Dams and Water Power Plants*, 9-20 Oct., Tehran, Iran. (In Farsi)
- Kabiri-Samani, A.R. (2010) Analytical approach for flow over an oblique weir. *Transaction, A: Civil Engineering, Scientia Iranica*. Sharif University of Technology, Tehran, Iran, 17(2): 107-117.
- Lempérière, F. (2017) Dams and Floods. *Journal of Engineering*, 3(1), 144-149.

رابطه‌ای جهت محاسبه ضریب دبی با استفاده از اعداد فرود، H_t/P و S ارائه شد.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از پایان‌نامه می‌باشد. نویسندگان مقاله بر

- Lempérière, F. and Jun, G. (2005) Low cost increase of dam's storage and flood mitigation: the piano keys weir. In: Proceedings of the *19th Congress of the International Commission on Irrigation and Drainage (ICID)*, Beijing, China.
- 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.
- Lux III, F.L. and Hinchcliff, D. (1985) Design and Construction of Labyrinth Spillways. In: Proceedings of the *15th International Congress on Large Dams, International Commission on Large Dams*, Paris, France, 4(15), 249-274.
- Lux, F. (1993) Design Methodologies for Labyrinth Weirs, In: Proceedings of the *Water Power and Dam Construction*, Nashville, Tenn, pp. 1379-1407.
- Machiels, O., Erpicum, S., Archambeau, P., Dewals, B. and Piroton, M. (2013) Parapet wall effect on piano key weir efficiency. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(6), 506-511.
- Machiels, O., Erpicum, S., Archambeau, P., Dewals, B.J. and Piroton, M. (2010) Experimental study of the hydraulic behavior of Piano Key Weirs. In: Proceedings of the *17th Congress of the Asia and Pacific Division of the International Association of Hydro-Environment Engineering and Research (IAHRAPD)*. 21-24 Feb. Auckland, New-Zealand.
- Machiels, O., Erpicum, S., Piroton, M., Dewals, B. and Archambeau, P. (2012) Experimental analysis of PKW hydraulic performance and geometric parameters optimum. In: Proceedings of *International Workshop on Piano Key Weir for In-stream Storage and Dam Safety*, May 30th - June 1st, New Delhi, India, pp. 97-114.
- Tullis, J.P., Amanian, N. and Waldron, D. (1995) Design of Labyrinth Spillways. *Journal of Hydraulic Engineering, (ASCE)*, 121 (3), 247.