مطالعه آزمایشگاهی ضریب دبی در سرریز کنگره‌ای ذوزنقه‌ای دندانه‌دار

سید جواد مشکواتی تروجنی[۱] ، امیراحمد دهقانی[۲*]، علیرضا عمادی[۱] و محسن مسعودیان[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۶/۱۱ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۱)

چکیده

یکی از مشکلاتی که شبکه‌های آبیاری با آن مواجه هستند، تغییر میزان دبی عبوری از سازه آبگیر به‌واسطه نوسانات شدید سطح آب در مجرای اصلی است. یکی از راه‌های مؤثر کاهش این نوسانات، افزایش طول تاج سرریز در عرض مشخصی از کانال است که با استفاده از سرریزهای کنگره‌ای می‌توان به این هدف دست یافت. سرریز کنگره‌ای همان سرریز خطی است که در پلان به‌صورت شکسته دیده می‌شود. در این پژوهش، از یک سرریز کنگره‌ای با طول ۳/۷۲ متر، سه ارتفاع ۱۵، ۱۷ و ۲۰ سانتی‌متر، سه شکل مختلف دندانه (مستطیل، مثلث و ذوزنقه) و یک سرریز خطی با همان سه ارتفاع استفاده شده است. همچنین ضریب دبی این سرریز به‌صورت آزمایشگاهی در یک کانال به‌طول ۱۵ و عرض ۱ متر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داده است که در یک طول و ارتفاع ثابت، با افزایش نسبت هد آب بالادست به ارتفاع سرریز (H_t / P)، ضریب‌دبی کاهش یافته است. همچنین برای یک طول مشخص از سرریز و در یک H_t / P ثابت، با افزایش ارتفاع سرریز، ضریب دبی کاهش یافته است. سرریز خطی و سرریز کنگره‌ای بدون دندانه نسبت به سرریز کنگره‌ای دندانه‌دار به‌ترتیب ۳/۳ و ۱/۲ برابر عمق آب بیشتری در بالادست ایجاد می‌کنند.

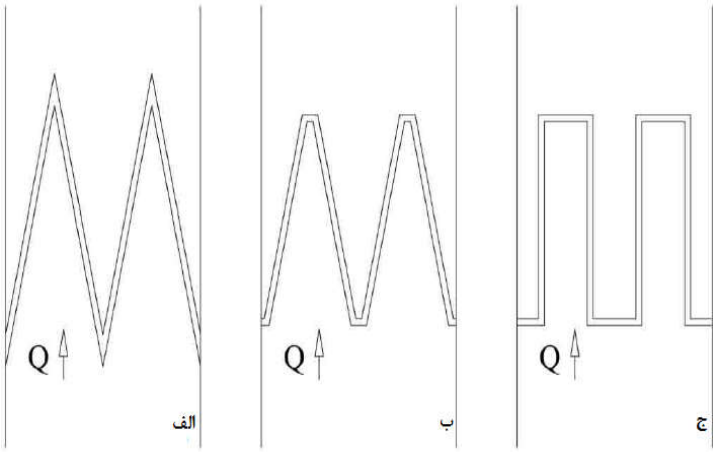
واژه‌های کلیدی: دبی جریان، سرریز کنگره‌ای ذوزنقه‌ای، سازه‌های هیدرولیکی، دندانه، بررسی آزمایشگاهی

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
۲. گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: a.dehghani@gau.ac.ir

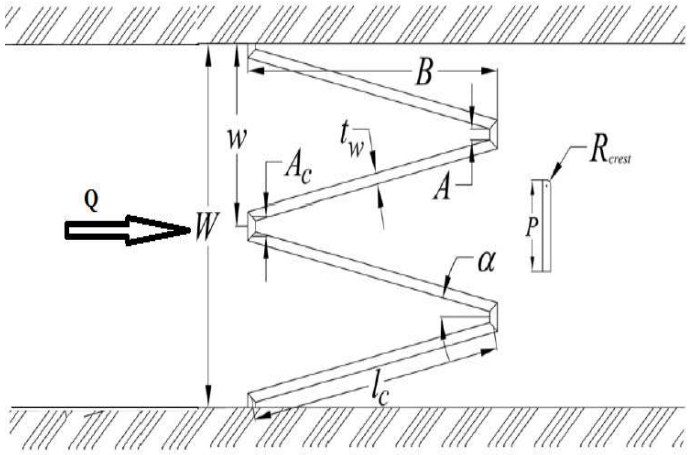
مقدمه

سرریزها از جمله وسایل ساده‌ای هستند که برای تنظیم دبی و عمق جریان بالادست و همچنین برای اندازه‌گیری دبی جریان، قرن‌ها است که مورد استفاده قرار می‌گیرند. این سازه‌ها در نهرها، کانال‌ها، رودخانه‌ها، استخرها و مخازن به‌کار برده می‌شوند. یکی از مشکلاتی که شبکه‌های آبیاری با آن مواجه هستند، تغییر میزان دبی عبوری از سازه آبگیر به‌واسطه نوسانات شدید سطح آب در مجرای اصلی است. با توجه به رابطه دبی و بار هیدرولیکی در سرریزها، یکی از راه‌های کاهش این نوسانات که ناشی از تغییرات دبی است، افزایش طول تاج سرریز است. استفاده از سرریزهای چندوجهی از راه‌های مؤثر و اقتصادی به‌منظور افزایش طول مؤثر تاج است. این سرریزها که به‌تازگی مورد استفاده بیشتری قرار می‌گیرند، به نام‌های متفاوتی چون کنگره‌ای، چندوجهی و منقاری نامیده می‌شوند (۱۱). سرریز کنگره‌ای، همان سرریز خطی است که در نمای بالا به‌صورت شکسته دیده می‌شود. این عمل برای افزایش طول سرریز در یک کانال با عرض مشخص انجام می‌شود. درنتیجه، برای یک عمق جریان یکسان در بالادست، سرریزهای کنگره‌ای نسبت به سرریزهای خطی دبی بیشتری را از خود عبور می‌دهند. سرریزهای دیگری که مشابه با سرریز کنگره‌ای هستند عبارتند از: سرریزهای مورب، سرریزهای نوک‌اردکی، سرریزهای کلیدپیانویی و سرریزهای فیوزگیت. سرریزهای کنگره‌ای با اشکال هندسی مختلفی وجود دارند، اما سه شکل مثلثی، ذوزنقه‌ای و مستطیلی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند (شکل ۱). شکل‌های ۲ و ۳ نیز مشخصات هندسی و پروفیل طولی یک سرریز کنگره‌ای ذوزنقه‌ای را نشان می‌دهند.

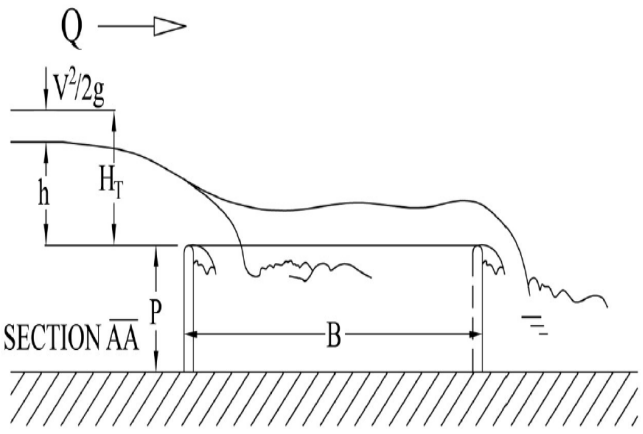
به‌دلیل پیچیدگی رفتار هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای، سال‌های زیادی است که پژوهشگران و مهندسان علاقه زیادی به مطالعه در مورد این‌گونه سرریزها از خود نشان می‌دهند. همانگونه که در بالا به آن اشاره شده است، سرریزهای کنگره‌ای نسبت به سرریزهای خطی در یک عرض مشخص از کانال، طول بیشتری را ایجاد می‌کنند، درنتیجه برای رقوم سطح آب بالادست مشخص، ظرفیت جریان را افزایش می‌دهند. بنابراین، سرریزهای کنگره‌ای در تثبیت عمق آب بالادست نسبت به سرریزهای خطی بهتر عمل کرده و درنتیجه نیاز به ارتفاع آزاد کمتری در بالادست خواهد بود. به‌دلیل پیچیدگی جریان عبوری از روی سرریز کنگره‌ای، تشریح عددی و حل آن به‌صورت عددی دشوار است. زیرا جریان عبوری از روی یک سرریز کنگره‌ای سه بعدی بوده و از یک مقطع با جریان بحرانی عبور می‌کند. برای حل عددی بایستی موارد زیر را درنظر گرفت: انرژی، مومنتم، پیوستگی، فشار زیر تیغه جریان، دینامیک هوای پشت جت آب، تداخل تیغه‌های جریان، استغراق موضعی، اثر کشش سطحی، اثر لزوجت، هندسه سرریز و شکل تاج. درنتیجه، پژوهشگران یک معادله دبی با ضرایب تجربی را به‌کار می‌برند که از نتایج آزمایشگاهی حاصل از مدل‌سازی فیزیکی به‌دست آمده‌اند (۶). مهم‌ترین امتیازات توسعه کاربرد سرریزهای زیگزاکی در رودخانه‌ها و مخازن سدها عبارتند از: ۱) محدودیت عرضی مقطع احداث سرریز برای انتقال حداکثر سیلاب طراحی در مخازن سدها و نیز در شرایط رودخانه‌های نیمه‌کوهستانی و یا رودخانه‌های سیلاب‌دشتی با مقطع مرکب، ۲) محدودیت ارتفاع سطح آب در بازه بالادست سرریز و خطر آب‌گرفتگی اراضی بالادست به‌خصوص در رودخانه‌های سیلاب‌دشتی، ۳) افزایش حجم مفید مخازن سدها از طریق افزایش ارتفاع تاج ثابت سرریز با تأمین ظرفیت انتقال سیلابی سرریز، ۴) اصلاح و توسعه طرح سرریزهای موجود برای افزایش ظرفیت انتقال سیلابی و ۵) سادگی ساخت، توجیه برتر اقتصادی و سهولت مدیریت بهره‌برداری در مقایسه با گزینه سرریز خطی با کنترل دریچه‌ای (۱۴). تلاش‌های اولیه برای بررسی سرریزهای چندوجهی توسط های و تیلور (۱۹۷۰) انجام شد. آنها بازده اینگونه سرریزها را با نسبت Q_L / Q_N بیان کردند. در این رابطه Q_L دبی سرریز چندوجهی با طول L و Q_N دبی سرریز معمولی (خطی) با طول W (معادل عرض آبراهه اصلی) در یک بار هیدرولیکی مشخص است. نتایج آزمایش‌های آنها نشان داد که بازده



شکل ۱. سرریزهای کنگره‌ای: الف) سرریز مثلثی، ب) سرریز ذوزنقه‌ای و ج) سرریز مستطیلی



شکل ۲. مشخصات هندسی سرریز کنگره‌ای ذوزنقه‌ای



شکل۳. پروفیل طولی سرریز کنگره‌ای ذوزنقه‌ای

سرریزهای چندوجهی در بار هیدرولیکی کم، مطلوب است (۱۰). تالیس و همکاران (۲۰۰۷) به بررسی رابطه دبی – اشل سرریزهای کنگره‌ای مستغرق پرداختند. آنها یک رابطه بی‌بعد برای هد مستغرق برای سرریز کنگره‌ای مستغرق و سرریز خطی مستغرق ارائه کردند (۱۳).

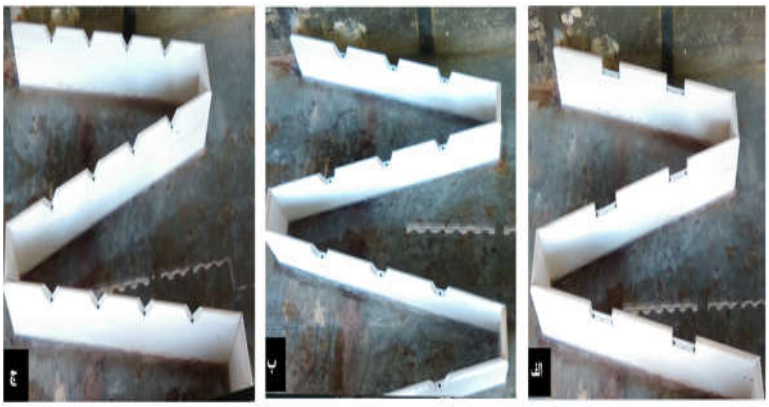
حیدرپور و همکاران (۱۳۸۵)، به بررسی سرریزهای چندوجهی با پلان مستطیلی و U شکل پرداختند. نتایج آنها نشان داده است که در مورد کلیه سرریزهای چندوجهی، ضریب دبی نسبت به H_t/P (H_t: بار هیدرولیکی کل و P ارتفاع سرریز) ابتدا افزایش یافته و پس از رسیدن به یک حداکثر، شروع به کاهش می‌کند (۱۱). آتشی و همکاران (۱۳۹۱) به ارزیابی الگوی جریان و تنش برشی در قوس ۹۰ درجه تند با حضور سرریز W شکل پرداختند. نتایج نشان داده است که حضور سرریز W شکل باعث می‌شود تا در بالادست محل نصب، توزیع عمقی جریان یکنواخت‌تر و اثر دو نیروی شیب عرضی فشار و گریز از مرکز به‌گونه‌ای اصلاح شوند که جریان-های ثانویه تشکیل نشود (۳). اژدری‌مقدم و جعفری ندوشن (۱۳۹۲)، به بررسی هندسه سرریز کنگره‌ای ذوزنقه‌ای با استفاده از مدل فازی- عصبی والگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی سد Ute در ایالت متحده آمریکا) پرداختند. در این پژوهش از قابلیت سیستم استنتاج فازی و الگوریتم ژنتیک برای بهینه کردن هندسه سرریز و ارضای شرایط هیدرولیکی مناسب استفاده شد. مقایسه نتایج حاصل از این روش با مقادیر موجود از وزن بتن به‌کار رفته در وضعیت فعلی تا ۱۳/۳۴ درصد کاهش هزینه‌ها را نشان می‌دهد که این مسئله بیانگر نتایج بسیار مناسب این روش است (۴). رضایی و همکاران (۱۳۹۴)، به مطالعه آزمایشگاهی سرریز کنگره‌ای مستطیلی پرداختند. نتایج نشان داد رابطه‌ای که از اکثر پارامترهای مؤثر استفاده شده است، نتایج دقیق‌تری را پیش‌بینی می‌کند و برای طراحی، قابل پیشنهاد است. برای ارتفاع آب بالادست ثابت، دبی سرریز کنگره‌ای حداکثر ۲/۶ برابر دبی سرریز مستقیم و در دبی ثابت، ارتفاع آب بالادست سرریز مستقیم ۱/۸ برابر ارتفاع آب بالادست سرریز کنگره‌ای است (۱۲). کروک‌استون و تولیس (۲۰۱۳)، به بررسی طراحی هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای: هوادهی، ناپایداری و ارتعاشات تیغه جریان، پرداختند. در این پژوهش نیز از دو شکل ربع‌دایره و نیم‌دایره برای تاج و زاویه ۳۵-۶ درجه برای دیواره سرریز استفاده شده است. شرایط رفتار تیغه ریزشی جریان از روی سرریز برای تغییرات در ضریب دبی، مدنظر قرار گرفت و یک تیغه چسبیده به دیواره از یک تیغه هوادهی شده، جزئی هوادهی شده و تیغه جریان مستغرق کاراتر است (۷). گوپتا و همکاران (۲۰۱۴) مشخصات جریان روی سرریزهای W شکل لبه تیز از پلان را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داده است که راندمان این نوع سرریزها بهتر از سرریزهای معمولی است. با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی انجام شده در این پژوهش، معادلاتی نیز برای دبی ارائه شده است. این معادلات با ۵ درصد نوسانات خطایی، مقدار دبی را محاسبه می‌کنند. حساسیت سرریز نسبت به هد آب نیز مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داده است که سرریز در هدهای کم و زوایای کوچک رأس بسیار حساس است (۸). گوستاوو و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی ضریب دبی سرریز کنگره‌ای با اجرای ابزار هیدرودینامیکی در بالادست پرداختند. در انجام این آزمایش‌ها از سه ابزار هیدرودینامیکی به طول‌های، ۶، ۱۲ و ۱۸ سانتی‌متر استفاده شده است. نتایج نشان داده است که این ابزارهای دینامیکی دبی را به‌میزان زیادی افزایش داده است (۹). بیلهان و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی آزمایشگاهی ظرفیت دبی سرریزهای کنگره‌ای با و بدون شکافنده‌های جریان پرداختند. نتایج نشان‌دهنده آن بوده است که قرار گرفتن تیغه‌های شکافنده جریان روی سرریزهای کنگره‌ای ذوزنقه‌ای و دایره‌ای باعث کاهش حدود ۴ درصدی ضریب دبی نسبت به حالت بدون تیغه شده است (۵). انیس و همکاران (۲۰۱۶) ضریب دبی جریان روی یک سیکل از سرریز کنگره‌ای ذوزنقه‌ای مرکب را تعیین کردند. نتایج نشان داده است که ضریب دبی ابتدا افزایش و سپس به‌تدریج کاهش داشته است. همچنین ضریب دبی برای زاویه ۶ درجه دیواره سرریز (بیشترین طول سرریز) کمترین

مقدار و با افزایش زاویه دیواره (کاهش طول سرریز)، افزایش نشان داده است (۲). احمدی و همکاران (۲۰۱۹)، به بررسی تأثیر دندانه و یک ردیف روزنه در امتداد و زیر لبه تاج سرریز بر راندمان سرریز کنگره‌ای پرداختند. نتایج نشان داده است که ایجاد دندانه و روزنه در امتداد تاج سرریز به‌ترتیب منجر به افزایش ضریب دبی بین ۱۱ تا ۲۵/۳ و ۳۱/۶ تا ۵۲/۹ درصد نسبت به سرریز کنگره‌ای ساده شده است (۱). هوادهی جریان در سرریزهای کنگره‌ای در مقایسه با سرریزهای خطی معمولی بهتر انجام می‌شود ولی همچنان این مبحث در سرریزهای کنگره‌ای می‌تواند موضوع بحث و بررسی باشد. سرریزهای کنگره‌ای الگوی جریان پیچیده‌ای را ایجاد می‌کنند که بر رفتار تیغه جریان ریزشی از روی سرریز اثر می‌گذارند که یکی از این مباحث، بحث هوادهی تیغه جریان است که بر رابطه دبی – اشل سرریز اثرگذار خواهد بود و با افزایش نسبت ارتفاع آب به ارتفاع سرریز (H_t / P)، اندازه این فضای خالی (هوا)، به‌صورت زمانی و مکانی تغییر خواهد کرد که این خود باعث غیریکنواختی و ناپایداری تیغه جریان خواهد شد و در صورت عدم هوادهی مناسب، باعث کاهش ضریب دبی جریان می‌شود. بنابراین در این مطالعه برای بررسی هوادهی به جریان با استفاده از یک سیستم جدید به نام دندانه با سه شکل هندسی مثلثی، مستطیلی و ذوزنقه‌ای در طول تاج سرریز به‌عنوان سیستم شکافنده جریان، سعی در بهبود هرچه بهتر هوادهی به تیغه جریان خواهیم بود. استفاده از دندانه‌های مثلثی، مستطیلی و ذوزنقه‌ای در سرریز کنگره‌ای ذوزنقه‌ای (در پلان) تا به حال مورد آزمایش قرار نگرفته‌اند. بنابراین هدف از انجام این پژوهش مطالعه و بررسی اثر شکل دندانه و ارتفاع، بر هیدرولیک جریان روی سرریزهای کنگره‌ای ذوزنقه‌ای در یک طول ثابت بوده است.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در یک کانال با طول، عرض و ارتفاع ۱۵، ۱ و ۰/۸ متر، در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان انجام شده است. این کانال توسط پمپی با حداکثر دبی ۲۰۰ لیتر بر ثانیه تغذیه می‌شد. تغییرات دبی توسط شیرفلکه‌ای که بلافاصله بعد از پمپ قرار داشت انجام می‌گرفت. آب از یک مخزن اصلی که در زیر کانال قرار داشت پمپاژ شده و به یک مخزن بزرگ که در ورودی کانال قرار داشته و وظیفه آرام کردن جریان را نیز به عهده داشته است وارد می‌شد. برای آرام کردن بیشتر جریان در ورودی کانال (بعد از مخزن ورودی)، تعدادی بلوک سیمانی در کف کانال، چند صفحه یونولیت در سطح آب و یک صفحه مشبک فلزی در ابتدای کانال اصلی قرار داده شد. کف این کانال از جنس ورق گالوانیزه و دیواره‌های آن هم از جنس شیشه بوده است. شکل ۴ شمایی کلی از کانال مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد. دبی جریان توسط یک سرریز خطی لبه‌تیز مستطیلی کالیبره شده که در پایین‌دست و در ورودی مخزن اصلی ذخیره آب قرار داشت اندازه‌گیری می‌شد. عمق آب روی این سرریز خطی توسط پیزومتر نصب شده در بدنه مخزن اصلی اندازه‌گیری می‌شد. عمق آب در کانال و روی سرریز کنگره‌ای نیز توسط یک عمق‌سنج دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شده که برای جابه‌جایی آن در طول کانال از یک کالسکه استفاده می‌شد. در این پژوهش از ۹ مدل سرریز کنگره‌ای ذوزنقه‌ای دندانه‌دار با سه شکل دندانه (مستطیل، ذوزنقه و مثلث) و سه ارتفاع مختلف و همچنین از یک سرریز معمولی (خطی) هم عرض با کانال با سه ارتفاع مختلف، و در مجموع ۱۲ مدل مختلف استفاده شده است. برای هر مدل نیز قرائت‌ها برای ۶ دبی مختلف انجام شده است. طول کل سرریز در تمام مدل‌ها ثابت و برابر ۳/۷۲ متر بوده است. با توجه به ابعاد و اندازه کانال، تمام مدل‌های سرریز کنگره‌ای دندانه‌دار در دو سیکل اجرا شدند. شکل ۵ شمایی از مدل مورد استفاده و جدول ۱ مشخصات کامل آنها را نشان می‌دهد. تمامی مدل‌های مورد استفاده در این پژوهش از جنس PVC فشرده

شکل ۴. کانال آزمایشگاهی به‌همراه تجهیزات آن



شکل ۵. مدل‌های مورد استفاده در پژوهش: الف) دندانه مستطیلی، ب) دندانه ذوزنقه‌ای و ج) دندانه مثلثی

جدول ۱. مشخصات مدل‌های مورد استفاده

شماره مدل	شکل پلان	ارتفاع سرریز (cm)	طول کل سرریز (m)	شکل دندانه	شماره مدل	شکل پلان	ارتفاع سرریز (cm)	طول کل سرریز (m)	شکل دندانه
۱	ذوزنقه‌ای	۱۵	۳/۷۲	مستطیلی	۷	ذوزنقه‌ای	۲۰	۳/۷۲	مستطیلی
۲	ذوزنقه‌ای	۱۵	۳/۷۲	ذوزنقه‌ای	۸	ذوزنقه‌ای	۲۰	۳/۷۲	ذوزنقه‌ای
۳	ذوزنقه‌ای	۱۵	۳/۷۲	مثلثی	۹	ذوزنقه‌ای	۲۰	۳/۷۲	مثلثی
۴	ذوزنقه‌ای	۱۷	۳/۷۲	مستطیلی	۱۰	ذوزنقه‌ای	۱۵	۱	–
۵	ذوزنقه‌ای	۱۷	۳/۷۲	ذوزنقه‌ای	۱۱	ذوزنقه‌ای	۱۷	۱	–
۶	ذوزنقه‌ای	۱۷	۳/۷۲	مثلثی	۱۲	ذوزنقه‌ای	۲۰	۱	–

با ضخامت ۱۶ میلی‌متر و تاج نیم‌دایره بوده است.

برای اینکه جریانی کاملاً توسعه یافته و نسبتاً آرام به‌سمت سرریز جریان داشته باشد، مدل‌ها تقریباً در ۶ متری از ابتدای کانال نصب می‌شدند. همان‌طوری که از جدول ۱ مشخص است، سه شکل مستطیل، ذوزنقه و مثلث برای بررسی اثر شکل دندانه و سه ارتفاع ۱۵، ۱۷ و ۲۰ سانتی‌متر برای بررسی اثر ارتفاع درنظر گرفته شد. همچنین برای مقایسه سرریز کنگره‌ای دندانه‌دار با سرریز معمولی (خطی) از یک سرریز خطی هم عرض کانال با سه ارتفاع ۱۵، ۱۷ و ۲۰ سانتی‌متراستفاده شد. معادله یک بعدی جریان روی سرریزهای کنگره‌ای به‌روش تحلیل ریاضی (با حل معادلات پیوستگی و انرژی)، و با فرضیات: شرایط جریان آزاد و پرتابی از روی یک سرریز معادل خطی و نرمال، توزیع هیدرواستاتیکی فشار در محدوده بالادست سرریز و صرف‌نظر از فشردگی تیغه جریان و افت انرزی به صورت رابطه (۱) به‌دست آمده است (۱۳):

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

با توجه به رابطه بالا ضریب دبی سرریز کنگره‌ای را می‌توان به‌صورت زیر محاسبه کرد:

$$C_d = Q/(2/3 L\sqrt{2g} H_t^{\frac{3}{2}}) \qquad (۲)$$

در روابط بالا Cd ضریب دبی سرریز، $Q(m^3/s)$ دبی جریان، H_t ارتفاع کل آب (مجموع بار استاتیکی روی سرریز و ارتفاع معادل سرعت)، $L(m)$ طول سرریز و $g(m/s^2)$ شتاب ثقل است.

آنالیز ابعادی

آنچه که در مطالعات آزمایشگاهی بایستی مورد توجه قرار گیرد این است که نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها را بتوان به شرایط واقعی و طبیعی تعمیم داد و بدون درنظر گرفتن ابعاد، از نتایج آن در شرایط واقعی و مشابه استفاده کرد. آنالیز ابعادی در واقع رابطی بین مدل آزمایشگاهی و نمونه واقعی موجود در طبیعت است که هدف از انجام آن، تعیین اعداد بدون بعدی بوده که ممکن است بر پدیده مورد نظر تأثیرگذار باشند. در این پژوهش، برای آنالیز ابعادی از روش پی-باکینگهام استفاده شده است. پارامترهایی که بر ضریب دبی سرریز کنگره‌ای ذوزنقه‌ای دندانه‌دار اثرگذار هستند را می‌توان به‌صورت رابطه ۳ نشان داد:

$$f(P, L, W, H_t, h, V, g, \sigma, \mu, \rho, C_d, ds) = 0 \qquad (۳)$$

در رابطه بالا P ارتفاع سرریز، L طول سرریز، W عرض کانال، $H_t = (h + V^2/2g)$ بار هیدرولیکی کل روی سرریز، h عمق جریان در بالادست، V سرعت جریان، g شتاب ثقل، σ کشش سطحی، μ لزجت دینامیکی سیال، ρ جرم مخصوص سیال، ds (dentate shape) (شکل دندانه) و C_d ضریب دبی جریان است. با استفاده از روش ذکر شده در بالا، رابطه ۳ به‌صورت رابطه کلی زیر نوشته می‌شود:

$$f(\frac{L}{P}, \frac{W}{P}, \frac{H_t}{P}, \frac{h}{P}, \frac{gP}{V^2}, \frac{\sigma}{\rho V^2 P}, \frac{\mu}{\rho V P}, C_d) = 0 \qquad (۴)$$

در روابط بالا با معکوس کردن سه پارامتر $gP/V^2, \sigma/\rho V^2 P, \mu/\rho VP$ و ضرب کردن این پارامترهای بدون بعد در پارامتر بدون بعد h/P یا P/h، اعداد بدون بعد رینولدز، وبر و فرود به‌دست می‌آید که به‌دلیل آشفتگی جریان می‌توان از عدد رینولدز و به‌دلیل عمق جریان بیشتر از ۲/۵ سانتی‌متر روی سرریز از عدد وبر صرف‌نظر کرد. درنهایت رابطه ۴ را می‌توان به‌صورت رابطه ۵ نوشت:

$$C_d = f(L/P, W/P, H_t/P, Fr) \qquad (۵)$$

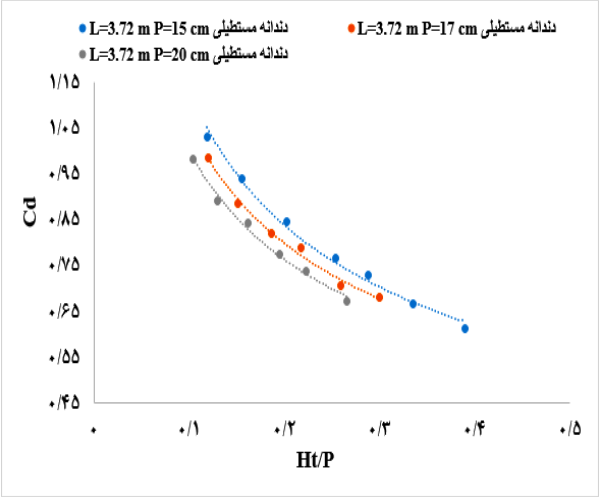
با تقسیم دو پارامتر بی‌بعد اول بر یکدیگر، معادله ۵ را می‌توان به‌صورت معادله ۶ نوشت:

$$C_d = f(L/W, H_t/P, Fr) \qquad (۶)$$

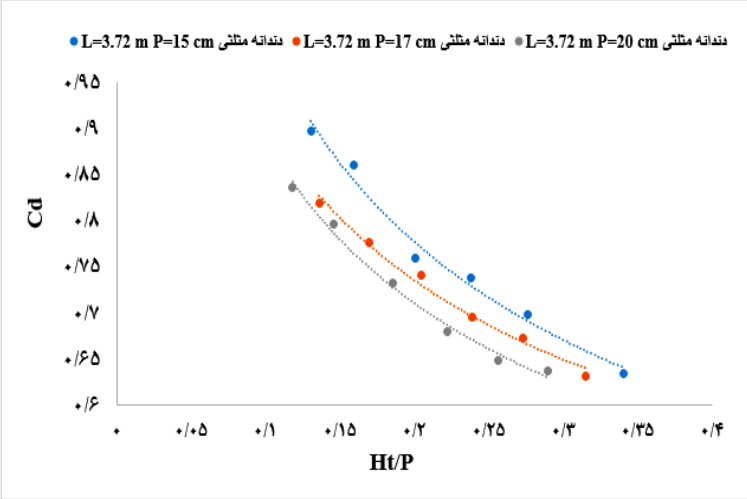
نتایج و بحث

الف- تأثیر ارتفاع سرریز

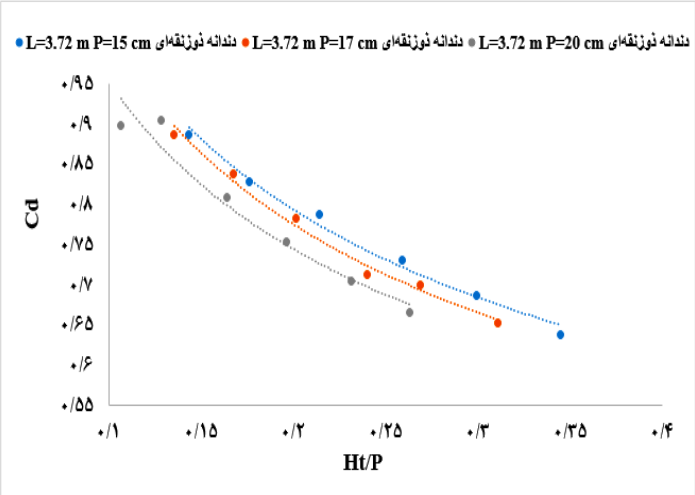
شکل‌های ۶، ۷ و ۸ به‌ترتیب اثر ارتفاع سرریز بر ضریب دبی جریان در سرریز کنگره‌ای دندانه‌دار با شکل دندانه مستطیل، مثلث و ذوزنقه را نشان می‌دهد. با توجه به شکل‌ها می‌توان



شکل ۶. تغییرات ضریب دبی در برابر H_t / P برای ارتفاع‌های مختلف با دندانه مستطیلی (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۷. تغییرات ضریب دبی در برابر H_t / P برای ارتفاع‌های مختلف با دندانه مثلثی (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۸. تغییرات ضریب دبی در برابر H_t / P برای ارتفاع‌های مختلف با دندانه ذوزنقه‌ای (رنگی در نسخه الکترونیکی)

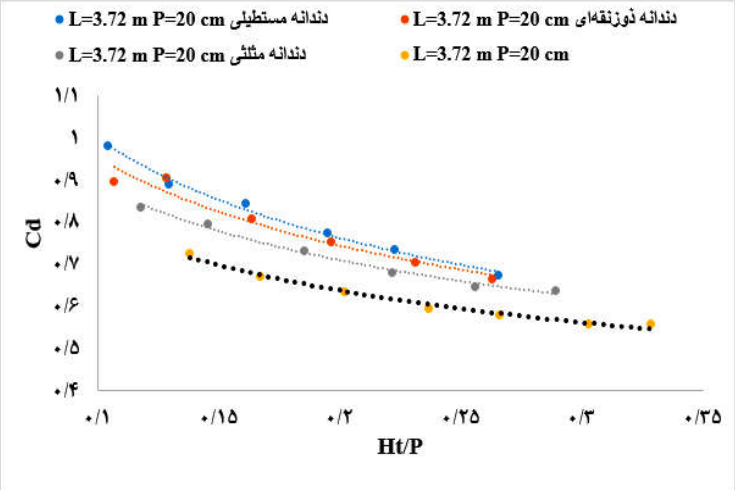
جدول ۲. نمونه‌ای از عمق جریان روی سرریز با ارتفاع‌های مختلف

h_d (mm)	P (cm)	شکل دندانه	L (m)	H_t / P
۳۱/۷۷	۱۵	مستطیل	۳/۷۲	۰/۲۵
۳۶/۷۴	۱۷	مستطیل	۳/۷۲	۰/۲۵
۴۳/۷۶	۲۰	مستطیل	۳/۷۲	۰/۲۵

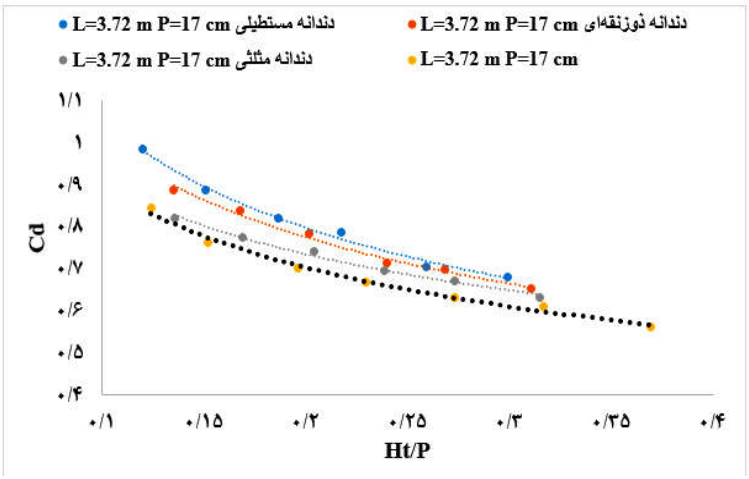
دریافت که در یک ارتفاع ثابت، با افزایش نسبت H_t / P، ضریب دبی روندی نزولی دارد و این موضوع را اینگونه می‌توان توجیه کرد که با افزایش بار هیدرولیکی بالادست، تداخل تیغه‌های ریزشی جریان از روی سرریز در پایین‌دست بیشتر شده و استغراق موضعی ایجاد شده باعث کاهش ضریب دبی جریان می‌شود. همچنین در یک H_t / P و شکل دندانه ثابت، با افزایش ارتفاع سرریز، ضریب دبی کاهش پیدا کرده است. دلیل این موضوع را نیز اینگونه می‌توان بیان کرد که در آزمایش‌های انجام شده، با افزایش ارتفاع سرریز، عمق جریان بالادست، افزایش پیدا کرده است و با افزایش هد بالادست، تداخل تیغه‌های ریزشی در پایین‌دست سرریز بیشتر شده و باعث تشکیل استغراق موضعی در این ناحیه می‌شود و همان‌طوری که در بالا نیز به آن اشاره شد، ایجاد این استغراق موضعی باعث کاهش ضریب دبی شده است. برای نمونه در جدول ۲ عمق آب بالادست روی سرریز در یک نسبت H_t / P، طول و شکل دندانه ثابت، نشان داده شده است. همان‌طوری که مشخص است با افزایش ارتفاع سرریز، عمق آب روی آن نیز زیاد شده است. نتایج پژوهش حاضر با نتایج پژوهش پژوهشگرانی چون بیلهان و همکاران (۵)، انیس و همکاران (۱۳) و احمدی و همکاران (۱) مطابقت نشان می‌دهد. در مطالعات انجام شده توسط این پژوهشگران، نتایج اینگونه بوده است که با افزایش نسبت هد کلی آب در بالادست سرریز به ارتفاع آن (H_t / P)، ضریب دبی روندی نزولی داشته است که در این پژوهش نیز روند کاهشی ضریب دبی با افزایش نسبت (H_t / P)مشاهده شد.

ب- تأثیر شکل دندانه

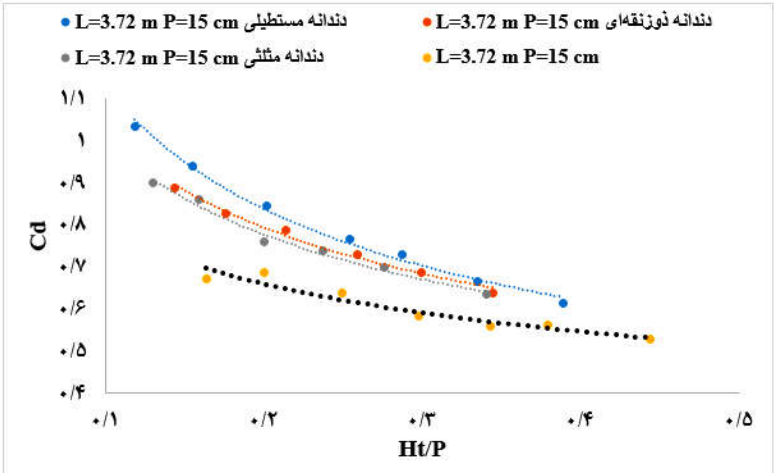
شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ تغییرات ضریب دبی در برابر H_t / P برای شکل‌های مختلف دندانه در ارتفاع‌های متفاوت را نشان می‌دهند. همان‌طوری که در شکل‌ها نیز نشان داده شده است، در یک ارتفاع، طول و H_t / P ثابت، دندانه مستطیل شکل، بیشترین و مثلثی کمترین ضریب دبی را دارا هستند. یعنی با تغییر شکل دندانه‌ها از مستطیل به مثلث، ضریب دبی جریان کاهش پیدا کرده است. این روند در هر سه ارتفاع ۱۵، ۱۷ و ۲۰ سانتی‌متر نیز قابل مشاهده است. از آنجایی که ارتفاع سرریز ثابت است، بنابراین در یک H_t / P ثابت، با تغییر شکل دندانه از مستطیل به ذوزنقه و مثلث، عمق آب روی سرریز در بالادست افزایش می‌یابد. با افزایش این هد در بالادست، تداخل تیغه‌های ریزشی در پایین‌دست سازه بیشتر شده و به‌تبع آن، استغراق موضعی نیز بیشتر می‌شود. همان‌طور که در موارد بالا نیز به آن اشاره شد، این استغراق موضعی مانعی در برابر عبور جریان بوده و باعث کاهش ضریب دبی جریان می‌شود. با توجه به رابطه دبی در سرریزهای کنگره‌ای (رابطه ۱) و همچنین رابطه محاسبه ضریب دبی (رابطه ۲)، دلیل کاهش ضریب دبی در یک ارتفاع، طول و نسبت H_t / P ثابت را با توجه به روابط، اینگونه نیز می‌توان بیان داشت که با ثابت بودن ارتفاع سرریز (P) و نسبت H_t / P، مقدار بار هیدرولیکی کل (H_t) در بالادست نیز ثابت خواهد بود، یعنی در رابطه ۲ تمام پارامترها ثابت خواهند بود غیر از دبی جریان، که دبی جریان در سرریز با دندانه مستطیلی بیشترین و دندانه مثلثی کمترین مقادیر را دارند. بنابراین در یک ارتفاع و طول ثابت سرریز و در یک



شکل ۹. تغییرات ضریب دبی در برابر H_t / P برای شکل‌های مختلف دندانه (L=۳/۷۲ m P=۲۰ cm) (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۱۰. تغییرات ضریب دبی در برابر H_t / P برای شکل‌های مختلف دندانه (L=۳/۷۲ m P=۱۷ cm) (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۱۱. تغییرات ضریب دبی در برابر H_t / P برای شکل‌های مختلف دندانه (L=۳/۷۲ m P=۱۵ cm)
(رنگی در نسخه الکترونیکی)

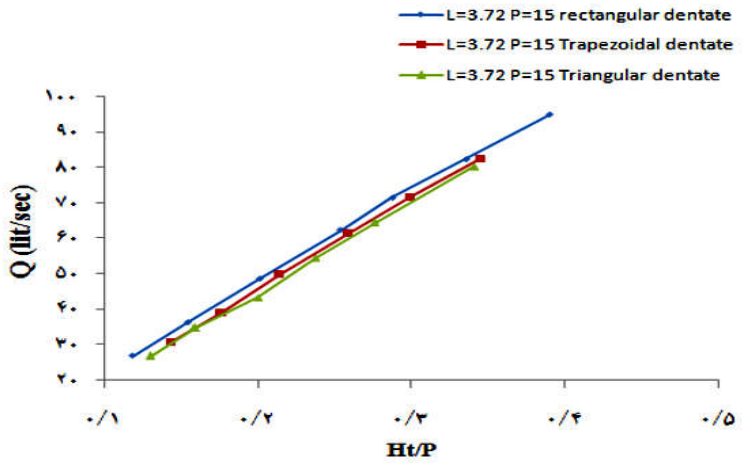
نسبت H_t / P ثابت، ضریب دبی سرریز با دندانه مستطیلی بیشترین و مثلثی کمترین مقدار را دارا خواهند بود.

از جمله مشکلاتی که در شبکه‌های آبیاری با آن روبه‌رو هستیم، تغییرات میزان دبی عبوری از سازه آبگیر به‌دلیل نوسانات شدید سطح آب در مجرای اصلی است. بر اساس رابطه دبی و بارهیدرولیکی در سرریزها، با افزایش طول تاج سرریز می‌توان از شدت این نوسانات کم کرد. برای افزایش طول تاج سرریز در یک عرض ثابت می‌توان از سرریزهای کنگره‌ای استفاده کرد. معیار اصلی در طرح سرریزهای کنگره‌ای، افزایش ظرفیت انتقال جریان روی سرریز با تاج ثابت و به‌ازای ارتفاع معین سطح آب در بالادست سرریز است. در یک ارتفاع آب بالادست یکسان، سرریزهای کنگره‌ای نسبت به سرریزهای خطی معمولی (نرمال یا هم عرض با کانال) دبی بیشتری را به‌دلیل طول بیشتر، از خود عبور می‌دهند. همان‌طوری که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، در یک نسبت ثابت بار هیدرولیکی کل در بالادست سرریز به ارتفاع سرریز (H_t / P)، دبی عبوری از سرریز کنگره‌ای دندانه‌دار با شکل دندانه مستطیل بیشترین مقدار و با شکل دندانه مثلث کمترین مقدار را دارد. شکل ۱۳ نیز مقایسه بین دبی عبوری از سرریز کنگره‌ای دندانه‌دار با سه شکل مختلف دندانه و سرریز خطی با ارتفاع‌های یکسان را نشان می‌دهد. همان‌طوری که مشخص است، در یک H_t / P ثابت، دبی عبوری از سرریز کنگره‌ای دندانه‌دار به مراتب بیشتر از سرریز خطی در یک هد بالادست یکسان است. برای نمونه، دبی عبوری از سرریز کنگره‌ای دندانه‌دار با شکل دندانه مستطیل با ارتفاع سرریز ۱۵ سانتی‌متر، تقریباً ۲/۵ برابر سرریز خطی با همین ارتفاع است. شکل ۱۴ نیز مقایسه دبی عبوری از سرریز کنگره‌ای دندانه‌دار با شکل دندانه مستطیلی در سه ارتفاع ۱۵، ۱۷ و ۲۰ سانتی‌متر و مقایسه آن با سرریز خطی را نشان می‌دهد. همان‌طوری که مشخص است، در یک طول ثابت و شکل دندانه مشخص، در یک H_t / P ثابت، با افزایش ارتفاع سرریز، دبی عبوری نیز افزایش می‌یابد. این افزایش دبی را اینگونه می‌توان توجیه کرد، از آنجایی که ارتفاع سرریز افزایش می‌یابد، برای اینکه نسبت H_t / P ثابت باقی بماند، بایستی مقدار H_t (بار هیدرولیکی کل در بالادست) نیز افزایش یابد، با افزایش هد بالادست، دبی عبوری نیز افزایش می‌یابد.

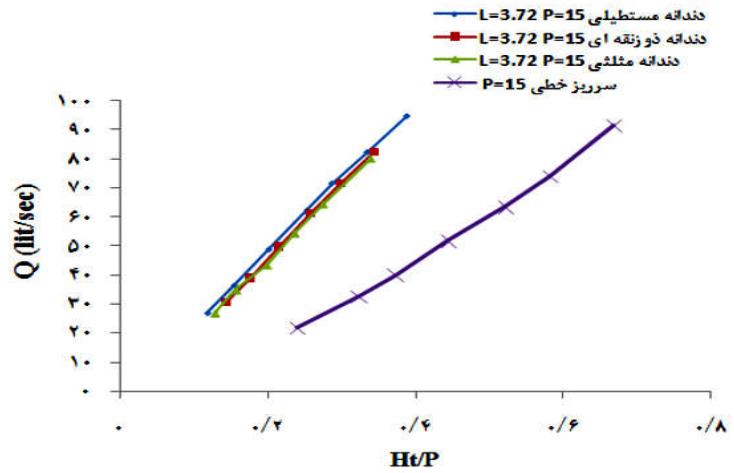
با توجه به اینکه روند نمودار شکل ۱۴ برای ارتفاع‌های دیگر نیز مشابه بوده است به‌همین خاطر از ارائه آنها خودداری شده است. با توجه به مطالبی که در بالا به آنها اشاره شده است، سرریزهای کنگره‌ای در یک دبی یکسان، نسبت به سرریزهای خطی، ارتفاع آب کمتری را در بالادست سازه ایجاد می‌کنند که این موضوع باعث می‌شود تا سرریزهای کنگره‌ای در کاهش نوسانات سطح آب بالادست و تنظیم هرچه بهتر آن، نسبت به سرریزهای خطی بهتر عمل کنند. همان‌طور که در شکل ۱۵ نشان داده شده است، در یک عدد فرود یکسان، سرریز کنگره‌ای، عمق آب کمتری نسبت به سرریز خطی در بالادست سازه ایجاد کرده است که این موضوع نشان‌دهنده کارایی بهتر سرریزهای کنگره‌ای نسبت به سرریزهای خطی در کنترل نوسانات سطح آب در بالادست است. اگر بخواهیم به‌طور میانگین بیان کنیم، سرریز خطی نسبت به سرریز کنگره‌ای دندانه‌دار حدوداً ۲/۸ برابر در بالادست عمق ایجاد می‌کند. همچنین از شکل ۱۵ می‌توان دریافت که سرریز کنگره‌ای دندانه‌دار نسبت به سرریز کنگره‌ای بدون دندانه، عمق آب کمتری در بالادست ایجاد می‌کند که به‌طور متوسط عمق آب ایجاد شده در بالادست، در سرریز کنگره‌ای بدون دندانه حدوداً ۱/۲ برابر بیشتر از سرریز کنگره‌ای با دندانه است. این نتیجه بیانگر این موضوع است که با دندانه‌دار کردن سرریز کنگره‌ای ذوزنقه‌ای در طول تاج، می‌توان نوسانات سطح آب در بالادست را بیشتر کاهش داد.

استخراج رابطه ضریب دبی

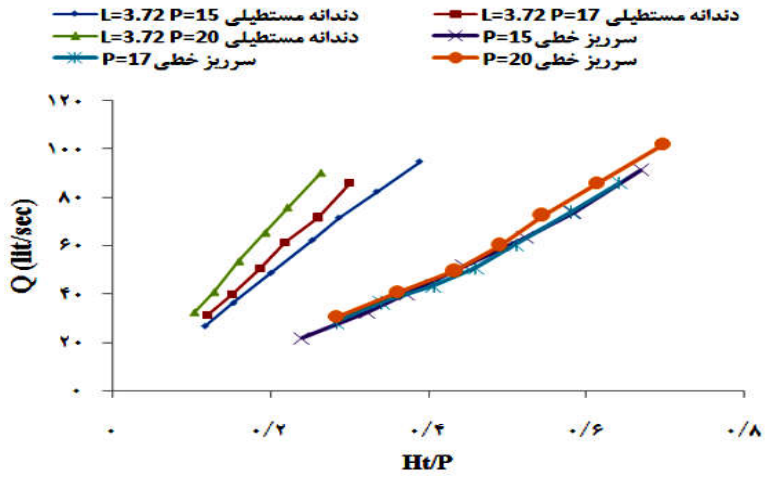
برای به‌دست آوردن رابطه‌ای برای ضریب دبی، از ۷۵ درصد داده‌های آزمایشگاهی این پژوهش استفاده شده و از ۲۵ درصد باقیمانده داده‌ها نیز برای صحت‌سنجی رابطه ارائه شده استفاده



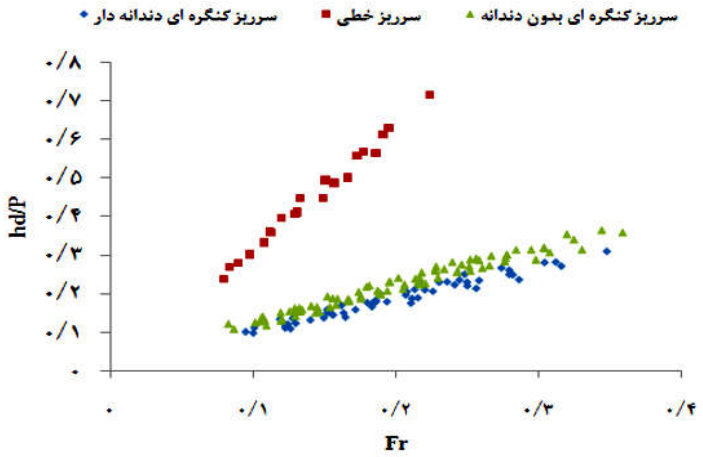
شکل ۱۲. مقایسه دبی در سرریز کنگره‌ای برای شکل‌های مختلف دندانه در طول و ارتفاع ثابت (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۱۳. مقایسه بین دبی عبوری از سرریز کنگره‌ای دندانه‌دار با سه شکل مختلف دندانه و سرریز خطی با ارتفاع‌های یکسان (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۱۴. مقایسه دبی عبوری از سرریز کنگره‌ای دندانه‌دار با شکل دندانه مستطیلی در سه ارتفاع ۱۵، ۱۷ و۲۰ سانتی‌متر و مقایسه آن با سرریز خطی (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۱۵. مقایسه ارتفاع آب بالادست در سرریز خطی، کنگره‌ای با دندانه و بدون دندانه (رنگی در نسخه الکترونیکی)

شده است. برای استخراج این رابطه از شرایط جریان در حالت آزاد استفاده شده و شکل معادله مورد استفاده نیز بر اساس معادله کروک‌استون (معادله ۷) بوده است:

$$C_d = A*\left(\frac{H_t}{P}\right)^{B*\left(\frac{H_t}{P}\right)^C} + D \qquad (۷)$$

که A، B، C و D ضرایبی هستند که از طریق داده‌های آزمایشگاهی به‌دست می‌آیند. مقادیر این ضرایب و همچنین همبستگی بین H_t/P و C_d و متوسط خطای آن که بر اساس معادله (۸) به‌دست آمده است در جدول ۳ ارائه شده است:

$$e = \frac{100}{N}\sum_{i=1}^{N}\left[\frac{Q_{computed} - Q_{observed}}{Q_{observed}}\right] \qquad (۸)$$

برای به‌دست آوردن معادله ضریب دبی از تمام داده‌ها استفاده نشده است بلکه برای این منظور ۷۵ درصد داده‌ها به‌کارگیری شده و از ۲۵ درصد باقیمانده داده‌ها برای ارزیابی رابطه ارائه شده استفاده شده است. بعد از محاسبه ضرایب دبی، مقادیر دبی محاسباتی نیز به‌دست آمده و با مقادیر متناظر دبی مشاهداتی در آزمایشگاه مورد مقایسه قرار گرفت. شکل ۱۶ نشان می‌دهد که متوسط خطای به‌دست آمده بین دبی محاسباتی و مشاهداتی $\pm 3.22\%$ بوده که حاکی از دقت مناسب رابطه ضریب دبی حاصل از داده‌های آزمایشگاهی است. همچنین در شکل ۱۷ می‌توان مقایسه ضرایب دبی مشاهداتی و محاسباتی را نیز مشاهده کرد. همان‌طوری که از شکل نیز مشخص است ضرایب دبی مشاهداتی و محاسباتی اختلاف چنداتی ندارند و متوسط خطای به‌دست آمده بین آنها همانند مقایسه دبی‌ها $\pm 3.22\%$ است.

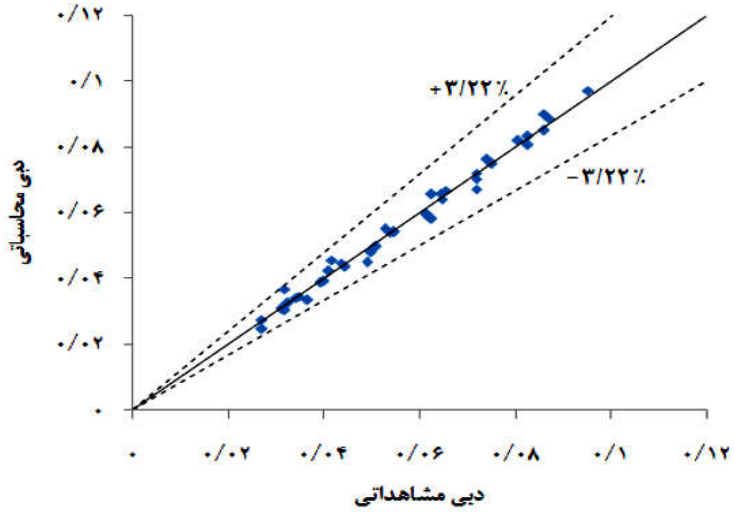
نتیجه‌گیری

سرریزهای کنگره‌ای به‌دلیل داشتن طول تاج بیشتر نسبت به یک سرریز خطی معمولی در یک عرض مشخصی از کانال، در یک بار آبی یکسان در بالادست، دبی بیشتری از خود عبور می‌دهند. به‌همین دلیل، در مکان‌هایی که مشکل محدودیت عرضی مقطع احداث سرریز وجود دارد و یا در جاهایی که امکان آبگیری زمین‌های بالادست به‌وجود می‌آید، سرریزهای کنگره‌ای بهترین گزینه برای مرتفع کردن این مشکلات است. در این پژوهش، از یک سرریز کنگره‌ای با طول ثابت ۳/۷۲ متر، سه ارتفاع ۱۵، ۱۷ و ۲۰ سانتی‌متر، سه شکل مختلف دندانه (مستطیل، مثلث و ذوزنقه) و یک سرریز خطی هم عرض کانال با سه ارتفاع اشاره شده در بالا، استفاده شده است. نتایج حاصله عبارتند از:

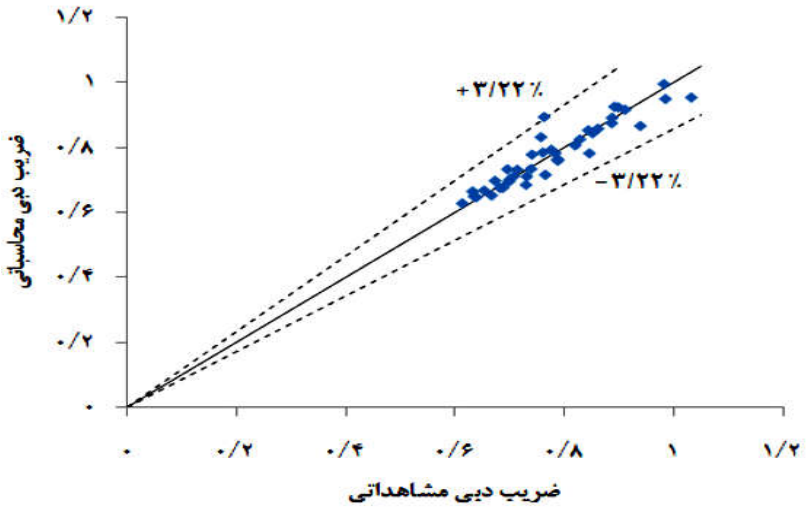
۱- نتایج نشان داده است که در یک طول و ارتفاع ثابت، با افزایش نسبت هد آب بالادست به ارتفاع سرریز (H_t/P)

جدول ۳. مقادیر ضرایب ثابت،ضریب همبستگی و درصد خطا رابطه ۶

A	B	C	D	R^2	e (درصد خطا)
۱/۰۱۳۲	۵/۹۴۱	۱/۴۴۲	۰/۳۸۶۶	۰/۹۴۱	۳/۲۲



شکل ۱۶. مقایسه دبی مشاهداتی در برابر دبی محاسباتی



شکل ۱۷. مقایسه ضریب دبی مشاهداتی در برابر ضریب دبی محاسباتی

ضریب دبی کاهش یافته است. ۲- برای یک طول مشخص از سرریز و در یک H_t/P ثابت، با افزایش ارتفاع سرریز، ضریب دبی کاهش یافته است. ۳- در یک عدد فرود یکسان، عمق آب ایجاد شده در بالادست سرریز خطی و سرریز کنگره‌ای ذوزنقه‌ای بدون دندانه به‌طور متوسط ۳/۳ و ۱/۲ برابر سرریز کنگره‌ای دندانه‌دار است. ۴- از بین سه شکل مختلف دندانه (مستطیل، ذوزنقه و مثلث)، دندانه مستطیل شکل بهترین عملکرد و دندانه مثلثی ضعیف‌ترین عملکرد را داشته‌اند.

پیشنهادها

با توجه به پیشرفت مدل‌های عددی در علوم مختلف و همچنین علوم مهندسی آب، پیشنهاد می‌شود که این قبیل پژوهش‌های آزمایشگاهی با مدل‌های عددی نیز اجرا شده و با یکدیگر مورد مقایسه قرار گیرند. همچنین می‌توان اثر شکل‌های دیگر دندانه، تعداد و ابعاد دندانه‌ها را نیز بر ضریب دبی و دبی عبوری از سرریزها مورد بررسی قرار داد.

منابع مورد استفاده

1. Ahmadi, Z., S. A. Mohseni Movahed and J. Mozafari. 2019. The effects of dentate crest and a row of consecutive orifices along and below the crest edge on labyrinth weir efficiency. *Canadian Journal of Civil Engineering* 1-15.
2. Anees, K. I., A. Riyadh, A. Lioyd, H. C. Chua and D. Subrat D. 2016. Determination of discharge coefficient for flow over one cycle compound trapezoidal plan form labyrinth weir. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)* 7(4): 314-328.
3. Atashi, V., M. Shafaei Bajestan and J. Vahedian. 2012. Evaluation of flow pattern and shear stress at 90-degree arc with W shape weir. *Journal of Water Resources Engineering* 5: 17-34. (In Farsi).
4. Azhdari Moghadam, M. and A. Jafari Nadoshan. 2013. Hydraulic design of trapezoidal labyrinth weir using computational hydrodynamics. *Journal of Modarres Omran* 13(2): 1-12. (In Farsi).
5. Bilhan, O., M. Emin Emiroglu and C. J. Miller. 2016. Experimental investigation of discharge capacity of labyrinth weirs with and without nappe breakers. *World Journal of Mechanics* 6: 207-221.
6. Crookston, B. M. 2010. Labyrinth weirs. PhD thesis. Utah State University.
7. Crookston, B. M. and B. P. Tullis. 2013. Hydraulic design and analysis of labyrinth weirs. II: Nappe aeration, instability, and vibration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE* 371-377.
8. Gupta, K. K., S. Kumar and Z. Ahmad. 2014. Flow characteristics of sharp-crested W-planform weirs. *International Journal of Advanced Technology & Engineering Research (IJATER)* 176-180.
9. Gustavo, A., F. Delgado, A. P. Mann, J. Fernando and S. Camino. 2015. Discharge coefficients spillways labyrinth implementing hydrodynamic devices in the upstream side. E-proceedings of the 36th IAHR World Congress, The Hangue, The Netherland.
10. Hay, N. and G. Taylor. 1970. Performance and design of labyrinth Weir. *Journal of Hydraulic Engineering* 96(11): 2337-2357.
11. Heydarpour, M., S. F. Mosavi and A. R. Roshani Zarmehri. 2006. Investigation of multi-dimensional weirs with rectangular and U shape plan. *Journal of Agriculture Science and Technology and Natural Resources* 10(3-a): 1-11. (In Farsi).
12. Rezaee, M., A. R. Emadi and Gh. Aghajani Mazandarani. 2015. Experimental study of rectangular labyrinth weir. *Journal of Water and Soil (Agriculture Science and Technology)* 6(29): 1438-1446. (In Farsi).
13. Tullis, B. P., J. C. Young and M. A. Chandler. 2007. Head-Discharge relationships for submerged labyrinth weirs. *Journal of Hydraulic Engineering* 133(3): 248-254.
14. Yasi, M. and M. Mohammadi. 2007. Investigation of labyrinth weir with arched plan. *Journal of Agriculture Science and Technology and Natural Resources* 11(41-a): 1-12. (In Farsi).

Journal of Water and Soil Science
Vol. 25, No. 3, Fall 2021, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Experimental Study of Discharge Coefficient at the Dentate Trapezoidal Labyrinth Weir

S. J. Meshkavati Toroujeni[1], A. A. Dehghani[2*], A. R. Emadi[1] and M. Masoudian[1]

(Received: September 2-2019; Accepted: January 20-2021)

Abstract

One of the crucial problems that exist in the irrigation networks is the fluctuation of the water surface flow in the main channel and changes in the flow rate of the intake structure. One of the effective methods to decrease these fluctuations is increasing the weir crest length at the given width of the channel with the use of the labyrinth weirs can be achieved for this purpose. The labyrinth weir is the same linear weir that is seen as broken in the plan view. In this study, a labyrinth weir with a length of 3.72 m, three different heights of 15, 17, and 20 cm, three different shapes of dentate (rectangular, triangular, and trapezoidal), and a linear weir were used in a recirculating flume with 15 m length and 1 m width. The result showed that for a given length and height of weir, with the increasing of the upstream water head to the weir height ratio (H_t / P), the discharge coefficient decreases. The results showed that by increasing weir height, the discharge coefficient decreases for a given length of the weir. Linear weir and labyrinth weir without dentate create more water depth at the upstream by 3.3 and 1.2 fold compared with dentate labyrinth weir.

Keywords: Flow discharge, Trapezoidal labyrinth weir, Hydraulic structure, Dentate, Experimental investigation

1. Department of Water Engineering, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran.
2. Department of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.
Corresponding author, Email: a.dehghani@gau.ac.ir