

معرفی سرریز تاج دندانه‌ای و بررسی میزان ضریب تخلیه آن تحت شرایط جریان آزاد

بابک لشکرآرا^{۱*} و یاسرشیخی^۲

^{۱*} - نویسنده مسئول، استادیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول. Lashkarara@jstu.ac.ir

^۲ - دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول.

تاریخ پذیرش: ۹۵/۴/۲۶

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۰/۱۸

چکیده

سیلاب یک پدیده تصادفی است و ساخت سیستم تخلیه سیلاب موفق و اقتصادی در یک سد از درجه اهمیت بالایی برخوردار است. در سال‌های اخیر سرریزهای غیر خطی به‌عنوان یک راه حل برای کنترل سیلاب، طراحان و مهندسان وابسته به علوم آب را یاری نموده‌اند. در این پژوهش یک سرریز غیر خطی جدید تحت عنوان سرریز تاج دندانه‌ای معرفی شده است. به‌منظور بررسی خصوصیات هیدرولیکی این دسته از سرریزها تحت شرایط جریان آزاد، ضریب تخلیه‌ی آن تحت سناریوهای مختلف شکل هندسی سرریز مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفت. به‌منظور بررسی اثر شیب کف کلیدهای ورودی و خروجی بر میزان ضریب تخلیه جریان، شیب‌های ۱/۵ : ۱، ۱ : ۱ و ۱ : ۱/۵ (قائم : افق) در نظر گرفته شد. سپس در هر یک از سه مرحله تغییر در میزان شیب کف کلیدها، چهار نوع سرریز با طول تاج دو، چهار، شش و هشت سیکل طراحی، ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش شیب کف کلیدها (Z)، ضریب دبی تخلیه جریان افزایش می‌یابد، همچنین افزایش تعداد سیکل در بارهای آبی کم منجر به افزایش میزان ضریب تخلیه جریان می‌شود. در بارهای آبی زیاد خاصیت گرداب شکنی سرریزهای با تعداد سیکل کمتر قابل توجه می‌باشد. نتایج نشان داد که ضریب تخلیه جریان در سرریز تاج دندانه‌ای تا ۲/۲ برابر ضریب تخلیه سرریز مدور قائم با ورودی لبه تیز از خود افزایش نشان می‌دهد. برتری میزان ضریب تخلیه‌ی سرریز تاج دندانه‌ای در مقایسه با سرریزهای لبه تیز مدور با ابعاد مشابه، می‌تواند به‌عنوان یک مزیت مهم این دسته از سرریزهای غیرخطی برشمرده شود.

کلید واژه‌ها: تاج دندانه‌ای، کلید، انسداد، گرداب، ضریب تخلیه.

Introduce of Crown Wheel Spillway and Study of Its Discharge Coefficient under Free Flow Regime

B. Lashkar-Ara^{1*} and Y. Sheikhi²

^{1*} - Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran.

² - M.Sc. Student, Department of Civil Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran.

Received: 8 January 2016

Accepted: 16 July 2016

Abstract

Flood is a stochastic phenomenon and successful and construction of economic dam in flood discharge system is very important. In recent years, non-linear overflows, as a solution, helped designers and engineers of water sciences. In this study, new non-linear overflow weirs as Crown Wheel spillways are introduced. Discharge coefficient tests were performed under various scenarios geometry of the overflow in order to investigate the ability of the hydraulic overflow flood discharge. To study the effect of the slope floor of inlet and outlet keys (Z) on the current discharge coefficient, the slope of 1 : 0.5, 1 : 1 and 1 : 1.5 (Horizontal : Vertical) were designed and built. Then in each of the three phase variation in the slope floor of inlet and outlet keys (Z), four types of spillway with a crest length of two, four, six and eight cycles were designed, built and tested. The results indicated that by increasing the slope of inlet and outlet keys (Z), discharge flow rate will be increased. This also increases the number of cycles at low heads, leading to an increase in the flow discharge coefficient. In large heads, the feature of vortex

breaking in overflows with the less number of cycles is noticeable. The results showed that the coefficient of discharge in Crown Wheel spillway is to 2.2 bigger than in a circular vertical sharp edged weir. Due to the small dimensions of this type of overflow compared to similar types, this nonlinear overflows can be considered as an efficient and economic flood discharge system for introduction to the scientific community of the country.

Keywords: Crown Wheel, Key, choking, Vortex, Discharge coefficient.

کنگره‌ای، اولین مدل‌های سرریز کلید پیمانویی را ارائه نمودند که برخلاف شیب عمودی سرریزهای کنگره‌ای، دارای شیب مایل در انتهای کلیدها بودند. آنان با انجام بیش از ۵۰ آزمایش دومدل A و B را برای سرریزهای کلید پیمانویی معرفی کردند. مدل A دارای پیش آمدگی یکسان در بالادست و پایین دست بوده و این در حالی است که مدل B فقط دارای پیش آمدگی بالادست می‌باشد.

لیت ریبرو و همکاران^۵ (۲۰۰۹) در واقع اولین افرادی بودند که تأثیر دیواره‌های سپری را بر راندمان هیدرولیکی سرریز کلید پیمانویی بررسی نمودند. آنان در واقع ارتفاع سرریز را بدون افزایش طول شیروانی‌ها افزایش دادند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش ۱۲/۳ درصدی ارتفاع سرریز، راندمان هیدرولیکی آن ۱۵ درصد افزایش می‌یابد.

لمپیری و همکاران^۶ (۲۰۱۱) انواع مختلف سرریزهای کلید پیمانویی که از سال ۱۹۹۸ توسط مؤسسه هیدروکوپ^۷ مورد مطالعه قرار گرفته بودند را خلاصه کردند. و سرریزهای کلیدپیمانویی را براساس وجود و یا عدم وجود پیش‌آمدگی به چهار نوع متفاوت طبقه‌بندی نمودند. در تقسیم بندی آنها، در مدل A، هم پیش‌آمدگی بالادست و هم پیش‌آمدگی پایین دست وجود دارد. در مدل‌های B و C فقط یکی از پیش‌آمدگی بالادست یا پایین دست وجود دارد و مدل D فقط شامل انتهای مایل بوده و هیچ گونه پیش‌آمدگی ندارد. این مدل دسته‌بندی در شکل (۱) نمایش داده شده است.

اندرسون و تالیس^۸ (۲۰۱۱) با مقایسه سرریزهای کنگره‌ای مستطیلی با سرریزهای کلیدپیمانویی عنوان کردند که ضریب تخلیه سرریزهای کلیدپیمانویی بیشتر است.

کبیری سامانی و جواهری^۹ (۲۰۱۲) به ارائه رابطه‌ای بهینه برای تعیین ضریب دبی و در نتیجه دبی عبوری از سرریز کلید پیمانویی در حالت آزاد پرداختند. همچنین تأثیر هریک از پارامترهای هندسی بر ضریب دبی مشخص شد. نتایج نشان داد که با افزایش ارتفاع سرریز (P)، طول سرریز (L)، طول لبه آویزان بالادست و تعداد سیکل‌ها که در نهایت به افزایش طول کلی سرریز می‌انجامد، باعث افزایش ضریب دبی و همچنین افزایش دبی عبوری از سرریز می‌شود.

مقدمه

سرریزها از جمله سازه‌های هیدرولیکی سدها هستند که امکان تخلیه سیلاب را از مخزن سد به رودخانه پایین دست آن فراهم می‌آورد (ویچر و هگر^۱، ۱۹۹۸). احداث سد با اهداف مختلفی از زمان‌های دور مورد نیاز بشر بوده و ساخت سیستم تخلیه سیلاب در سدها نیز اجتناب ناپذیر است. به گزارش کمیته ملی سدهای بزرگ^۲، یک سوم از خرابی سدها بر اثر کم بودن ظرفیت تخلیه سرریزها رخ داده است. معمولاً سرریزها را برحسب مهم‌ترین مشخصه آن‌ها تقسیم‌بندی می‌کنند. این مشخصه می‌تواند در رابطه با سازه کنترل، کانال تخلیه و یا هر جزء دیگر آن باشد. برحسب اینکه سرریز مجهز به دریچه و یا فاقد آن باشد، به ترتیب با نام سرریزهای کنترل‌دار و یا سرریزهای بدون کنترل شناخته می‌شوند. روش دیگر تقسیم‌بندی سرریزها براساس شکل تاج آن‌ها است که به دو دسته کلی سرریزهای با تاج خطی و سرریزهای با تاج غیرخطی تقسیم‌بندی می‌شوند. با توجه به اینکه هزینه‌های ساخت سیستم تخلیه سیلاب در پروژه‌های سدسازی قابل توجه می‌باشد، لذا صرفه‌جویی در هزینه‌های سرریزها مورد توجه طراحان این‌گونه سازه‌ها است.

برای صرفه‌جویی در هزینه‌ها و ابعاد سرریزها، روش‌های متفاوتی وجود دارد که از جمله روش‌های مؤثر استفاده از سرریزهای با آستانه غیرخطی در پلان می‌باشد که معمولاً به سرریزهای کنگره‌ای یا کلید پیمانویی معروفند. سابقه ساخت سرریزهای کنگره‌ای به سال ۱۹۱۰ میلادی بازمی‌گردد. با این وجود بیشتر این سرریزها از سال ۱۹۷۰ میلادی به بعد ساخته شده‌اند. جامع‌ترین و بیشترین مطالعات در داخل فلولم توسط تیلور^۳ (۱۹۶۸) انجام شد که مبنای بسیاری از مطالعات بعدی قرار گرفت. مسئله ضریب دبی توسط محققان زیادی در سرریزهای مختلفی از جمله سرریزهای لبه تیز، روزه‌ایی، نیلوفری، کنگره‌ای و کلید پیمانویی مورد بررسی قرار گرفته است. پیچیدگی الگوی جریان و تأثیر عوامل مختلف و نامعین بر هیدرولیک این نوع سرریزها سبب گردیده تا در مطالعات، طراحی و کاربرد این‌گونه سرریزها در سطح وسیعی از مدل‌های فیزیکی استفاده شود.

لمپیری و اوین^۴ (۲۰۰۳) اولین مطالعات را روی سرریزهای کلید پیمانویی انجام دادند. آنها با الهام گرفتن از شکل سرریزهای

5 - Leite Ribeiro *et al.*

6 - Lemperiere *et al.*

7 - Hydrocoop

8 - Anderson and Tullis

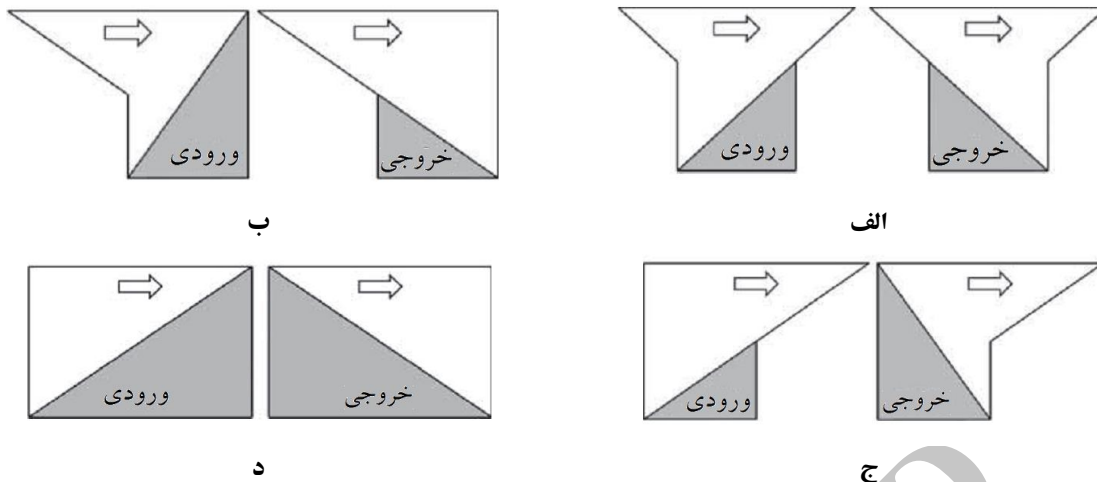
9 - Kabiri-Samani and Javaheri

1 - Vischer and Hager

2 - International Commission of Large Dams (ICOLD)

3-Taylor

4 - Lemperiere and Ouamane



شکل ۱- انواع سرریز کلید پیانویی (لیت ریبرو و همکاران، ۲۰۱۲) الف- سرریز کلید پیانویی با پیش آمدگی بالادست و پایین دست، ب- سرریز کلید پیانویی با پیش آمدگی بالادست، ج- سرریز کلید پیانویی با پیش آمدگی پایین دست، د- سرریز کلید پیانویی بدون پیش آمدگی

ناویراستوکس دو بعدی ارائه شده برای گرداب پتانسیل (آزاد) قابل تأیید می‌باشد.

در این پژوهش نسبت به معرفی یک سرریز غیر خطی جدید تحت عنوان سرریز تاج دندانهای^۴ اقدام شده است.^۵ این سرریز از دوران سرریزهای کلید پیانویی روی دهانه ورودی سرریز مدور قائم ایجاد شده است و از آنجایی که شباهت بسیار زیادی به چرخ دنده‌های دیفرانسیل^۶ اتومبیل دارد، تحت عنوان تاج دندانهای نام گذاری گردید. در این مقاله به بررسی ضریب تخلیه ی این نوع سرریزها پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

سرریزهای تاج دندانهای ای با هدف افزایش ضریب آبگذری و کاهش ابعاد سازه سرریز طراحی شده است و انتظار می‌رود که سرریزهای مدور قائم در صورتی که به ورودی تاج دندانهای مجهز شوند علاوه بر خاصیت گرداب شکنی از ظرفیت تخلیه بالاتری نسبت به سرریزهای نیلوفری برخوردار باشند. در شکل (۲-الف) نمایی سه بعدی و شکل (۲-ب) نمای پلان سرریز تاج دندانهای هشت سیکل نشان داده شده است. به منظور بررسی چگونگی عملکرد این دسته از سرریزهای غیرخطی در راستای تخلیه جریان سناریوهای مختلفی با تغییر در تعداد سیکل (تعداد کلیدهای ورودی و خروجی) و همچنین تغییر در شیب کلیدهای ورودی و خروجی تدوین شد و تحت شرایط مختلف هیدرولیکی مورد آزمون قرار گرفت. طراحی این نوع سرریز به گونه‌ای انجام گرفته است که به ازای هر کلید ورودی، یک کلید خروجی تعبیه شده است.

لیت ریبرو و همکاران (۲۰۱۲) اقدام به بررسی روابط تخلیه سرریز کلید پیانویی با ساخت دو مدل فیزیکی کردند و عنوان نمودند که شرایط پایین دست سرریز کلید پیانویی نوع A تأثیری در میزان بار آبی تخلیه ندارد.

شمشی و کبیری سامانی^۱ (۲۰۱۶) با انجام مطالعاتی خاصیت گرداب شکنی ورودی‌های کلید پیانویی را بر روی سرریزهای مدور قائم مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که با نصب ورودی کلید پیانویی روی سرریز مدور قائم، تغییرات قابل توجهی در هیدرولیک جریان ورودی رخ می‌دهد.

نتایج نشان داد که این امر منجر به افزایش ظرفیت تخلیه سرریز مدور قائم شده و به دلیل خاصیت گرداب شکنی شکل ورودی باعث کاهش بار آبی روی سرریز می‌گردد. نصیری و همکاران (۱۳۹۵) با استفاده از مدل سازی عددی، میدان جریان را در اطراف سرریزهای مدور قائم با ورودی کلید پیانویی را مدل سازی نمودند. آنان نشان دادند که به منظور کنترل جریان گردابی، استفاده از سرریز مدور قائم تأثیر چشم گیری بر کاهش قدرت جریان گردابی و افزایش ضریب دبی جریان دارد. نتایج پژوهش آنان نشان داد که تحت شرایط مورد آزمایش هیدرولیک جریان گردابی بهبود یافته و هسته گرداب کاهش می‌یابد و این امر منجر به کاهش عمق استغراق بحرانی (S_c) و افزایش دبی تخلیه می‌شود.

کلر و همکاران^۲ (۲۰۱۴) با استفاده از روش سرعت سنجی تصویری ذرات^۳ به بررسی گرداب‌های با هسته هوا در دهانه آبگیرها آبگیرها پرداختند. نتایج میدان سرعت افقی در اطراف گرداب و بررسی اثر دوران نشان داد که عملیاتی بودن حل تحلیلی معادله

4- Crown Wheel

۵ - طراحی و ساخت سرریز تاج دندانهای توسط نویسنده مسئول مقاله صورت گرفته است.

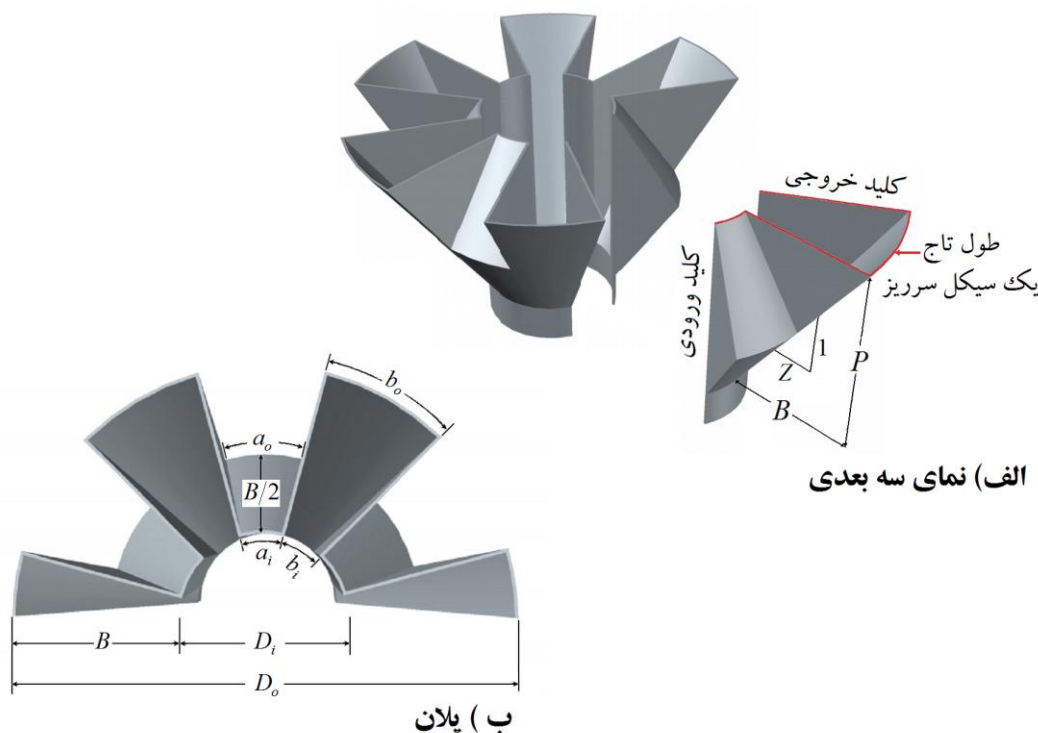
6 - Differential

1 - Shemshi and Kabiri-Samani

2- Keller et al.

3 Particle Image Velocimetry

لشکرآرا و شیخی: معرفی سرریز تاج دندانهای و بررسی میزان ضریب...



شکل ۲- نمای شماتیک سرریز تاج دندانهای هشت سیکل و مشخصه‌های هندسی آن

سرریزهای لبه تیز (t_w) ضخامت دیواره‌ی جدار سرریز نیز ثابت و معادل ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد. بنابراین پارامترهای مؤثر بر ضریب تخلیه جریان را در سرریزهای تاج دندانهای تحت شرایط جریان آزاد می‌توان به صورت رابطه (۱) خلاصه نمود.

$$C_d = f(\rho, \mu, \sigma, V_i, H, g, D_i, L, P, Z) \quad (1)$$

سپس با فرض پارامترهای (H), (V_i) و (ρ) به عنوان پارامترهای تکراری و با استفاده از تئوری پی باکینگهام می‌توان معادله حاکم بر ضریب تخلیه جریان در سرریز مدور قائم با ورودی تاج دندانهای تحت شرایط جریان آزاد به صورت معادله زیر نشان داد:

$$C_d = f\left(\frac{\rho V_i H}{\mu}, \frac{V_i}{\sqrt{gH}}, \frac{\rho V_i^2 H}{\sigma}, \frac{D_i}{H}, \frac{L}{H}, \frac{P}{H}, Z\right) \quad (2)$$

ملاحظه می‌شود که در رابطه (۲) پارامترهای بدون بعد اول معرف عدد رینولدز، پارامتر دوم معرف عدد فرود و پارامتر بدون بعد سوم عدد وبر می‌باشد. از تقسیم پارامتر (L/H) بر (D_i/H) و همچنین معکوس نمودن پارامتر (P/H) رابطه (۲) را می‌توان به شکل رابطه (۳) نوشت:

$$C_d = f\left(\text{Re}, \text{Fr}, \text{We}, \frac{L}{D_i}, \frac{H}{P}, Z\right) \quad (3)$$

به منظور شناسایی پارامترهای مؤثر بر میزان ضریب تخلیه جریان از سرریزهای تاج دندانهای تحت شرایط جریان آزاد نسبت به دسته‌بندی پارامترها اقدام گردید. بررسی‌ها نشان داد که پارامترهای مؤثر را می‌توان از نقطه نظر خصوصیات سیال، خصوصیات جریان و مشخصات هندسی (شکل ۲) به صورت زیر لیست نمود:

خصوصیات سیال: جرم مخصوص سیال (ρ), لزوجت سیال (μ), کشش سطحی (σ).

خصوصیات جریان: سرعت در روی تاج سرریز (V_i), بار آبی روی سرریز (H), شتاب ثقل (g).

خصوصیات هندسی: قطر ورودی لوله آنگیر (D_i), قطر خارجی سرریز (D_o), طول سرریز تاج دندانهای (L), ارتفاع سرریز (P), عرض ابتدای کلید ورودی (a_i), عرض انتهای کلید ورودی (a_o), عرض ابتدای کلید خروجی (b_i), عرض انتهای کلید خروجی (b_o), ضخامت دیواره‌ی جدار سرریز (t_w), طول کلید خروجی (B), شیب کلیدهای خروجی و ورودی (Z) که مطابق با شکل (۲-ب) با نسبت (P/B) معادل است.

با توجه به آن که مقادیر (a_i), (a_o), (b_i) و (b_o) در هر یک از سناریوها به صورت انفرادی و در زیرسناریوی مربوطه ثابت منظور شده است لذا می‌توان از اثر آن صرف نظر نمود. همچنین به دلیل محدودیت‌های چاپ سه بعدی مدل‌ها از یکسو و یکسان بودن اثر جداره‌های مخزن بر نتایج آزمایش‌ها از سوی دیگر مقدار (D_o) قطر خارجی سرریز در این تحقیق ثابت و معادل ۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. همچنین به منظور ایجاد شرایط جریان عبوری از

برای ساخت سرریزها ابتدا با استفاده از نرم‌افزار اتوکد، طرح مورد نظر به صورت سه بعدی ترسیم گردید. سپس با استفاده از پریتر سه بعدی نسبت به تهیه مدل مورد نظر مبادرت ورزیده شد. آزمایش‌های انجام گرفته در این پژوهش در آزمایشگاه تحقیقاتی هیدرولیک و مهندسی رودخانه دانشگاه صنعتی جندی شاپور به اجرا درآمد. آزمایش‌ها در فلو می به طول شش متر، ارتفاع و عرض یک‌متر انجام گرفتند. فلو م مذکور به‌گونه‌ای طراحی شده است که مجهز به سیستم آرام کننده جریان می‌باشد. دبی جریان توسط یک دستگاه دبی‌سنج الکترومغناطیس با دقت مضاعف ساخت شرکت مگاب اندازه‌گیری گردید. شکل (۳) نمای کلی از پلان آزمایشگاه و فلو م مورد استفاده، آرام کننده‌ی جریان و همچنین موقعیت نصب سرریز و مدل‌های طراحی شده در اتوکد و چاپ شده را تحت سناریوهای مختلف نشان می‌دهند. پس از انجام آزمایش‌ها مطابق با سناریوهای تدوین شده، با استفاده از نرم افزار تحلیل‌گر آماری نسبت به تعیین میزان اثر پذیری هر یک از پارامترهای بدون بعد رابطه (۴) بر روی ضریب تخلیه جریان اقدام شده است و در نهایت تجزیه و تحلیل‌های لازم در راستای نقاط ضعف و قوت این نوع سرریز ارائه شده است. توابع خطای مورد استفاده برای تحلیل آماری روابط پیشنهادی جهت تخمین ضریب تخلیه جریان شامل: جذر میانگین مربعات خطا^۷، درصد میانگین خطا^۸، خطای استاندارد تخمین^۹، راندمان مدل‌سازی^{۱۰} و همچنین ضریب زاویه خط رگرسیون (m) برازش داده شده از بین نتایج در مقایسه با خط ۴۵ درجه می‌باشند.

برای مقایسه نتایج عملکرد سرریزهای تاج دندانه‌ای، ضریب تخلیه این دسته از سرریزها تحت شرایطی هیدرولیکی یکسان در مقایسه با سرریز مدور قائم با ورودی لبه‌تیز مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند.

نتایج و بحث

در راستای تأمین اهداف پیش‌بینی شده در مبحث تحلیل ابعادی و به‌منظور بررسی اثر شیب کلید (Z) سرریزهای تاج دندانه‌ای و همچنین اثر تعداد سیکل آن بر ضریب تخلیه جریان، آزمایش‌ها مطابق با سناریوهای از پیش تعیین شده به اجرا درآمدند. محدوده تغییرات پارامترهای حاکم بر فضای پژوهش در جدول (۱) خلاصه شده‌اند.

مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که در شروع مرحله کارکرد سرریز، کنترل جریان توسط تاج سرریز صورت می‌گیرد. مشاهدات عینی در این مرحله، اثر نیروی کشش سطحی بر الگوی جریان عبوری از لبه سرریز را به خوبی نشان می‌دهند.

به‌طور کلی در سرریزها، نیروهای ثقل و اینرسی به‌عنوان نیروهای غالب بر شرایط جریان مؤثرند. در چنین شرایطی با تحقق شرط تشابه هندسی دقیق بین مدل و نمونه اصلی، می‌توان رفتار سیال را به‌صورت کامل شبیه‌سازی نمود. مقیاس باید به‌گونه‌ای انتخاب گردد تا نیروهایی که اهمیت زیادی در نمونه اصلی ندارند در مدل اثر بزرگی نداشته و اثر مقیاسی به حداقل برسد. بر اساس مطالعات دی وریس^۱ (۱۹۹۳) چنانچه عدد رینولدز ($V_i H / \nu$) بزرگ‌تر از ۴۰۰ الی ۸۰۰ باشد می‌توان از اثر نیروی لزجت در نتایج آزمایشگاهی صرف‌نظر نمود (به نقل از نیک صفت، ۱۳۸۰). همچنین هیکر^۲ (۱۹۸۷) در مطالعات خود نشان داد که چنانچه توان دوم عدد وبر از ۱۰۰۰۰ بزرگ‌تر باشد می‌توان از اثر نیروی کشش سطحی صرف‌نظر نمود. جین و همکاران^۳ (۱۹۷۸) و داگت و کیولگان^۴ (۱۹۷۴) در مطالعات خود پیرامون آبگیرهای قائم نشان دادند که به ازای اعداد وبر بزرگ‌تر از ۱۲۰ اثر نیروی کشش سطحی قابل صرف‌نظر کردن است. تحقیقات انوار و همکاران^۵ (۱۹۷۸) پیرامون گرداب آزاد در آبگیرهای افقی نشان داد که به ازای اعداد رینولدز بزرگ‌تر از $10^5 \times 1/1$ اثر نیروی لزجت قابل چشم‌پوشی است. نتایج مطالعات اودگارد^۶ (۱۹۸۶) در خصوص اثر مقیاس در مدل‌سازی ورود هوا به هسته مرکزی گرداب به این نتیجه ختم شد که در صورتی که اعداد وبر و رینولدز به ترتیب بزرگ‌تر از ۷۲۰ و $10^5 \times 1/4$ باشد، اثر نیروی لزجت و کشش سطحی بر نتایج مدل‌سازی ناچیز است.

بر اساس مطالب فوق الذکر از آنجایی که نمونه‌ای از اندازه‌ی واقعی این نوع سرریز در دست نمی‌باشد، لذا عدم قطعیت منجر به آن شد که در روابط پیشنهادی برای تخمین ضریب تخلیه جریان در سرریزهای تاج دندانه‌ای تحت شرایط جریان آزاد، اثر عدد وبر و رینولدز در نظر گرفته شود. از سویی دیگر با توجه به اینکه میزان ضریب تخلیه جریان خود از جنس عدد فرود می‌باشد لذا چشم‌پوشی از آن در معادله‌های تأثیر قابل توجه‌ای بر نتایج نخواهد داشت. لذا می‌توان رابطه (۳) را به ازای هر یک از سناریوهای تغییر در شیب کلید سرریز (Z) معادل با ۰/۵، ۱ و ۱/۵ به‌صورت شکل عمومی رابطه (۴) نمایش داد:

$$C_d = f\left(\text{Re}, We, \frac{L}{D_i}, \frac{H}{P}\right) \quad (4)$$

بر این اساس به منظور بررسی ضریب تخلیه جریان سناریوهای مختلفی از نظر شیب کلیدهای ورودی و خروجی و تعداد سیکل طول تاج سرریز در نظر گرفته شد. برای این منظور در هر یک از شیب‌های کلید (Z) معادل ۰/۵، ۱ و ۱/۵، سرریزهایی با تعداد سیکل (n) معادل دو، چهار، شش و هشت ساخته شد.

- 1 - De Veries
- 2- Hecker
- 3 - Jain *et al.*
- 4 - Daggett and Keulegan
- 5 Anwar *et al.*
- 6 - Odgaard

- 7 - Root Mean Square Error
- 8 - Mean percentage Error
- 9 - Standard Error of Estimate
- 10 - Modeling Efficiency

لشکرآرا و شیخی: معرفی سرریز تاج دندانه‌ای و بررسی میزان ضریب...



شکل ۳- نمایی از سیستم آزمایشگاهی و مدل‌های سرریز مورد استفاده (الف) - سرریزهای تاج دندانه‌ای با شیب کلید (Z) معادل ۰/۵، (ب) - سرریزهای تاج دندانه‌ای با شیب کلید (Z) معادل ۱، (ج) - سرریزهای تاج دندانه‌ای با شیب کلید (Z) معادل ۱/۵

جدول ۱- محدوده تغییرات پارامترهای حاکم بر فضای پژوهش

تغییرات	واحد	نماد	پارامتر
۲۲/۲۸ ، ۱۸/۲۸ ، ۱۴/۲۸ ، ۱۰/۲۸ ، ۹/۴۲ ، ۵/۲۸	بی بعد	L/D_i	طول نسبی تاج
۱/۵ ، ۱ ، ۰/۵	بی بعد	P/B یا Z	شیب کلید سرریز
۱۷/۶۵ الی ۰/۵۵	لیتر بر ثانیه	Q_i	دبی سرریز
۰/۸۵۸ الی ۰/۰۱۲	بی بعد	H/P	ارتفاع نسبی بار آبی
۱۱۷۹۱ الی ۲۴۶	بی بعد	Re	عدد رینولدز
۲۳۷۳ الی ۱۹۱	بی بعد	We	عدد وبر

برخورد جت‌های دیواره‌ای را قبل از وقوع پدیده انسداد در کلید خروجی نشان می‌دهد.

با توجه به این نکته که ماهیت کلیدهای ورودی و خروجی سرریزهای تاج دندانه‌ای در راستای مسیر جریان عبوری از پیرامون خود به سمت مرکز، به تدریج با کاهش عرض مواجه‌اند، لذا ادامه روند افزایش ارتفاع جریان بر روی تاج منجر به بروز پدیده انسداد در انتهای کلیدهای خروجی گردید. این موضوع در شکل (۴-ج) نمایش داده شده است. افزایش بار آبی منجر به تشدید مساله انسداد شده و این امر تا جایی ادامه می‌یابد که پس زدگی آب از یک سو و برخورد جت‌های عبوری از دیواره‌های جانبی کلیدهای خروجی از سوی دیگر منجر به تغییر رژیم جریان و تشکیل گرداب

در شکل (۴-الف) جدایی جریان و چسبندگی آن بلافاصله به جداره کلید خروجی، وجود نیروی کشش سطحی در این مرحله از آزمایش‌ها را گزارش می‌نماید. کشش ایجاد شده توسط جداره داخلی کلید خروجی منجر به افزایش موقتی ضریب تخلیه جریان می‌شود. با افزایش شدت جریان عبوری و به واسطه آن افزایش بار آبی جریان روی تاج سرریز منجر به کاهش اثر نیروی کشش سطحی شده و این امر منجر به تغییر آهنگ تغییرات ضریب تخلیه جریان از حالت صعودی به نزولی می‌شود. این روند تا جایی ادامه می‌یابد که جت‌های جریان عبوری از روی تاج جداره‌های داخلی کلید خروجی به یکدیگر برخورد نموده و شرایط وقوع پدیده انسداد جریان را در درون کلید خروجی رقم بزنند. شکل (۴-ب) لحظه‌ی

کلید (Z) معادل ۱/۵ در بار آبی نسبی ۰/۳ تا میزان ۱/۰۲۵ افزایش نشان می‌دهد. شرایط تشکیل انسداد و یا به اصطلاح قفل کلید خروجی در کلیه سناریوها به ترتیب در سرریزهای هشت، شش، چهار و دو سیکل رخ داده است. این امر نیز به دلیل کمتر بودن عرض نسبی کلیدهای خروجی در سرریزهای هشت سیکل در مقابل دو سیکل می‌باشد.

در سناریوی سوم شیب زیاد کلیدهای خروجی (Z) معادل ۱/۵ در مقایسه با سناریوی اول با شیب کلید (Z) معادل ۰/۵ نشان می‌دهد که انسداد کلید در سناریوی سوم تحت بار آبی بیشتری رخ می‌دهد لذا این موضوع حاکی از برتری نسبی شرایط هیدرولیکی سناریوی سوم در مقایسه با سناریوی اول می‌باشد.

می‌گردد. شکل (۴-د) تغییر رژیم جریان را از شرایط آزاد به تشکیل گرداب در دهانه سرریز مدور قائم گزارش می‌نماید.

پس از پردازش مشاهدات آزمایشگاهی، روند تغییرات ضریب تخلیه جریان در مقابل پارامتر (H/P) مورد ارزیابی قرار گرفت و بهترین منحنی از بین نتایج برازش داده شد. شکل‌های (۵) الی (۷) آهنگ تغییرات ضریب تخلیه جریان را در مقابل پارامتر (H/P) به ترتیب در شیب کلیدهای (Z) معادل با ۰/۵، ۱ و ۱/۵ نشان می‌دهند. همان گونه که قابل انتظار بود نیروی کشش سطحی منجر به بروز یک نقطه بیشینه در شکل‌های (۵) الی (۷) گردید.

ارزیابی‌های صورت گرفته حاصل از سناریوهای مختلف نشان داد که صرف نظر از میزان شیب کلیدها (Z)، با افزایش تعداد سیکل، ضریب تخلیه جریان افزایش می‌یابد. در شکل (۷) ملاحظه می‌گردد که ضریب تخلیه جریان در سرریز هشت سیکل با شیب



ب



الف



د



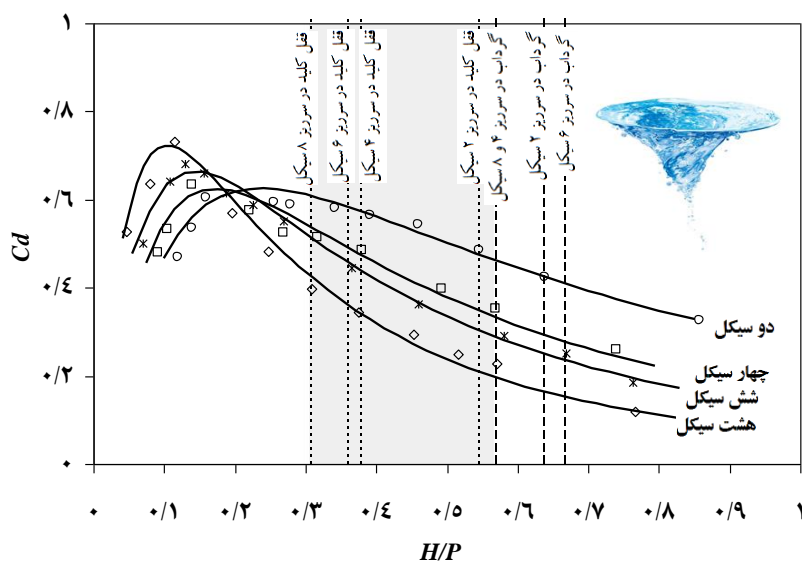
ج

شکل ۴- شرایط و خصوصیات هیدرولیکی جریان عبوری از سرریز تاج دندانه‌ای هشت سیکل (الف)- رژیم آزاد و کنترل توسط تاج، (ب)- برخورد جت‌های عبوری از دیواره‌های کلید خروجی، (ج)- انسداد جریان در کلید خروجی، (د)- تغییر رژیم جریان و تشکیل گرداب در دهانه سرریز

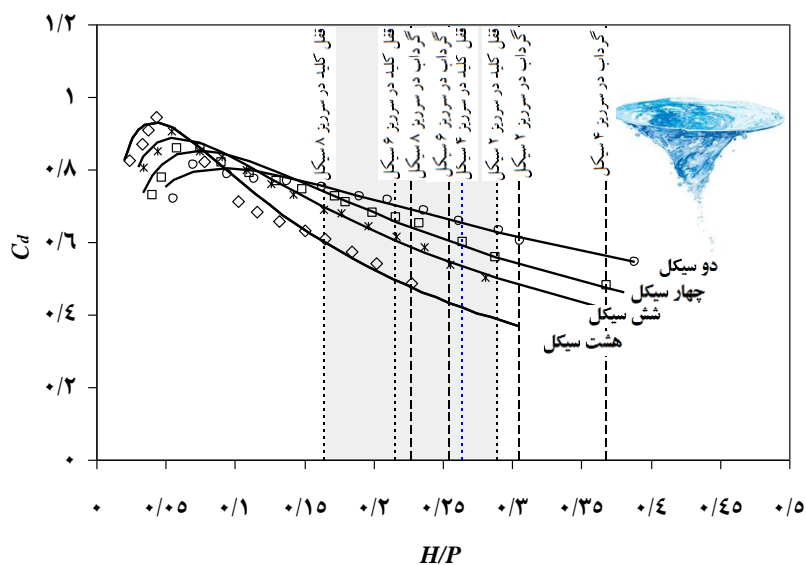
لشکرآرا و شیخی: معرفی سرریز تاج دندانه‌ای و بررسی میزان ضریب...

شیب‌های کلید (Z) مختلف نشان می‌دهد که افزایش شیب کف کلیدها منجر به کاهش اثر نیروی کشش سطحی بر ضریب تخلیه جریان می‌شود. در مجموع بررسی‌ها گویای این واقعیت است که شیب و عرض کلیدهای خروجی‌ها تأثیر به‌سزایی در میزان ضریب تخلیه جریان در سرریزهای تاج دندانه‌ای دارند به گونه‌ای که افزایش شیب و تعداد سیکل در بارهای آبی کمتر باعث افزایش ضریب دبی و در بارهای آبی بیشتر باعث کاهش ضریب دبی جریان می‌شود.

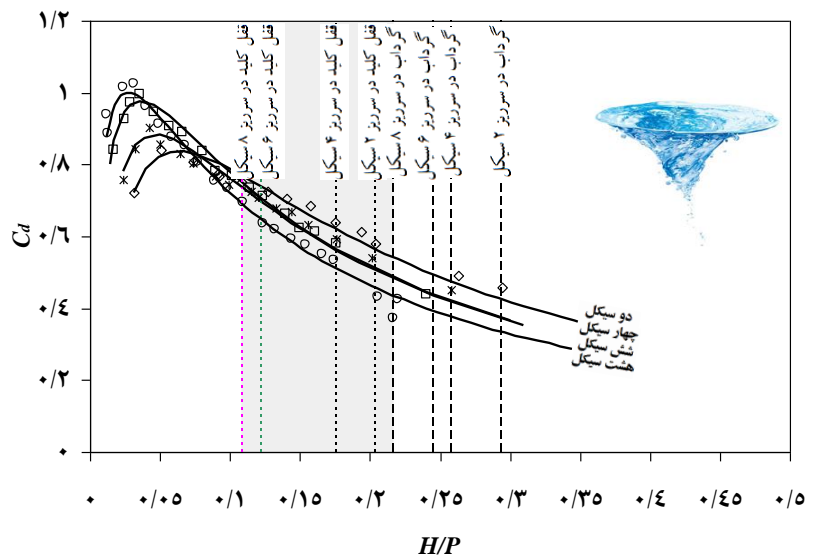
از طرفی مقایسه شکل‌های (۵) الی (۷) نشان می‌دهد که بازه تشکیل انسداد کلید خروجی در سناریوی سوم محدودتر از سناریوی اول می‌باشد و این امر حاکی از آن است که بازه ی اطمینان به‌کارگیری سرریزهای با شیب کلید معادل ۱/۵ از نقطه نظر بازه‌ی انسداد کلید خروجی از دیگر سناریوها بیشتر است. بررسی‌های مشابه در خصوص آستانه تشکیل گرداب نشان داد که نتایج مشابه‌ای از سرریزهای با شیب کلید معادل ۱/۵ نسبت به بقیه‌ی سناریوها قابل انتظار است. مقایسه‌ی منحنی‌های ضریب تخلیه‌ی جریان در سرریزهای تاج دندانه‌ای با تعداد سیکل مشابه و تحت



شکل ۵- روند تغییرات ضریب تخلیه جریان (C_d) در سرریز تاج دندانه‌ای با شیب کلید (Z) معادل ۰/۵



شکل ۶- روند تغییرات ضریب تخلیه جریان (C_d) در سرریز تاج دندانه‌ای با شیب کلید (Z) معادل یک



شکل ۲- روند تغییرات ضریب تخلیه جریان (C_d) در سرریز تاج دندانه‌ای با شیب کلید (Z) معادل ۱/۵

ضرورت ارزیابی اثر بخشی پارامترهای بدون بعد معرفی شده در رابطه (۴) با استفاده از حدود تغییرات آنها که در جدول (۱) درج شده‌اند وجود دارد. با توجه نتایج جدول (۱) در بیش از ۹۵ درصد مشاهدات آزمایشگاهی اعداد رینولدز و ویر در محدوده‌های ذکر شده توسط دی وریس (۱۹۹۳) و هیگر (۱۹۸۷) قرار دارند. بنابراین در راستای ساده‌سازی شکل نهایی رابطه کلی مطابق با مطالعات ویچر و هگر (۱۹۹۸) می‌توان از اثر لزوجت و کشش سطحی در تخمین ضریب تخلیه جریان آزاد صرف نظر نمود. ولی با توجه به توضیحاتی که پیشتر در خصوص مشکلات خطای مقیاس به دلیل عدم وجود نمونه اصلی ارائه گردید، تصمیم بر آن شد تا معادله‌های عمومی حاکم بر فضای تحقیق با در نظر گرفتن اثر نیروی لزوجت و کشش سطحی به ازای هر یک از شیب‌های کلید ۱/۵، ۱ و ۱/۵ در قالب شکل رابطه (۴) ارائه شود. برای این منظور ۲۰ درصد از مشاهدات آزمایشگاهی هریک از سناریوها از بقیه‌ی مشاهدات مجزا گردید و با استفاده از ۸۰ درصد داده‌های باقیمانده و به‌کارگیری رگرسیون غیر خطی، اثر پذیری هر یک از پارامترهای بدون بعد نمایش داده شده در رابطه (۴) بر میزان ضریب تخلیه جریان تحت شرایط جریان آزاد مورد ارزیابی آماری قرار گرفت. برای این منظور از نرم افزار تحلیل گر آماری SPSS استفاده گردید. روابط (۵) الی (۷) نشانگر نداشت صورت گرفته بر فضای بین پارامترهای مستقل و وابسته به ازای هر یک از شیب‌های مختلف کلید می‌باشد:

برای شیب کلید معادل $Z=0.5$

$$C_d = 1.522 (H/P)^{0.003} (L/D)^{-0.788} (We)^{0.779} (Re)^{-0.52} \quad (5)$$

از آنجایی که سرریز تاج دندانه‌ای با هدف افزایش ضریب تخلیه روی دهانه ورودی سرریز مدور قائم نصب شده است لذا ارائه نتایج حاصل از مقایسه عملکرد آن قابل انتظار است. برای این منظور ضرایب تخلیه حاصل از کلیه مشاهدات آزمایشگاهی تحت سناریوهای شیب کلید معادل ۱/۵، ۱ و ۰/۵ در سیکل‌های مختلف با نتایج ضریب تخلیه سرریز مدور قائم با ورودی لبه تیز تحت شرایط هیدرولیکی یکسان مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. نتایج حاکی از برتری نسبی عملکرد سرریز تاج دندانه‌ای در مقایسه با سرریز مدور قائم با ورودی لبه تیز می‌باشد. نتایج این مقایسه در شکل (۸) نمایش داده شده است.

همان‌طوری که از شکل (۸) مشهود است در کلیه سناریوها ابتدا سرریز تاج دندانه‌ای هشت سیکل از ضریب تخلیه بهتری برخوردار است ولی با افزایش بار آبی روی تاج، سرریز تاج دندانه‌ای دو سیکل گوی سبقت را از دیگر رقبای خود می‌رباید.

برای حالتی که شیب کلید (Z) معادل ۱/۵ و ۱ باشد، به ازای بارهای آبی نسبی (H/P) بزرگ‌تر از ۰/۲، مقدار ضریب تخلیه جریان به بیش از ۲/۲ برابر سرریز مدور قائم افزایش می‌دهد. علت این امر را می‌بایست در طول بیشتر تاج سرریز تاج دندانه‌ای در مقایسه با سرریز مدور قائم جستجو کرد. همچنین خصوصیات هندسی این سرریز و شکل پره‌ای مانند آن منجر به بروز خاصیت ضدگردابی در آن شده است. شکل هندسی این سرریز موجب اصلاح خطوط جریان و در نتیجه عملکرد بهتر سرریز تاج دندانه‌ای در مقایسه با سرریز مدور قائم شده است. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که تحت شرایط هیدرولیکی مشابه در سرریز مدور قائم با ورودی لبه تیز پدیده گرداب حتی زودتر از پدیده انسداد در کلیدهای خروجی سرریز تاج دندانه‌ای به وقوع می‌پیوندد.

به‌منظور ارائه یک رابطه کلی برای تخمین ضریب تخلیه جریان در سرریزهای تاج دندانه‌ای تحت شرایط جریان آزاد،

لشکرآرا و شیخی: معرفی سرریز تاج دندانه‌ای و بررسی میزان ضریب...

از ۲۰ درصد داده‌هایی که هیچ نقشی در آموزش معادله‌های فوق نداشته‌اند استفاده گردید و نتایج حاصل از پیش‌بینی پارامتر ضریب دبی جریان (C_d) در مقابل مشاهدات آزمایشگاهی نظیر آن اقدام گردید. توابع خطای حاصل از پیش‌بینی پارامتر (C_d) در مراحل آموزش و آزمون در جدول (۲) خلاصه شده‌اند.

تجزیه و تحلیل‌های آماری نشان می‌دهند که خطوط برازش داده شده از بین نتایج مندرج در شکل‌های (۹) و (۱۰) حاکی از توانایی مطلوب روابط معرفی شده برای تخمین ضریب تخلیه جریان در سرریزهای تاج دندانه‌ای تحت شیب‌های کلید مختلف و همچنین سیکل‌های مختلف تحت شرایط جریان آزاد می‌باشند.

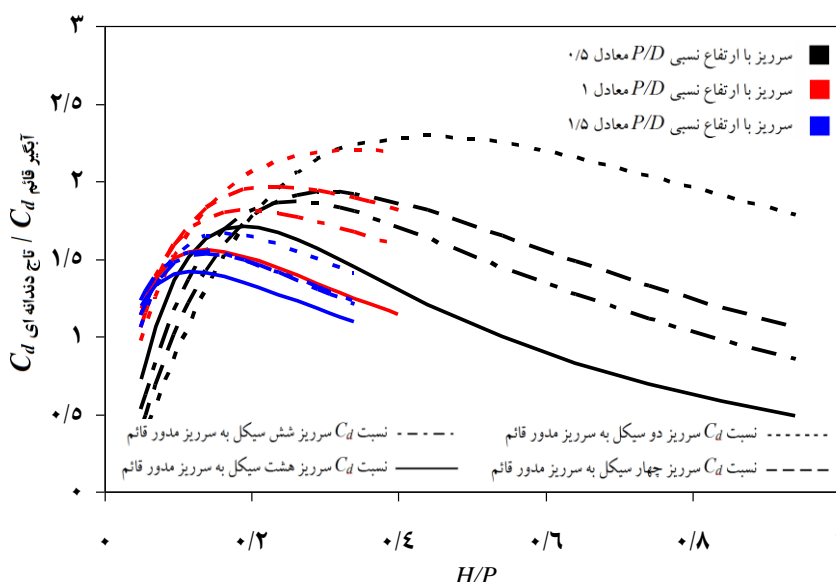
برای شیب کلید معادل $Z=1$

$$C_d = 1.087 (H/P)^{-0.04} (L/D)^{-0.664} (We)^{0.641} (Re)^{-0.41} \quad (۶)$$

برای شیب کلید معادل $Z=1/5$

$$C_d = 1.864 (H/P)^{0.027} (L/D)^{-0.723} (We)^{0.719} (Re)^{-0.507} \quad (۷)$$

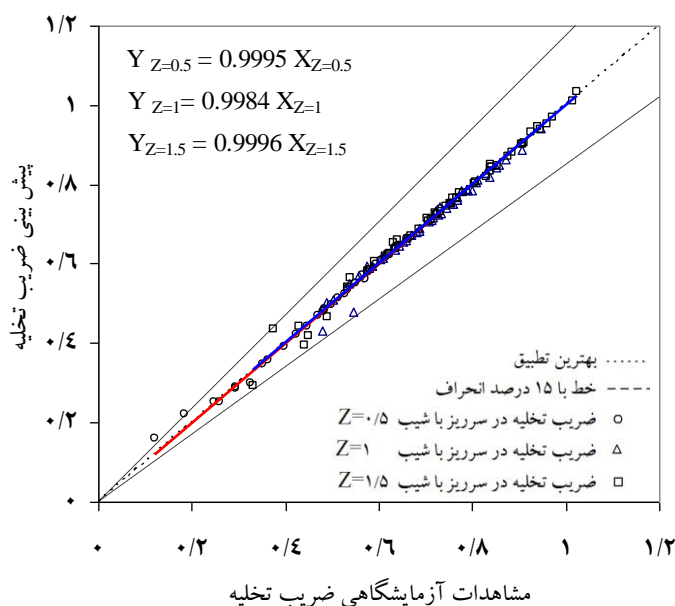
در گام بعد به منظور ارزیابی توانایی روابط (۵) الی (۷) در تخمین ضریب تخلیه جریان در سرریزهای تاج دندانه‌ای، با استفاده



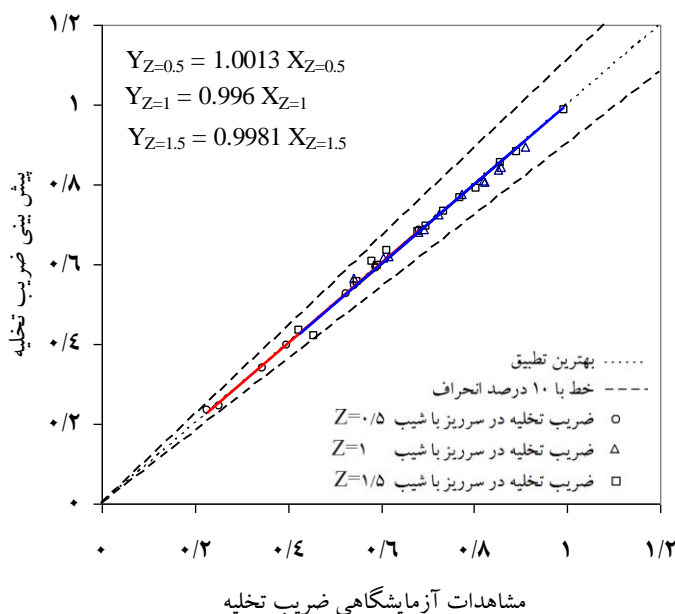
شکل ۸- مقایسه نسبت ضریب تخلیه جریان در سرریزهای تاج دندانه‌ای با سیکل‌های مختلف نسبت به ضریب تخلیه جریان سرریز مدور قائم

جدول ۲- توابع خطای حاصل از بکارگیری روابط (۵) الی (۷) در تخمین ضریب تخلیه جریان

مرحله	پارامتر C_d	ریشه میانگین مربعات خطا	خطای حداکثر	ضریب وزن باقیمانده	راندمان معادله‌ها	ضریب زاویه
واسنجی	رابطه (۵)	۰/۰۱۰۹	۰/۰۲۷	-۰/۰۰۰۹	۰/۹۹۴۲	۰/۹۹۹۵
	رابطه (۶)	۰/۰۱۴۶	۰/۰۶۴۳	-۰/۰۰۱۴	۰/۹۸۲۹	۰/۹۹۸۴
	رابطه (۷)	۰/۰۱۴۶	۰/۰۴۴۵	-۰/۰۰۰۳	۰/۹۹۱۹	۰/۹۹۹۶
صحت سنجی	رابطه (۵)	۰/۰۰۴۶	۰/۰۰۷۲	-۰/۰۰۰۱	۰/۹۹۹۱	۱/۰۰۱۳
	رابطه (۶)	۰/۰۱۱۹	۰/۰۱۵۳	-۰/۰۰۱۸	۰/۹۸۸۶	۰/۹۹۹۶
	رابطه (۷)	۰/۰۱۴۹	۰/۰۳۸۲	-۰/۰۰۱۱	۰/۹۹۱۲	۰/۹۹۸۱



شکل ۹- پیش بینی ضریب تخلیه جریان (C_d) توسط روابط (۵) الی (۷) در مقابل مقادیر مشاهداتی در مرحله واسنجی



شکل ۱۰- پیش بینی ضریب تخلیه جریان (C_d) توسط روابط (۵) الی (۷) در مقابل مقادیر مشاهداتی در مرحله صحت سنجی

(Z) تدوین گردید. سپس خصوصیات هیدرولیکی جریان در هر یک از سناریوهای اصلی با تعریف و آزمون چهار زیر سناریوی فرعی با تغییر در تعداد سیکل سرریز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش شیب کف کلیدهای سرریز، ضریب دبی تخلیه جریان افزایش می‌یابد. همچنین در بار آبی کم، سرریز با تعداد

نتیجه گیری

در این پژوهش یک سرریز غیر خطی جدید تحت عنوان سرریز تاج دندان‌های معرفی گردید و نسبت به بررسی خصوصیات هیدرولیکی آن مبادرت ورزیده شد. برای این منظور سناریوهای مختلفی با تغییر در میزان شیب کف کلیدهای ورودی و خروجی

زیاد، شکل هندسی خاص سرریزهای با تعداد سیکل کمتر منجر به باشند.

سپاسگزاری

بدینوسیله نگارندگان این مقاله از دانشگاه صنعتی جندی شاپور به پاس فراهم آوردن امکان استفاده از آزمایشگاه هیدرولیک و مهندسی رودخانه و همچنین تأمین منابع مالی کمال تشکر و قدردانی را می‌نمایند.

سیکل بیشتر از عملکرد مناسب‌تری برخوردار است. در بارهای آبی جذب خطوط جریان شده و خاصیت گرداب شکنی سرریز خصوصاً سرریز دو سیکل منجر به تولید یک ارتفاع اضافی در بار آبی و افزایش ضریب تخلیه جریان می‌شود. مقایسه نتایج کلیه نمونه‌های ساخته شده در مقایسه با سرریز مدور قائم لبه تیز نشان داد که بدون شک سرریز تاج دندانه‌ای به‌عنوان یک رقیب شکست ناپذیر گوی سبقت را از آن می‌رباید. لذا در مجموع در مکان‌هایی که نیاز به حضور یک سرریزها به‌عنوان سرریزهای فرعی و اضطراری وجود دارد می‌تواند به‌عنوان یک گزینه مطلوب مطرح

منابع

- ۱- نصیری، س.، کبیری سامانی، ع. و ک. اصغری. ۱۳۹۵. مدل سازی عددی میدان جریان در اطراف سرریزهای مدور قائم با ورودی کلید پیمانویی. نشریه علمی پژوهشی هیدرولیک، ۱۱(۱)، ۵۳-۶۶.
- ۲- نیک صفت، غ. ۱۳۸۰. تئوری و کاربرد مدل‌های هیدرولیک در طراحی سازه‌های آبی. نشریه شماره ۴۱، وزارت نیرو کمیته ملی سدهای بزرگ ایران.
- 3- Anderson, R. and B. Tullis. 2011. Influence of Piano Key Weir geometry on discharge. Proceeding International Workshop on Labyrinth and Piano Key Weirs. Liege Belgium.
- 4- Anwar, H.O. Weller, J.A. and M. B. Amphlett, 1978. Similarity of free vortex at horizontal intake. Journal of Hydraulic Research, 16(2): 95-106.
- 5- Daggett, L. L. and G. Keulegan. 1974. Similitude in free surface vortex formations. Journal of Hydraulic Division, ASCE, 100(HY11): 1565-1580.
- 6- Hecker, G.E. 1987. Fundamentals of vortex intake flow. In: Swirling flow problems at intakes. In: Knauss J, editor. IAHR hydraulic structures design manual 1. Balkema, Rotterdam, NL, Pp.13-38.
- 7- Jain, A. K., Ranga Raju K. G. and R. J. Garde. 1978. Vortex formation at vertical pipe intakes. Journal of Hydraulic Engineering, 104(10): 1429-1445.
- 8- Odgaard, A. 1984. Free-surface air core vortex. Journal of Hydraulic Engineering, 112(7): 610-620.
- 9- Kabiri-Samani, A. and A. Javaheri. 2012. Discharge coefficient for free and submerged flow over Piano Key weirs. Journal of Hydraulic Research, 50(1): 114-120.
- 10- Keller, J., Moller, G. and R. M. Boes. 2014. PIV measurements of air-core intake vortices. Flow Measurement and Instrumentation, (4): 78-81.
- 11- Lemperiere, F. and A. Ouamane. 2003. The piano keys weir: A new cost-effective solution for spillways, International Journal of Hydropower and Dams, 10(5): 144-149.
- 12- Lemperiere, F., Vigny, J.P., and A. Ouamane. 2011. General comments on Labyrinth and Piano Key Weirs: The past and present. Proceedings International Conference. Labyrinth and Piano Key Weirs Liege B, 17-24, CRC Press, Boca Raton, FL.
- 13- Leite Ribeiro, M., Bieri, M., Boillat, J. L., Schleiss, A. J., Delorme, F. and F. Laugier. 2009. Hydraulic capacity improvement of existing spillways. Design of Piano Key Weirs, In Proceedings of 23rd Congress of CIGB/ICOLD, Brasilia.
- 14- Leite Ribeiro, M., Pfister, M., Schleiss, A.J. and J.L. Boillat. 2012. Hydraulic design of A-type Piano Key Weirs. Journal of Hydraulic Research, 50(4): 400-408.

- 15-Shemshi, R. and A. Kabiri-Samani. 2016. Swirling flow at vertical shaft spillways with circular piano-key inlets. *Journal of Hydraulic Research*, 55(1): 1-11.
- 16-Taylor, G. 1968. The performance of labyrinth weirs. Doctoral Dissertation, University of Nottingham.
- 17- Vischer, D. L., and W.H., Hager. 1998. *Dam hydraulics*. Wiley Series in Water Resources Engineering, Zürich, Switzerland, ISBN: 978-0-471-97289-1.

Archive of SID