

بررسی آزمایشگاهی تأثیر شعاع قوس بر ضریب دبی در سرریزهای قوسی خطی و قوسی زیگزاگی با پلان مثلثی

رضا منجزی^۱، محمد حیدرنژاد^{۲*}، علیرضا مسجدی^۲، محمدحسین پورمحمدی^۳ و امیرعباس کمان به‌دست^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۸/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۳/۱۹)

چکیده

سرریزهای غیرخطی از سازه‌های هیدرولیکی مهم برای تنظیم سطح آب و کنترل جریان در کانال‌ها، رودخانه‌ها و مخازن سدها به‌شمار می‌روند. از انواع سرریزهای غیرخطی می‌توان به سرریزهای زیگزاگی و قوسی اشاره کرد. محور تاج این سرریزها به‌صورت غیرخطی بوده و در یک عرض معین، طول تاج بیشتری نسبت به سرریزهای متداول خطی دارند. به این ترتیب به‌ازای یک بار هیدرولیکی یکسان، توانایی عبور دبی بیشتری را دارند. در این پژوهش، ضریب دبی و دبی عبوری سرریزهای قوسی با سه شعاع قوس مختلف و در دو حالت خطی و زیگزاگی مثلثی به‌صورت آزمایشگاهی بررسی و ضریب دبی این سرریزها به‌عنوان تابعی از نسبت بار هیدرولیکی کل به ارتفاع تاج سرریز (h_d/P) و زاویه انحنای قوس (θ) (یا شعاع قوس) ارائه و عملکرد هیدرولیکی آنها با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که به‌ازای بار هیدرولیکی یکسان، افزایش θ (کاهش شعاع قوس) منجر به کاهش ضریب دبی می‌شود زیرا اولاً برآمدگی موضعی سطح آب افزایش یافته و ثانیاً جریان برای طی مسیر کانال، مجبور به طی مسیری غیرمستقیم با انحنای بیشتر است که این دو موضوع می‌تواند اثر منفی بر ضریب آبگذری داشته باشد بدین‌صورت که در نسبت بار هیدرولیکی $0/2$ ، ضریب جریان در سرریز با نسبت شعاع قوس $R/w = 1/25$ حدود $8/5$ درصد از سرریز با نسبت شعاع قوس $R/w = 0/75$ بیشتر است.

واژه‌های کلیدی: سرریز قوسی زیگزاگی مثلثی، سرریز قوسی، بار آبی، شعاع قوس، ضریب دبی.

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

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

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

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: mo_he3197@yahoo.com

مقدمه

پژوهش‌های آزمایشگاهی چنانچه تراز آب پایین‌دست از تراز تاج سرریز بیشتر شود، سرریز مستغرق شده و این امر تأثیر منفی بر ضریب آبگذری سرریز خواهد داشت.

مطالعات پیرامون فشار هوای زیر تیغه جریان خروجی از سرریز حاکی از آن است که با کاهش فشار هوا، انحنای جریان بیشتر شده و ضریب آبگذری افزایش می‌یابد. البته باید توجه داشت که اگر هوای زیر جریان به‌صورت نامنظم تغییر کند، جت جریان نوسان کرده که می‌تواند خرابی سرریز را در پی داشته باشد. در این زمینه، باس (۴) رابطه‌ای را برای محاسبه بیشینه هوای مورد نیاز برای سرریز ارائه کرد.

تا پیش از دهه ۷۰ میلادی تنها چند پژوهشگر به پژوهش بر روی سرریزهای زیگزاگی پرداختند (۱۰ و ۲۶). نخستین پژوهش‌های جدی روی این نوع سرریزها توسط تیلور (۲۵)، هی و تیلور (۱۴) به انجام رسید. آنان برای نشان دادن عملکرد سرریزهای زیگزاگی، از نسبت دبی سرریز زیگزاگی به دبی سرریز خطی استفاده کردند.

به‌منظور بررسی اثر لزجت و کشش سطحی بر آبگذری سرریزها، پژوهش‌های مختلفی به انجام رسیده است (۱۱، ۱۲، ۱۷، ۲۱، ۲۲ و ۲۴) و روابط جداگانه‌ای را بدین‌منظور ارائه کردند. تجربیات آزمایشگاهی توصیه‌های مختلفی را برای حذف اثر لزجت و کشش سطحی در جریان عبوری از سرریز بیان داشته است. کیندسواتر و کارتر (۱۷) اعلام داشتند که اثر نادیده گرفتن لزجت و کشش سطحی با افزایش ارتفاع آب به اندازه یک میلی‌متر و کاهش عرض سرریز به اندازه ۰/۹ میلی‌متر می‌تواند جبران شود. رانگاراجو و آساوا (۲۱) عمق ۱۱ سانتی‌متر را به‌عنوان کمینه عمق آب روی سرریز برای حذف اثر لزجت و کشش سطحی معرفی کردند. این در حالی است که بیشتر مراجع عمق در حدود ۲/۵ سانتی‌متر را برای این منظور معرفی کرده‌اند (۱ و ۱۵).

پیرو تحقیقات هاستون (۱۶) در مورد توسعه سرریز زیگزاگی به داخل مخزن، کروکستون و تولیس (۶) نیز حالات مختلف قرارگیری سرریز در داخل مخزن را بررسی

سرریزهای زیگزاگی سازه‌های هیدرولیکی مهم جهت تنظیم سطح آب و کنترل جریان در کانال‌ها، رودخانه‌ها و مخازن سدها به‌شمار می‌آیند. در نمایش سطح افق، این نوع سرریزها با هندسه مثلثی، مستطیلی، ذوزنقه‌ای و یا قوسی با تناوب مناسبی در عرض جریان قرار می‌گیرند. فرضیه اصلی در توسعه طرح زیگزاگی سرریزها، افزایش ظرفیت انتقال جریان روی سرریز از طریق افزایش طول تاج سرریز در یک محدوده معین عرضی بوده است.

سرریزها نقش تعیین‌کننده‌ای در ایمنی سدها دارند. تقریباً شکست ۳۰ درصد سدها در نتیجه ناکافی بودن ظرفیت تخلیه سرریز آنها بوده است. در شرایطی که محل احداث سرریز با محدودیت در عرض و سطح آب در بالادست مواجه باشد، استفاده از سرریزهای کنگره‌ای به‌عنوان یک راه حل مؤثر و اقتصادی برای افزایش ظرفیت تخلیه سرریز مطرح می‌شود (۲۳). بخش قابل‌توجهی از هزینه‌های مربوط به ساخت سد را سرریزها به‌خود اختصاص می‌دهند. برای اطمینان از ایمنی سدها، کارشناسان مجبور به انتخاب سیلاب‌های با دوره بازگشت بالا، به‌عنوان سیلاب طراحی سرریزها هستند. سرریز قوسی، کمائی از یک دایره است که افزایش طول مؤثر تاج سرریز را در یک عرض مشخص ممکن می‌سازد و بدین‌ترتیب می‌توان به‌ازای یک بار هیدرولیکی یکسان، دبی بیشتری را از سرریز عبور داد (۸).

با توجه به هیدرولیک جریان عبوری، اشکال مختلفی برای مقطع عرضی سرریز از جمله مستطیلی، مثلثی، ذوزنقه‌ای، دایره‌ای و غیره ارائه شده است (۲، ۴، ۷ و ۲۰)

دسته‌بندی دیگر سرریزها بر اساس نوع تیغه و ارتفاع آب روی تاج است که بر این اساس به سه دسته لبه تیز، لبه پهن و اوجی تقسیم می‌شوند. بر اساس این تقسیم‌بندی چنانچه عمق آب روی تاج سرریز از ۱/۵ برابر ضخامت تاج در جهت جریان بیشتر شود، سرریز لبه تیز محسوب می‌شود (۱۳ و ۲۸).

سرریزها بر اساس ارتفاع آب پایین‌دست نیز به دو دسته آزاد و مستغرق تقسیم‌بندی می‌شوند (۲۷ و ۲۹). بر اساس

برای سرریزهای جانبی و سرریزهای زیگزاگی دوزنقه‌ای، مستطیلی و مثلثی به صورت تجربی برای شرایط جریان آزاد و مستغرق ارزیابی کردند. بر اساس نتایجی که از این پژوهش حاصل شد، سرریز زیگزاگی به دلیل داشتن طول تاج بیشتر می‌تواند جریان بیشتری را به‌ازای بارهیدرولیکی کمتر عبور دهد و در مقابل، هد بالادست سرریز زیگزاگی در مواقع سیلابی بیشتر از یک سرریز جانبی است. ضمن آنکه سرریز جانبی در شرایط جریان مستغرق بهتر عمل می‌کند.

علیرغم اینکه ساخت سرریز بسیاری از سدها به صورت زیگزاگی انجام شده است ولیکن بررسی منابع موجود نشان می‌دهد که مطالعات پیشین به‌طور عمده روی سرریزهای زیگزاگی خطی بوده است، لذا نظر به مزایای بالای سرریزهای زیگزاگی قوسی و اینکه تحقیقات در این عرصه در مراحل اولیه است و از آنجایی که سرریزهای قوسی به‌عنوان یکی از گزینه‌های افزایش طول سرریز مطرح هستند، در این پژوهش، اثر قوسی کردن سرریز خطی و زیگزاگی و بارهیدرولیکی بالادست بر عملکرد هیدرولیکی و ضریب دبی سرریزها مورد بررسی قرار گرفته است.

پارامترهای هندسی و هیدرولیکی سرریزهای زیگزاگی قوسی
 شکل (۱- الف و ب) به ترتیب پلان و مقطع طولی یک سرریز قوسی خطی و زیگزاگی قوسی قرار گرفته در داخل کانال را نشان می‌دهد. دبی عبوری از سرریزهای زیگزاگی با استفاده از رابطه عمومی سرریزها محاسبه شده است:

$$Q = \frac{2}{3} C_d L_c \sqrt{2gh_d}^{3/2} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، Q دبی عبوری از سرریز، L_c طول مشخصه (مانند طول تاج سرریز)، g شتاب ثقل و h_d بارهیدرولیکی کل، C_d ضریب آگذری بدون بعد است که از طریق انجام آزمایش تعیین می‌شود.

پس از انجام آنالیز ابعادی و حذف پارامترهای ثابت، تأثیر سه پارامتر ثابت زیر بر ضریب آگذری سرریزهای زیگزاگی قوسی مورد بررسی قرار گرفت:

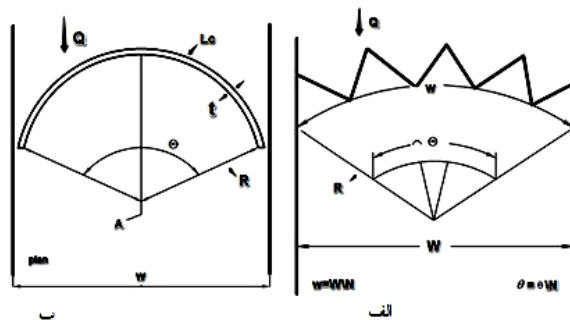
$$Q = f(h_d, P, R, L, t, \theta, W, S, g, \rho, \mu, \delta, S_c) \quad (2)$$

کردند. این پژوهشگران با مشاهده عملکرد بهتر سرریزهای زیگزاگی قوسی، این پدیده را در نتیجه جهت‌گیری بهتر سیکل‌های سرریز زیگزاگی نسبت به جریان ورودی عنوان کردند. نتایج روی سرریزهای کنگره‌ای قوسی نشان داد که توسعه سرریز به داخل مخزن در شرایطی که سیکل‌های سرریز روی قوسی از دایره قرار گیرند، افزایش ضریب آگذری را در پی دارد. این محققین ضمن معرفی پارامترهای هندسی سرریزهای کنگره‌ای قوسی، نتیجه‌گیری کردند که با بالارفتن زاویه انحنا سرریز، چنانچه ظرفیت آگذری سیکل‌های بالادست سرریز کنگره‌ای از سیکل‌های پایین‌دست آن بیشتر شود، ضریب آگذری سرریز کنگره‌ای قوسی حتی به مقداری کمتر از سرریز کنگره‌ای خطی نیز خواهد رسید.

پژوهش‌های کریستنسن (۵) هم نشان می‌دهد که در صورت رعایت تشابه هندسی بین سیکل‌ها، برای مقادیر بزرگ‌تر از پنج، تعداد سیکل‌های سرریز زیگزاگی قوسی بر ضریب آگذری تأثیر چندانی نخواهد داشت. در ادامه تحقیقات روی سرریزهای قوسی، با انجام تحقیقات روی سرریز قوسی ساده قرار گرفته در داخل کانال، به این نتیجه رسیدند که افزایش طول تاج ناشی از قوسی کردن سرریز می‌تواند افزایش ظرفیت آگذری آن را در پی داشته باشد (۱۸ و ۱۹).

بلندر و همکاران (۳)، به مطالعه سرریزهای کلیدپیانویی و زیگزاگی با در نظر گرفتن شرایط جریان آزاد و مستغرق این سرریزها در آبراه آلمان پرداختند. آنان در پژوهش خود از مدل فیزیکی سرریزهای زیگزاگی مستطیلی، مثلثی و دوزنقه‌ای و سرریزهای کلیدپیانویی نوع A و C بهره گرفتند. نتایج آنها نشان داد که حساسیت به استغراق در سرریزهای زیگزاگی دوزنقه‌ای و مستطیلی نسبت به کلید پیانویی و سرریز زیگزاگی مثلثی بیشتر است اما سرریز زیگزاگی مثلثی راندمان هیدرولیکی کمتری دارد.

گبهارت و همکاران (۹)، به مقایسه سرریزهای جانبی و زیگزاگی در رودخانه ایلمنو پرداختند. آنان رابطه دبی اشل را



شکل ۱. پلان و مقطع طولی از یک سرریز قوسی الف (خطی و ب) زیگزاگی



شکل ۲. مدل‌های سرریزها قوسی زیگزاگی و قوسی خطی و جانمایی آنها در فلوم آزمایشگاهی

$$C_d = f(h_d / P, R / w, S_c) \quad (4)$$

در رابطه (۴)، C_d معرف ضریب دبی، (h_d/P) معرف نسبت بار هیدرولیکی (بارهیدرولیکی به ارتفاع سرریز)، (R_c) شعاع قوس سرریز (w) عرض کانال و (S_c) معرف فاکتور شکل (زیگزاگی و خطی) هستند.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های این پژوهش روی یک فلوم آزمایشگاهی در آزمایشگاه هیدرولیک پژوهشکده سازمان آب و برق خوزستان-ایران انجام گرفت. در این پژوهش مدل‌های آزمایشگاهی سرریز، در داخل یک فلوم مستطیلی به طول ۱۲ متر، عرض ۰/۳ متر و ارتفاع ۰/۶ متر انجام شد. دیواره‌های فلوم شفاف و از جنس شیشه بوده و در نتیجه پروفیل سطح آب و شرایط جریان قابل مشاهده بوده است. مشخصات قسمت‌های مختلف فلوم و تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق به شرح زیر است (شکل ۲ و ۳):

$$f = \left(\frac{Q}{L_c \sqrt{gH}^{1/5}}, \frac{h_d}{P}, \frac{R}{W}, \frac{t}{P}, \frac{h_d}{D}, \theta, S_c, S_c \right) = 0 \quad (3)$$

معادله (۳) رابطه کلی پارامترهای مؤثر در یک سرریز قوسی را نشان می‌دهد با توجه به تراکم‌ناپذیری جریان در سرریزها، می‌توان از تأثیر تغییر جرم مخصوص ρ سرریز در آبگذر صرف‌نظر کرد. چنانچه جریان در محدوده آشفته و عمق جریان روی سرریز از یک مقدار به‌خصوص کمتر نباشد، می‌توان از اثر نیروی لزجت و کشش سطحی چشم‌پوشی کرد. همان‌گونه که در مقدمه اشاره شد، اکثریت مراجع از جمله انجمن مهندسين آمریکا (۲۰۰۰)، عمق ۲/۵ سانتی‌متر را برای این منظور توصیه کرده‌اند. با پذیرش این توصیه می‌توان از اثر لزجت و کشش سطحی نیز صرف‌نظر کرد.

با توجه به اینکه شیب کف S_c ، عرض کانال W ، ارتفاع سرریز P ، ضخامت سرریز t در این پژوهش ثابت در نظر گرفته شده است، در نهایت رابطه ساده شده زیر به دست می‌آید:



شکل ۳. فلوم آزمایشگاهی پژوهش حاضر

مخزن تأمین آب زمینی فلوم، دبی سنج دیجیتالی به منظور اندازه‌گیری دبی جریان با دقت $0/2$ لیتر در ثانیه، آرام کننده جریان ورودی به فلوم، الکترو پمپ شناور آب با دبی حداکثر 120 مترمکعب بر ساعت. کف فلوم به صورت بستر ثابت و بدون شیب بود. جریان آب ابتدا توسط پمپ از مخزن به ابتدای فلوم حرکت کرده و در این نقطه توسط شیر فلکه کنترل می‌شود. سپس با عبور از دبی سنج مقدار جریان اندازه‌گیری شد. جریان به آرامی و با دبی کم وارد کانال شده و به آرامی از روی سرریز عبور می‌کرد و با تغییر در میزان دبی، شرایط هیدرولیکی گذرنده از سرریز، بررسی و ثبت می‌شد و در نهایت جریان آب پس از عبور از سرریز از طریق کانال پایین دست وارد مخزن پمپاژ شده و دوباره به چرخه بازمی‌گشت.

نتایج و بحث

تأثیر شعاع قوس سرریز و بارهیدرولیکی بر عملکرد هیدرولیکی سرریزهای قوسی خطی

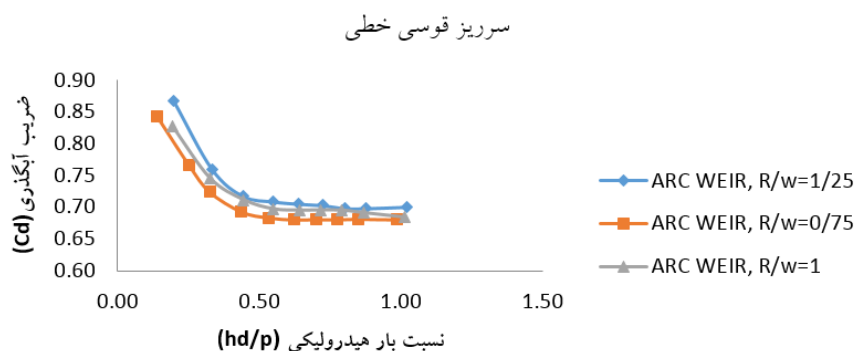
مطابق با شکل (۴) در این آزمایش، همگرایی جریان عبوری از روی سرریزهای قوسی باعث ایجاد برآمدگی موضعی سطح آب در پایین دست سرریز شده که این پدیده با عنوان پشته جریان (Standing Wave) نامگذاری شده که روی عملکرد هیدرولیکی سرریزها اثرگذار است. در شکل (۵) ضریب دبی سرریزهای قوسی خطی مورد آزمایش ارائه شده است. این نمودارها نشان می‌دهند که در تمام سرریزهای با شعاع قوس‌های مختلف با افزایش نسبت (hd/P) ضریب آبگذری کاهش می‌یابد. دلیل این امر این است که با افزایش بار هیدرولیکی، ارتفاع و ابعاد پشته جریان به عنوان مانعی در برابر جریان عبوری از سرریز و عامل کاهش ضریب آبگذری افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است در نسبت‌های بارهیدرولیکی کم (از $0/1$ تا $0/4$) با افزایش بار هیدرولیکی ضریب جریان به شدت کاهش می‌یابد و در نسبت

سرریزهای مورد استفاده در این پژوهش از جنس پلکسی گلاس ساخته شدند. نمونه‌ای از مدل‌های ساخته شده در شکل (۲) نشان داده شده است. نصب سرریزها در مدل آزمایشگاهی، با تراز کردن سرریز و آب‌بند کردن آن توسط چسب آکواریوم با دقت زیاد انجام شد (شکل ۲). در تمامی آزمایش‌ها تراز بستر بالادست و پایین دست برابر بوده و عرض کانال تخلیه 30 سانتی‌متر و ارتفاع سرریزها در تمامی مدل‌ها $7/5$ سانتی‌متر انتخاب شد. سرریزها شامل سرریز با شعاع قوس $37/35$ سانتی‌متر ($R/w = 1/25$)، 30 سانتی‌متر ($R/w = 1$) و $22/5$ سانتی‌متر ($R/w = 0/75$) در دو حالت خطی و زیگزاگی مثلثی هستند.

پس از اینکه سرریزها در بستر فلوم تثبیت شدند، پمپ با



شکل ۴. نمایش پشته جریان (Standing Wave) در سرریز



شکل ۵. مقایسه تأثیر نسبت شعاع قوس به عرض سرریز (R/w) بر ضریب جریان در سرریزهای قوسی خطی

تأثیر شعاع قوس سرریز و بار هیدرولیکی بر عملکرد

سرریزهای قوسی زیگزاگی

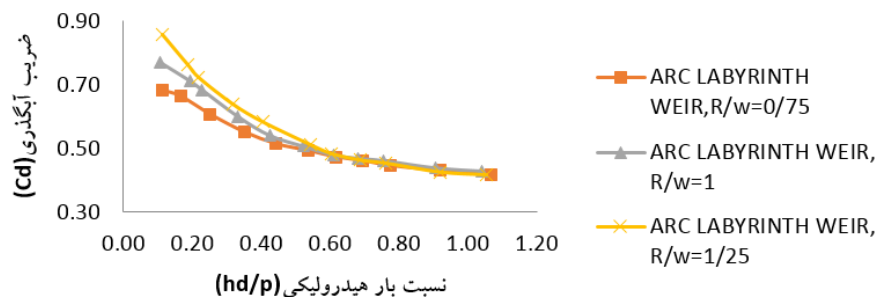
منحنی‌های شکل (۶) حاکی از آن است که در مقادیر پایین h_d/P کاهش زاویه انحنای قوس (θ) (افزایش شعاع قوس) بهبود ضریب آگذری سرریزهای زیگزاگی را موجب می‌شود. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که در مقادیر بالای زاویه θ عملکرد نامطلوب سیکل‌های کناری سرریزهای زیگزاگی، می‌تواند کارایی آنها را کاهش دهد.

نمودار شکل (۶) نشان می‌دهد با افزایش شعاع قوس ضریب جریان در نسبت بار هیدرولیکی کمتر از ۰/۶، افزایش می‌یابد و در بارهای هیدرولیکی بیش از ۰/۶ ضریب جریان در هر سه سرریز یکسان می‌شود. نمودار نشان می‌دهد در بارهای هیدرولیکی کم ضریب جریان در سرریز با شعاع قوس ۳۷/۵ سانتی‌متر حدود ۲۵ درصد از سرریز با شعاع قوس ۲۲/۵ سانتی‌متر بیشتر است.

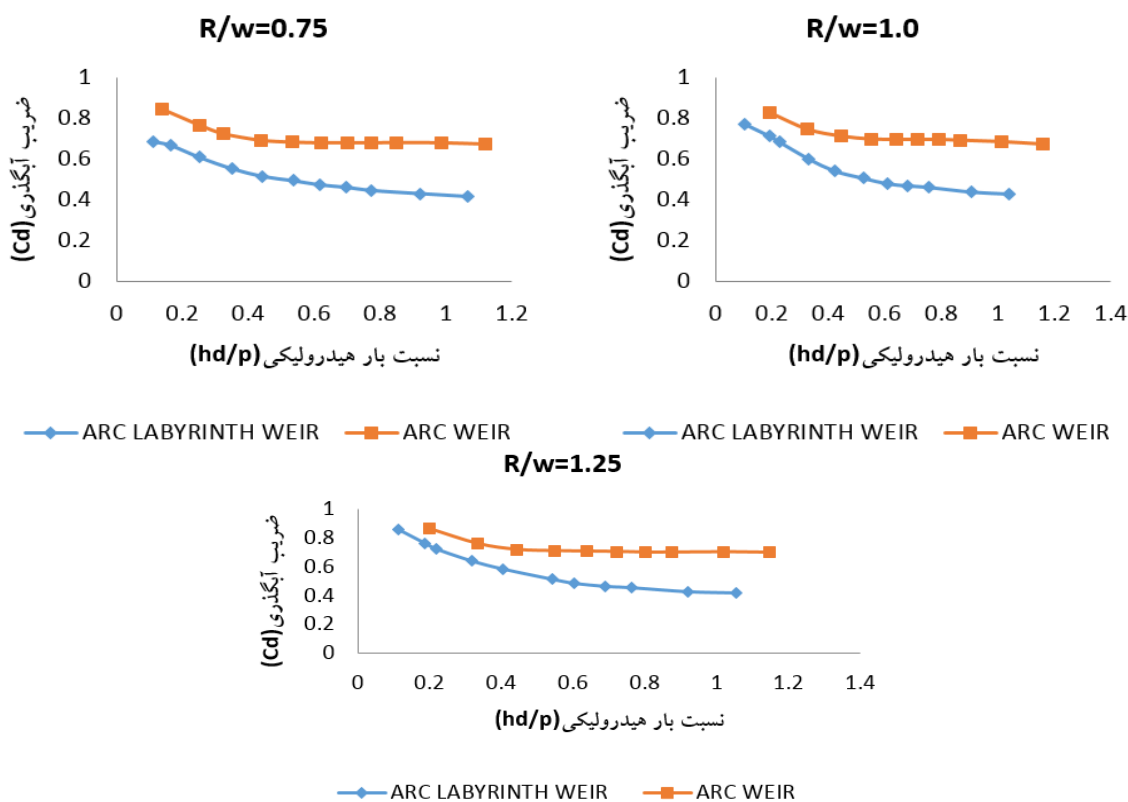
بار هیدرولیکی بیشتر از ۰/۴، منحنی افقی شده و ضریب جریان ثابت شده و افزایش بار هیدرولیکی تأثیری در ضریب جریان ندارد.

همچنین شکل (۵) نشان می‌دهد که در تمامی مقادیر h_d/P کاهش زاویه انحنای قوس (θ) (افزایش شعاع قوس) موجب افزایش ضریب آگذری می‌شود که این امر می‌تواند به این دلیل باشد که با افزایش θ اولاً ابعاد پشته رشد کرده و ثانیاً جریان برای طی مسیر کانال، مجبور به طی مسیری غیر مستقیم با انحنای بیشتر است که این دو موضوع می‌تواند اثر منفی بر ضریب آگذری داشته باشد. شکل (۵) نشان می‌دهد در نسبت بار هیدرولیکی ۰/۲ ضریب جریان در سرریز با شعاع قوس ۳۷/۵ سانتی‌متر حدود ۸/۵ درصد از سرریز با شعاع قوس ۲۲/۵ سانتی‌متر بیشتر است، (R شعاع قوس و w عرض فلوم است).

سرریز قوسی زیگزاگی



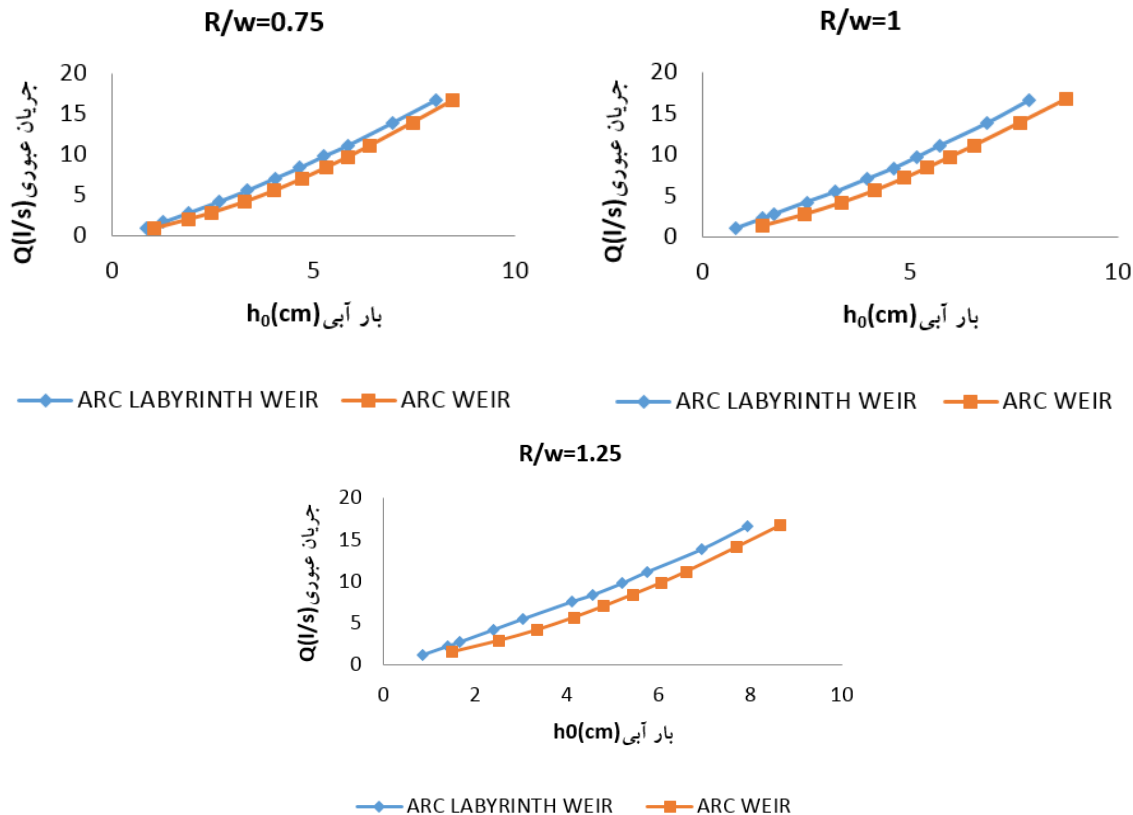
شکل ۶. تأثیر نسبت شعاع قوس به عرض سرریز (R/w) بر ضریب جریان در سرریزهای قوسی زیگزاگی



شکل ۷. مقایسه ضریب جریان تحت تأثیر نسبت شعاع قوس به عرض سرریز (R/w) در سرریزهای قوسی خطی و زیگزاگی

است که در این سرریزها در قسمت خروجی یک پشته جریان ایجاد می‌شود که باعث ایجاد استغراق موضعی و افزایش افت جریان و در نهایت کاهش ضریب آگذری می‌شود. نمودار شکل (۷) نشان می‌دهد که در تمامی شعاع قوس‌ها، ضریب جریان در سرریز قوسی خطی از سرریز قوسی زیگزاگی بیشتر است. کاهش ضریب جریان در سرریزهای زیگزاگی قوسی به دلیل

مقایسه ضریب آگذری سرریز قوسی خطی با سرریز قوسی زیگزاگی نمودار شکل (۷) نشان می‌دهد که در تمامی شعاع قوس‌ها، ضریب جریان در سرریز قوسی خطی از سرریز قوسی زیگزاگی بیشتر بوده است. کاهش ضریب جریان در سرریزهای زیگزاگی قوسی به این



شکل ۸. مقایسه دبی عبوری به ازای بار آبی در سرریزهای قوسی خطی و زیگزاگی ($h_d=h_0$)

در سرریز قوسی خطی نسبت به نوع زیگزاگی آن به طور محسوسی بیشتر است ولی مقدار جریان عبوری از سرریز قوسی زیگزاگی نسبت به قوسی خطی به ازای یک بار آبی ثابت به طور محسوسی بیشتر است.

از نمودارهای شکل (۸) نتیجه گیری می شود که به ازای بار آبی یکسان، مقدار جریان عبوری از سرریز قوسی زیگزاگی با نسبت قوس (R/W) ، $0/75$ ، 1 و $1/25$ به ترتیب 23 ، 16 و 14 درصد از سرریز قوسی خطی بیشتر است که به دلیل افزایش طول مؤثر سرریز قوسی زیگزاگی نسبت به نوع خطی آن است. در جدول (۱) داده های آزمایشگاهی به صورت بدون بعد که در ترسیم نمودارها استفاده شد، ارائه شده است.

برای تعیین رابطه ضریب دبی عبوری از روی سرریزهای قوسی خطی و زیگزاگی از نرم افزار تحلیل آماری SPSS که یک نرم افزار کاربردی با قابلیت تقریب تابع بین دو یا چند متغیر

است که در این سرریزها در قسمت خروجی یک پشته جریان ایجاد می شود که باعث ایجاد استغراق موضعی و افزایش افت جریان و در نهایت کاهش ضریب آگذری می شود. در نسبت شعاع قوس $0/75$ با افزایش نسبت h_d/P اختلاف بین ضریب جریان در سرریز قوسی خطی و زیگزاگی بیشتر شده و بین 23 تا 61 درصد افزایش نشان داده است.

در نسبت شعاع قوس یک نیز با افزایش نسبت h_d/P اختلاف بین ضریب جریان در سرریز قوسی خطی و زیگزاگی بیشتر شده و ضریب جریان در سرریز قوسی خطی بین $7/5$ تا 56 درصد افزایش نشان داده است. همچنین در نسبت شعاع قوس $1/25$ نیز با افزایش نسبت h_d/P ضریب جریان در سرریز قوسی خطی بین 12 تا 67 درصد افزایش نشان داده است.

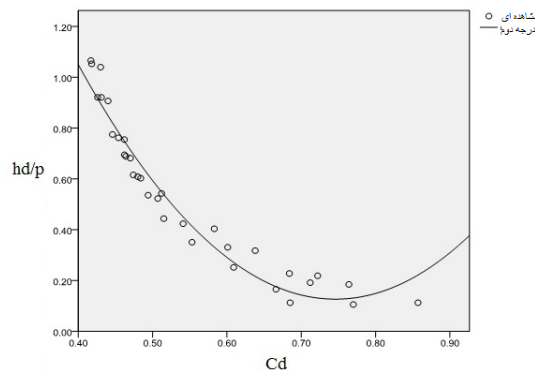
نمودارهای شکل (۸) نشان می دهد اگر چه ضریب جریان

جدول ۲. مدل‌های مورد بررسی برای انتخاب بهترین مدل در سرریز قوسی زیگزاگی

معادله	مدل اختصاری				برآورد پارامترها				
	جزر R	F	df۱	df۲	Sig.	عدد ثابت	b۱	b۲	b۳
خطی	۰/۸۲۶	۱۴۶/۸۱۱	۱	۳۱	۰/۰۰۰	-۱/۷۵۸	-۲/۲۲۸		
لگاریتمی	۰/۸۸۱	۲۲۹/۷۳۱	۱	۳۱	۰/۰۰۰	-۰/۲۹۹	-۱/۳۴۲		
معکوس	۰/۹۲۴	۳۷۹/۵۴۲	۱	۳۱	۰/۰۰۰	-۰/۹۳۷	۰/۷۷۵		
درجه دوم	۰/۹۵۰	۲۸۷/۳۱۱	۲	۳۰	۰/۰۰۰	۴/۴۱۸	۰/۵۰۵	۷/۷۱۱	
مکعبی	۰/۹۵۰	۲۸۷/۳۱۱	۲	۳۰	۰/۰۰۰	۴/۴۱۸	-۱۱/۵۰۵	۷/۷۱۱	۰/۰۰۰
مرکب	۰/۹۲۷	۳۹۱/۵۰۶	۱	۳۱	۰/۰۰۰	۹/۰۲۸	۰/۰۰۴		
توان	۰/۹۴۴	۵۲۲/۳۵۶	۱	۳۱	۰/۰۰۰	۰/۰۵۹	-۳/۲۴۰		
S	۰/۹۴۶	۵۴۳/۵۴۹	۱	۳۱	۰/۰۰۰	-۴/۲۹۴	۱/۸۲۹		
افزایش	۰/۹۲۷	۳۹۱/۵۰۶	۱	۳۱	۰/۰۰۰	۲/۲۰۰	-۵/۵۰۳		
نمایی	۰/۹۲۷	۳۹۱/۵۰۶	۱	۳۱	۰/۰۰۰	۹/۰۲۸	-۵/۵۰۳		

جدول ۳. مشخصات مدل درجه دوم Quadratic

معادله	مدل اختصاری				برآورد پارامترها			
	مجذور R	F	df۱	df۲	Sig.	عدد ثابت	b۱	b۲
درجه دوم	۰/۹۵۰	۲۸۷/۳۱۱	۲	۳۰	۰/۰۰۰	۴/۴۱۸	-۱۱/۵۰۵	۷/۷۱۱



شکل ۱۰. نمودار برازش مدل درجه دوم Quadratic

سرریز قوسی خطی

با توجه به نتایج جدول (۵) و شکل (۱۱ و ۱۲) مشاهده می‌شود که بهترین الگوی برازش مدل S و توانی (power) است. که دارای بیشترین مقادیر R هستند و مدل فوق به‌طور واضح‌تر برای الگوی S و توانی به‌ترتیب به‌صورت زیر هستند:

همچنین مدل کامل درجه دوم برای h_d/P روی C_d را برازش داده (شکل ۱۰) و نتایج آن در زیر آورده شده است (جدول ۴):
در نهایت در سرریز زیگزاگی قوسی بهترین برازش با داده‌های آزمایشی از رابطه (۵) پیروی می‌کند:

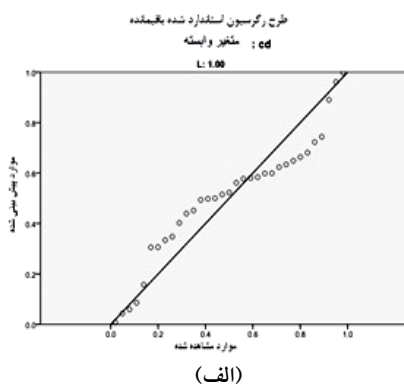
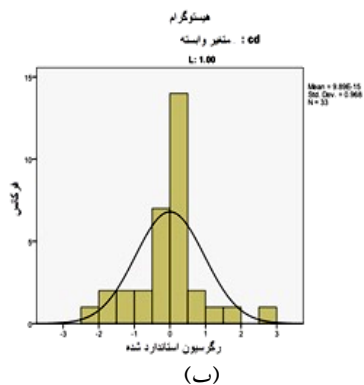
$$C_d = 0.0861 - 0.0925 h_d / P + 0.491 (h_d / P)^2 \quad (5)$$

جدول ۴. نتایج مدل کامل درجه دوم در سرریز قوسی زیگزاگی

مدل	R	مجدور R	معدل مجدور R	برآورد خطا استاندارد	Durbin-Watson آمار					
۱	۰/۹۶۶	۰/۹۳۴	۰/۹۲۹	۰/۳۲۲۷	۰/۴۶۴					
مدل	ضرایب غیرمتعارف	ضریب استاندارد	t	فاصله اطمینان برای B		همبستگی	آمار همبستگی			
				کران بالا	کران پایین					
	B	خطای استاندارد	بتا	دستور صفر	جزئی	قسمت	تحمل	VIF		
(ثابت)	۰/۸۶۱	۰/۰۲۰		۰/۹۰۲	۰/۸۲۱					
hd.p1	-۰/۹۲۵	۰/۰۸۱	-۲/۲۶۷	-۱۱/۳۵۸	-۱/۰۹۱	-۰/۷۵۹	-۰/۹۰۹	-۰/۵۳۳	۰/۰۵۵	۱۸/۰۶۷
hd.p2	۰/۴۹۱	۰/۰۷۰	۱/۳۹۸	۷/۰۰۳	۰/۳۴۸	۰/۶۳۴	-۰/۸۰۶	۰/۳۲۹	۰/۰۵۵	۱۸/۰۶۷

جدول ۵. مدل‌های مورد بررسی به منظور انتخاب بهترین مدل در سرریز قوسی خطی

معادله	R مجدور	مدل اختصاری		برآورد پارامتر				
		F	df1	df2	Sig.	ثابت		
					b1	b2	b3	
خطی	۰/۵۶۲	۳۷/۱۴۰	۱	۲۹	۰/۰۰۰	۳/۸۴۷	-۴/۴۷۲	
لگاریتمی	۰/۵۷۷	۳۹/۶۱۷	۱	۲۹	۰/۰۰۰	-۰/۵۱۱	-۳/۴۳۹	
معکوس	۰/۵۹۲	۴۲/۱۱۵	۱	۲۹	۰/۰۰۰	-۳/۰۴۲	۲/۶۲۸	
درجه دوم	۰/۶۶۹	۲۸/۲۸۲	۲	۲۸	۰/۰۰۰	۲۶/۳۰۷	-۶۳/۸۹۴	۳۸/۹۹۲
مکعبی	۰/۶۶۹	۲۸/۲۸۲	۲	۲۸	۰/۰۰۰	۲۶/۳۰۷	-۶۳/۸۹۴	۳۸/۹۹۲
ترکیب	۰/۷۷۲	۹۸/۲۷۷	۱	۲۹	۰/۰۰۰	۷۱۷/۱۸۸	-۴/۶۲۵۵	
توان	۰/۷۸۴	۱۰۵/۰۴۲	۱	۲۹	۰/۰۰۰	۰/۰۴۳	-۷/۶۲۷	
S	۰/۷۹۳	۱۱۱/۳۲۲	۱	۲۹	۰/۰۰۰	۸/۶۹۵	-۵/۷۹۱	
افزایشی	۰/۷۷۲	۹۸/۲۷۷	۱	۲۹	۰/۰۰۰	۶/۵۷۵	-۹/۹۸۱	
نمایی	۰/۷۷۲	۹۸/۲۷۷	۱	۲۹	۰/۰۰۰	۷۱۷/۱۸۸	-۹/۹۸۱	



شکل ۱۱. الف) نمودار آسیب‌شناسی (بافت نگار) و ب) نمودار آسیب‌شناسی (چندکی)

سرریز قوسی خطی بهترین برآزش با داده‌های آزمایشی از

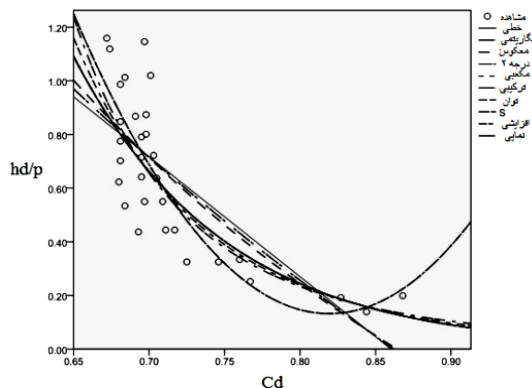
فرمول زیر پیروی می‌کند:

$$C_d = 0.043 * (h_d / P)^{-0.627} \quad (6)$$

مدل S

مدل توانی

با توجه به جداول (۶ و ۷) و شکل‌های (۱۳ و ۱۴) در نهایت در



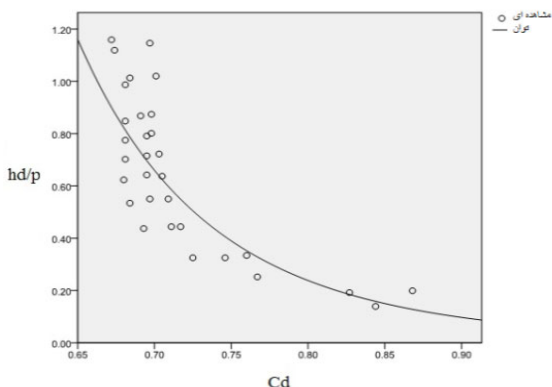
شکل ۱۲. نمودار برازش مدل‌های انتخابی به منظور انتخاب بهترین مدل در سرریز قوسی خطی

جدول ۶. مشخصات مدل S

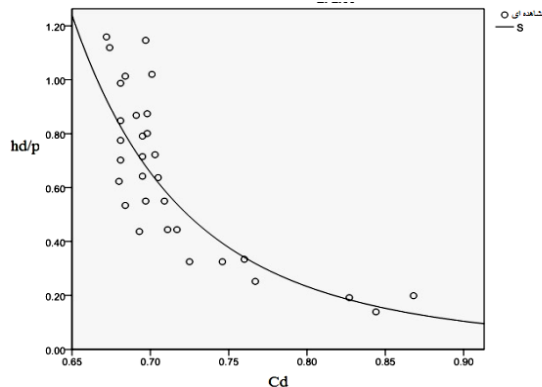
معادله	مدل اختصاری						برآورد پارامتر
	مجذور R	F	df1	df2	Sig.	ثابت	
S dimension1	۰/۷۹۳	۱۱۱/۳۲۲	۱	۲۹	۰/۰۰۰	-۸/۶۹۵	b1

جدول ۷. مشخصات مدل توانی

معادله	مدل اختصاری						برآورد پارامتر
	R مجذور	F	df1	df2	Sig.	ثابت	
توان dimension1	۰/۷۸۴	۱۰۵/۰۴۲	۱	۲۹	۰/۰۰۰	۰/۰۴۳	b1



شکل ۱۴. نمودار برازش مدل توانی در سرریز قوسی خطی



شکل ۱۳. نمودار برازش مدل S در سرریز قوسی خطی

که نتایج نشان داد سرریز قوسی خطی در تمامی نسبت‌های قوسی مورد بررسی نسبت به نوع زیگزاگی آن از عملکرد مناسب‌تری برخوردار بود. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر ضریب جریان در سرریز قوسی خطی و قوسی زیگزاگی با نسبت‌های شعاع قوس مختلف بررسی شد

به این دلیل باشد که با افزایش θ اولاً ابعاد پشته رشد کرده و ثانیاً جریان برای طی مسیر کانال، مجبور به طی مسیری غیرمستقیم با انحنای بیشتر است که این دو موضوع می‌تواند اثر منفی بر ضریب آبگذری داشته باشد. در نسبت بار هیدرولیکی $0/2$ ضریب جریان در سرریز با نسبت شعاع قوس $R/w = 1/25$ حدود $8/5$ درصد از سرریز با نسبت شعاع قوس $R/w = 0/75$ بیشتر است. (R شعاع قوس و w عرض فلوم است).

طبق نتایج این پژوهش، در تمامی نسبت‌های شعاع قوس (R/w) ، ضریب جریان در سرریز قوسی خطی از سرریز قوسی زیگزاگی بیشتر بوده است. در نسبت شعاع قوس $0/75$ با افزایش نسبت (h_d/p) اختلاف بین ضریب جریان در سرریز قوسی خطی و زیگزاگی بیشتر شده و بین 23 تا 61 درصد افزایش نشان داده است.

در نسبت شعاع قوس یک نیز با افزایش نسبت (h_d/p) اختلاف بین ضریب جریان در سرریز قوسی خطی و زیگزاگی بیشتر شده و ضریب جریان در سرریز قوسی خطی بین $7/5$ تا 56 درصد افزایش نشان داده است. همچنین در نسبت شعاع قوس $1/25$ نیز با افزایش نسبت (h_d/p) ضریب جریان در سرریز قوسی خطی بین 12 تا 67 درصد افزایش نشان داده است.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از همکاری آزمایشگاه هیدرولیک سازمان آب و برق استان خوزستان، جناب آقای دکتر حسونی‌زاده و جناب آقای مهندس موذرم‌نیا صمیمانه تشکر کنند.

هر دو پارامتر زاویه انحنای سرریز (θ) و بار هیدرولیکی بالادست سرریز (h_d) اثر مستقیم روی ضریب جریان داشته است. با افزایش زاویه قوس (کاهش شعاع قوس) ضریب جریان کاهش یافت و با افزایش بار هیدرولیکی بالادست (h_d) شدت و حجم جریان برخوردی در پایین‌دست سرریز افزایش یافته که این امر افزایش ارتفاع پشته جریان را در پی دارد که این فرایند باعث کاهش ضریب جریان می‌شود. خلاصه نتایج به صورت زیر ارائه می‌شود:

در سرریز قوسی زیگزاگی با افزایش شعاع قوس ضریب جریان در نسبت بارهیدرولیکی کمتر از $0/6$ ، افزایش می‌یابد و در بارهای هیدرولیکی بیش از $0/6$ ضریب جریان در تمامی نسبت‌های شعاع قوس یکسان می‌شود. نمودار نشان می‌دهد در بارهای هیدرولیکی کم ضریب جریان در سرریز با نسبت $R/w = 1/25$ حدود 25 درصد از سرریز با نسبت $R/w = 0/75$ بیشتر است.

در سرریز قوسی خطی در تمام نسبت‌های شعاع قوس مختلف با افزایش نسبت (h_d/p) ضریب دبی کاهش می‌یابد. دلیل این امر این است که با افزایش بار هیدرولیکی، ارتفاع و ابعاد پشته جریان به عنوان مانعی در برابر جریان عبوری از سرریز و عامل کاهش ضریب دبی، افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است در نسبت‌های بارهیدرولیکی کم (از $0/1$ تا $0/4$) با افزایش بار هیدرولیکی ضریب جریان به شدت کاهش می‌یابد و در نسبت بار هیدرولیکی بیشتر از $0/4$ منحنی افقی شده و ضریب جریان ثابت شده و افزایش بار هیدرولیکی تأثیری در ضریب جریان ندارد.

همچنین در سرریز قوسی خطی در تمامی مقادیر (h_d/p) کاهش زاویه انحنای قوس (θ) (افزایش شعاع قوس) موجب افزایش ضریب آبگذری می‌شود که این امر می‌تواند

منابع مورد استفاده

1. ASCE. 2000. Hydraulic modeling: Concepts and practice. Manual 97, American Society of Civil Engineering, Reston, Va, United States.
2. Balachandar, R. and A. S. Ramamurthy. 1991. A note on circular sharp-crested weirs. *Canadian Journal of Civil Engineering* 18(5): 881-885.
3. Belzner, F., J. Merkel, M. Gebhardt and C. Thorenz. 2017. Piano Key and Labyrinth Weirs at German waterways: Recent and future research of the BAW Labyrinth and Piano Key Weirs III – PKW 2017 – Erpicum et al. (Eds) © 2017 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-05010-5.
4. Bos, M. G. 1989. Discharge Measurement Structures. International Institute for Land Reclamation and Improvement /ILRI, Wageningen, Netherlands.
5. Christensen, N. A. 2013. Flow characteristics of arced labyrinth weirs. MSc. Thesis, Utah State University, Logan, Utah.
6. Crookston, B. and B. P. Tullis. 2012. Arced labyrinth weirs. *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)* 138(6): 555-562.
7. Eli, R. N. 1986. V-notch weir calibration using new parameters. *Journal of the Hydraulic Division (ASCE)* 103(12): 321-325.
8. Falvey, H. 2003. Hydraulic Design of Labyrinth Weirs. (ASCE), Reston, VA., United States.
9. Gebhardt, M., J. Merkel, F. Belzner and C. Thorenz. 2017. A comparison of side weirs and labyrinth weirs at Ilmenau river Labyrinth and Piano Key Weirs III – PKW 2017 – Erpicum et al. (Eds) © 2017 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-05010-5.
10. Gentilini, B. 1940. Stramazzi con cresta a pianta obliqua e a zig-zag. Memorie e Studi dell Istituto di Idraulica e Costruzioni Idrauliche del Regil Politecnico di Milano, Italy. (In Italian).
11. Ghodsian, M. 1988. Viscosity and surface tension effects on rectangular weir flow. *International Journal of Engineering Science, Iran University of Science & Technology* 9(4): 111-117.
12. Gill, M. A. 1985. Flow measurement by triangular broad crested weir. *Journal of Water Power and Dam Construction* 37(8): 47-49.
13. Hanger, W. H. and M. Schwalt. 1994. Broad-crested weir. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering (ASCE)* 120(2): 13-27.
14. Hay, N. and G. Taylor. 1970. Performance and design of labyrinth weirs. *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)* 96(11): 2337-2357.
15. Henderson, F. M. 1996. Open Channel Flow. Macmillan Publishing Co., New York.
16. Houston, K. 1983. Hydraulic Model Study of Hyrum Dam auxiliary Labyrinth Spillway. Report No. GR-82-13, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, Colo.
17. Kindsvater, C. E. and R. W. Carter. 1957. Discharge characteristics of rectangular thin plate weirs. *Journal of the Hydraulic Division (ASCE)* 33(6): 1-36.
18. Kumar, S., Z. Ahmad, T. Mansoor and S. K. Himanshu. 2013. A new approach analyze the flow over sharp crested curved plan form weirs. *International Journal of Recent Technology and Engineering* 2(1): 24-28.
19. Kumar, S., Z. Ahmad, T. Mansoor and S. K. Himanshu. 2012. Discharge characteristics of sharp crested weir of curved plan-form. *Research Journal of Engineering Sciences* 1(4): 16-20.
20. Ramamurthy, A. S., S. P. Bidya and K. Subramanya. 1977. Discharge measurement structures. *Journal of the Hydraulic Division (ASCE)* 103(12): 1431-1441.
21. RangaRaju, K. G. and G. L. Asawa. 1977. Viscosity and surface tension effects on weir flow. *Journal of the Hydraulic Division (ASCE)* 103(10): 1227-1231.
22. Schoder E. W. and K. B. Turner. 1929. Discussion of Precise Weir measurements, *Transcript of the American Society of Civil Engineers* 93(1): 999-1110.
23. Sangsefidi, Y., M. Mehraein and M. Ghodsian. 2015. Experimental Investigation of the Hydraulic Performance of Arced Weirs. *Modares Civil Engineering Journal* 15(2): 51-63.
24. Sarginson, E. J. 1972. The influence of surface tension on weir flow. *Journal of Hydraulic Research* 4(10): 431-446.
25. Taylor, G. 1968. The performance of labyrinth weirs, PhD Thesis, University of Nottingham, Nottingham, England.
26. Tison, G. and T. Franson, 1963. Essais sur deversoirs de forme polygonale en plan, Review C. *Tijdschrift, Brussels* 3: 38-51. (In French).
27. Villemonte, J. R. 1947. Submerged weir discharge studies. *Engineering News Record* 139(26): 54-56.
28. Vischer, D. 1988. Recent developments in spillway design. *Journal of Water Power and Dam Construction* 40(1): 10-15.
29. Wu, S. and N. Rajaratnam. 1966. Submerged flow regimes of rectangular sharp-crested weirs. *Journal of Hydraulic Engineering* 122(7): 412-414.

An Experimental Investigation into the Effect of Curve Radius on the Discharge Coefficient in Curved-Linear and Curved-Labyrinth Weirs with a Triangular Plan

R. Monjezi^{1,2}, M. Heidarnejad^{2*}, A. R. Masjedi², M. H. Purmohammadi³
and A. Kamanbedast²

(Received: November 15-2017 ; Accepted: June 9-2018)

Abstract

Nonlinear weirs are regarded as important hydraulic structures for water level adjustment and flow control in channels, rivers and dam reservoirs. One example of non-linear weirs is shaped as curved-zigzag. The crest axis of these weirs is non-linear. At a given width, the crest length is greater than that of the conventional linear weirs. Thus, they achieve a higher flow rate for an identical hydraulic load. This research experimentally focused on the discharge coefficient and flow rate of curved weirs with three different curve radii in two triangular linear and zigzag shapes. The discharge coefficients of these weirs were comparatively explored in terms of the hydraulic performance as a function of the total hydraulic load to weir crest height ratio (hd/P) and curvature angle (θ) (or curve radius). The results indicated that for the same hydraulic load, the increase of θ (the decrease in curve radius) led to a lower discharge coefficient; this was first because of the increased topical rise of water level, and then the more indirect path with a greater curvature through which the flow had to transport. Both factors could negatively affect the water discharge coefficient. In practice, the runoff coefficient at a weir with a curve radius of $R/w=1.25$ was approximately 8.5% greater than that of a weir with a curve radius of $R/w=0.75$ under a hydraulic load of 0.2.

Keywords: Triangular curved-zigzag weir, Curved weir, Hydraulic load, Curve radius, Discharge coefficient

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

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

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

*: Corresponding Author, Email: mo_he3197@yahoo.com