

بررسی آزمایشگاهی تعیین ضریب دبی در سرریزهای مرکب قوسی

نصیره سادات حسینی^۱، مهدی مفتاح هلقی^{۲*}، امیر احمد دهقانی^۳ و عبدالرضا ظهیری^۴

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه سازه‌های آبی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
 ۲، ۳، ۴- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
 تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۳/۱۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۲/۲۶

چکیده

سازه سرریز به منظور تنظیم و کنترل سطح آب در سیستم فاضلاب، کانال‌های روباز و حوضچه‌های آرامش به‌طور گسترده استفاده می‌شود. از مهم‌ترین دلایل استفاده از این سازه‌ها به‌عنوان وسایل اندازه‌گیری، داشتن رابطه دبی-اشل سازه است. یکی از انواع سازه‌های اندازه‌گیری و کنترل جریان، سرریز قوسی است که محور تاج این سازه به‌شکل غیر خطی و به‌صورت یک قطاع از دایره‌ای با شعاع مشخص است. به‌منظور افزایش ضریب دبی، می‌توان سرریز قوسی را به‌کار برد. در این مطالعه، از عملکرد هیدرولیکی سرریز قوسی و نیز سیستم سرریز مرکب قوسی با زاویه‌های مرکزی ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ درجه و ارتفاع ۱۸ سانتی‌متر، به‌منظور بررسی و محاسبه معادله‌های ضریب دبی و دبی عبوری از این سازه‌ها استفاده شد. نتایج اجرای آزمایش‌ها در یک کانال مستطیلی به طول ۹ متر، ارتفاع و عرض ۴۰ سانتی‌متر نشان داد که افزایش پارامترهای $\frac{h}{P}$ (نسبت هد آب روی سرریز به ارتفاع سرریز)، $\frac{H}{L}$ (نسبت عمق آب بالادست جریان به طول قوس سرریز)، $\frac{h}{B}$ (نسبت هد آب روی سرریز به عرض کانال) و عدد فرود (Fr) منجر به افزایش ضریب دبی در سرریز قوسی ساده و سرریز مرکب قوسی شده است. بر اساس مقایسه ضریب دبی سرریزهای مورد آزمایش مشخص شد که شدت انحنای قوس و مرکب کردن سرریز تاثیر زیادی بر ضریب دبی این سازه‌ها دارد به طوری که در سرریز قوسی ساده، زاویه ۹۰ درجه دارای بیشترین ضریب آبگذری و در سرریز مرکب قوسی زاویه ۱۵۰ درجه دارای بیشترین ضریب دبی است. بررسی نتایج همچنین نشان داد که با مرکب کردن سرریز قوسی ساده، ضریب دبی حدود ۱۷ درصد افزایش می‌یابد. بررسی ضریب دبی روی سرریز مرکب قوسی نشان داد که با افزایش ابعاد پله دوم در سرریز مرکب قوسی، افزایش ضریب دبی را خواهیم داشت به طوری که در دبی ۱۲ لیتر بر ثانیه، ضریب آبگذری در سرریز مرکب قوسی که نسبت ارتفاع به عرض پله دوم در آن $(\frac{h_2}{b_1})$ برابر ۰٫۲۶ باشد، نسبت به سرریز مرکب قوسی که نسبت ارتفاع به عرض پله دوم در آن $(\frac{h_2}{b_1})$ برابر ۰٫۴، در زاویه‌های قوس ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ درجه به‌ترتیب ۶، ۵/۱ و ۷ درصد افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی

انحنای قوس، زاویه قوس، سرریز قوسی، ضریب آبگذری

مقدمه

قوسی در پلان است که محور تاج آن به شکل غیرخطی و به‌صورت قطاعی است از دایره‌هایی با شعاع مشخص. سرریز قوسی به‌علت افزایش طول سرریز در عرض کانال مزیت‌هایی دارد مانند طراحی آسان، ساخت آسان و داشتن ضریب آبگذری بالا نسبت به سایر سازه‌ها (سرریز

سرریزها از سازه‌های هیدرولیکی پرکاربرد هستند که برای عبور سیلاب‌ها و جریان مازاد از مخزن سدها، کنترل سطح آب و اندازه‌گیری دبی جریان در کانال‌های انتقال و توزیع آب به‌کار می‌روند. یکی از انواع مدل سرریز، نوع

نتایج بررسی های خسروجردی (Khosrojerdi, 2009) نشان می‌دهد در سرریز قوسی با انحنای بالادست به دلیل تمرکز خطوط جریان در وسط سرریز، ضریب شدت جریان (نسبت به حالت قوس محوری به سمت پایین دست جریان) بزرگ تر است.

مارگرسون (Margeirsson, 2007)، با استفاده از مدل عددی فلونت و با برخی ساده‌سازی‌ها، سرریز قوسی واتن فال را شبیه‌سازی کرد. برای این منظور از داده‌های آزمایشگاهی سرریز قوسی واتن فال در سوئد بهره گرفت. نتایج بیانگر همگرایی مناسب بین مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی است.

نتایج بررسی‌های کومار و همکاران (Kumar et al, 2012) و انزانی (Anzani, 2015) روی سرریز لبه‌تیز قوسی نشان داد که این سرریز برای زاویه‌های بالای تاج به خوبی عمل می‌کند ولی کارایی آن با افزایش نسبت هد آب به ارتفاع سرریز کاهش می‌یابد. دلیل این کاهش تداخل جت جریان در پایین دست است.

نتایج تحقیقات کروکستون و تولیس (Crookston & Tullis, 2012) 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 آبگذری را در پی دارد.

شیخ‌کاظمی و عشرتی (Sheykhkazemi & Eshtrati, 2013) پروفیل جریان در سرریز اوجی با قوس محوری را بررسی کردند و نشان دادند سازه برای دبی‌های پایین تر از ۶/۹ لیتر بر ثانیه عملکرد مناسبی دارد. با افزایش دبی تا ۹/۲ لیتر بر ثانیه، افزایش ضریب آبگذری سرریز تا ۱/۸۹ و برای دبی‌های بزرگ تر، کاهش ضریب آبگذری تا ۱/۵۵ و استغراق سرریز اتفاق می‌افتد.

طوفانی‌موقر (Toofani movaghar, 2013) تاثیر سرریزهای قوسی در پلان را بر شرایط جریان با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D مطالعه کرد. نتیجه این

نرمال، مایل و ...). فرضیه اصلی در توسعه سرریزهای قوسی، افزایش ظرفیت انتقال جریان به علت افزایش در طول تاج، در یک عرض ثابت، نسبت به سرریزهای سنتی، است. به همین دلیل در تحقیق حاضر به بررسی تاثیر قوس مرکب سرریز بر هیدرولیک جریان پرداخته شده است.

از آنجا که پروفیل سرریزهای ریزشی با استفاده از منحنی سطح زیرین آب جاری شده از روی سرریز لبه‌تیز مستطیلی به دست می‌آید، می‌توان مقدار دبی جاری شده از روی سرریز را از معادله سرریز لبه‌تیز مستطیلی مطابق رابطه (۱) محاسبه کرد (Hosseini & Abrishami, 2007).

$$Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} L_e H_e^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

که در آن،

Q = دبی عبوری از سرریز؛ g = شتاب گرانش؛ C_d = ضریب آبگذری؛ L_e = طول موثر تاج سرریز و H_e = ارتفاع موثر جریان (هد واقعی) که برابر مجموع ارتفاع طراحی و ارتفاع ناشی از سرعت است.

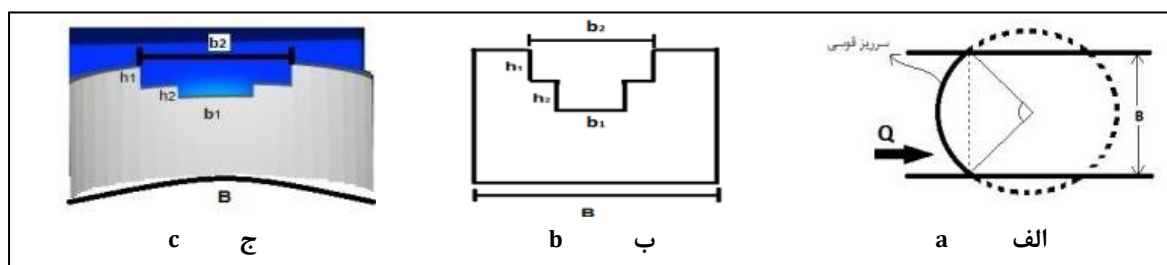
اولین بار سازمان احیای اراضی آمریکا (United States Bureau of Reclamation, 1963) از یک سرریز لبه‌تیز مرکب مثلثی-مستطیلی برای اندازه‌گیری جریان استفاده کرد. مزیت مهم این سرریز، دقت مناسب در اندازه‌گیری دبی در محدوده‌ای وسیع از شرایط جریان (کم‌آبی تا سیلاب) است.

یانگ (Yang, 1999) مدل هیدرولیکی سرریز قوسی همگرا، خروجی تحتانی و حوضچه آرامش سد واتن فال را با هدف تخمین و بهینه‌سازی مشخصات هیدرولیکی سد بررسی کرد و نشان داد جریان در مخزن به آرامی با تاج سرریز برخورد می‌کند و هیچ اثری از انقباض و آشفتگی در کناره‌ها مشاهده نمی‌شود. این مسئله باعث کم شدن افت انرژی و در نتیجه افزایش ضریب آبگذری سرریز (C_d) به میزان ۲۰ تا ۳۵ درصد شده است.

مرور کارهای قبلی نشان می‌دهد که مطالعات و آزمایش‌ها در مورد دبی عبوری از سرریزهای قوسی بسیار بوده و روابط مناسبی برای تعیین ضریب دبی جریان ارائه شده است. اما تاکنون در مورد سازه مرکب قوسی و مقایسه میزان دبی از این سازه در قوس‌های مختلف، پژوهشی دیده نشده است. مرکب فرض کردن سرریز سبب افزایش طول موثر تاج سرریز می‌شود و بدین ترتیب می‌تواند به ازای یک بار هیدرولیکی یکسان، دبی بیشتری از خود عبور دهد. قوسی کردن دماغه سرریز به بهبود راندمان هیدرولیکی سرریز می‌انجامد. در این تحقیق سعی می‌شود تا نتایج با حالت سرریز قوسی غیرمرکب نیز بررسی شود.

مواد و روش‌ها

شکل ۱ نمای پلان، نمای روبه‌رو و نمای سه بعدی سرریز مرکب قوسی را نشان می‌دهد.



شکل ۱ - الف) نمای پلان، ب) نمای روبه‌رو، و ج) نمای سه بعدی سرریز مرکب قوسی
Fig. 1- a) Plan view, b) Front view and c) Three-dimensional of the compound curved weir

پارامترهای هندسی عبارت‌اند از: B = عرض کانال (سانتی‌متر)، P = ارتفاع سرریز (سانتی‌متر)، S_0 = شیب کانال (بدون بعد)، L = طول موثر تاج سرریز (سانتی‌متر)، θ = زاویه قوس سرریز (بدون بعد)، h_1 = ارتفاع بازشدگی اول (سانتی‌متر)، h_2 = ارتفاع بازشدگی دوم (سانتی‌متر)، b_1 = عرض بازشدگی دوم (سانتی‌متر)، b_2 = عرض بازشدگی اول (سانتی‌متر). پارامترهای هیدرولیکی عبارت‌اند از: h = ارتفاع آب روی سرریز در بالادست سازه

تحقیق، کاهش هد آبی روی تاج سرریز اوجی قوسی در برابر سرریز اوجی مستقیم، در دبی عبوری و افزایش ۲۵ درصد در دبی خروجی سرریز قوسی در بار آبی ثابت نسبت به حالت مستقیم بود.

نتایج آزمایش‌های فتاحی (Fattahi, 2015) و کوهساری نوده و همکاران (Kuhari node et al., 2015) روی ضریب دبی سازه ترکیبی سرریز-دریچه لبه‌تیز قوسی نشان داد که در هد ثابت، سازه ترکیبی قوسی در پلان، نسبت به سازه ترکیبی خطی، دبی عبوری و ضریب دبی بیشتری دارد.

سنگ سفیدی و قدسیان (Sangsefidi & Ghodsian, 2019) با بررسی آثار دیوارهای هادی جریان بر عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کنگره ای قوسی نشان دادند قوسی کردن سرریز کنگره ای می‌تواند بهبود کارایی آن را سبب شود و دیگر اینکه با افزایش بار هیدرولیکی، کارایی سرریز های کنگره‌ای قوسی کاهش می‌یابد.

در این تحقیق با استفاده از آنالیز ابعادی، پارامترهای موثر بر ضریب دبی سرریز قوسی و سرریز مرکب قوسی بررسی و از روش پی‌باکینگهام برای شناخت پارامترهای بدون بعد مورد نیاز برای اجرای آزمایش‌ها و تحلیل روابط بین آنها استفاده شده است. پارامترهای موثر بر ضریب دبی سرریز مرکب قوسی (C_d) را می‌توان به سه گروه پارامترهای هندسی، پارامترهای هیدرولیکی و پارامترهای مشخصات سیال دسته‌بندی کرد.

(سانتی‌متر)، V = سرعت جریان در بالادست سازه (متر بر ثانیه)، H = ارتفاع آب در بالادست سازه (سانتی‌متر). پارامترهای مشخصات سیال عبارت‌اند از: μ = لزوجت دینامیکی سیال (کیلوگرم بر متر بر ثانیه)، ρ = جرم مخصوص سیال (کیلوگرم بر متر مربع)، g = شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه)، σ = کشش سطحی سیال (کیلوگرم بر متر مربع). از پارامتر زبری، به دلیل صاف بودن کف کانال آزمایشگاه، صرف نظر شده است. شکل ۲، شکل شماتیک جریان عبوری از سرریز مرکب قوسی را نشان می‌دهد. در مطالعه رفتار هیدرولیکی سازه‌های مرکب قوسی، می‌توان پارامترهای گفته شده را بررسی کرد.



شکل ۲- سرریز مرکب قوسی

Fig. 2- Compound curved weir

با استفاده از تحلیل ابعادی و تئوری پی‌باکینگهام، رابطه ۲ به دست می‌آید. اگر پارامترهای سرعت جریان در بالادست سازه (V)، ارتفاع آب روی سرریز (h) و جرم حجمی سیال (ρ) به عنوان متغیرهای تکراری انتخاب شوند، پارامترهای بی‌بعد به فرم رابطه ۳ به دست می‌آید:

$$f(C_d, V, h_1, h_2, b_1, b_2, B, L, S_0, H, h, P, \mu, \sigma, \rho, \theta, g) = 0 \quad (2)$$

$$f\left(C_d, \frac{h}{h_1}, \frac{h}{h_2}, \frac{h}{b_1}, \frac{h}{b_2}, \frac{h}{B}, \frac{h}{L}, \frac{h}{H}, S_0, \frac{h}{P}, \frac{\mu}{\rho V h}, \frac{\sigma}{\rho h V^2}, \theta, \frac{hg}{V^2}\right) = 0 \quad (3)$$

پارامترهای بی‌بعد را می‌توان در هم ضرب یا بر هم تقسیم یا معکوس کرد یا به توان رساند. معکوس پارامتر همان مجذور عدد فرود است. ولی چون ما به فرود در بالادست احتیاج داریم آن را در $\frac{H}{h}$ ضرب می‌کنیم و از حاصل آن رادیکال می‌گیریم تا فرود در بالادست به دست آید. بنابراین، رابطه ۴ را می‌توان به شکل زیر ساده کرد:

$$f(C_d, Fr, Re, We, \frac{h}{h_1}, \frac{h}{h_2}, \frac{h}{b_1}, \frac{h}{b_2}, \frac{h}{B}, \frac{h}{L}, \frac{h}{H}, \frac{h}{P}, S_0, \theta) = 0 \quad (4)$$

چون شیب کانال ثابت است، می‌توان از پارامتر S_0 صرف نظر کرد. اگر جریان روی سازه آشفته باشد، از رابطه فوق می‌توان تاثیر لزوجت را نادیده گرفت. بنابراین، پارامتر عدد رینولدز از رابطه بالا حذف می‌شود. اگر ارتفاع آب روی سازه کم باشد، کشش سطحی بر رفتار جریان تأثیر خواهد گذاشت. با توجه به این مطلب چنانچه مقدار محدودیت حداقل ارتفاع آب روی سرریز (حدود ۳ سانتی‌متر) رعایت شود، می‌توان اثر کشش سطحی را

اول) از میان پارامترهای موثر حذف می‌شوند. بدین ترتیب پارامترهای موثر بر ضریب دبی سرریز به صورت رابطه ۶ است.

$$C_{df}(Fr, \frac{h}{B}, \frac{H}{L}, \frac{h}{P}, \theta) = 0 \quad (۴)$$

تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در یک کانال دارای مقطع مربع (۴۰*۴۰ سانتی‌متر و به طول ۹ متر) با اسکلت فلزی اجرا شده است. در سراسر طول کانال ریلی نصب شده است که تجهیزات اندازه‌گیری از قبیل عمق سنج (لیزری) و سرعت سنج (مجهز به لوله پیتو که در این آزمایش به آن احتیاج نداشتیم) می‌توانند روی آن قرار گیرند و در جهت طول و عرض کانال حرکت کنند. دیواره‌های کانال، برای مشاهده روند آزمایش‌ها، از جنس شیشه انتخاب شده است. شکل ۳ نمای کلی این کانال را نمایش می‌دهد.



شکل ۳- نمایی از فلوم مورد استفاده در آزمایش

Fig. 3- View of the flume used in the experiment

کانال مسیری گردشی طی می‌کند. عمق با یک ترازسنج دیجیتال با دقت ۰,۱ میلی‌متر اندازه‌گیری می‌شود. این دستگاه نصب شده روی ریل در جهت طول و عرض کانال قادر به حرکت است و می‌تواند عمق آب را در حین آزمایش‌ها اندازه‌گیری کند (شکل ۴- الف). برای تنظیم دقیق دبی جریان در کانال نیز از یک دستگاه دیجیتال فرکانس‌سنج استفاده شده است

کاهش داد و بدین ترتیب از رابطه فوق پارامتر We حذف می‌شود. با ضرب و تقسیم پارامترهای بی‌بعد، پارامترهای بی‌بعد دیگری حاصل می‌شود. از تقسیم $\frac{h}{h_1}$ بر $\frac{h}{b_2}$ ، یک عدد ثابت به دست می‌آید. از این رو این دو پارامتر حذف می‌شوند. از تقسیم $\frac{h}{b_1}$ بر $\frac{h}{h_2}$ ، رابطه $\frac{h_2}{b_1}$ به دست می‌آید. با تقسیم $\frac{h}{L}$ بر $\frac{h}{H}$ ، رابطه بی‌بعد $\frac{H}{L}$ را خواهیم داشت. با جاگذاری رابطه‌های بی‌بعد به دست آمده، رابطه زیر را خواهیم داشت:

$$C_{df}(Fr, \frac{h_2}{b_1}, \frac{h}{B}, \frac{H}{L}, \frac{h}{P}, \theta) = 0 \quad (۵)$$

تحلیل ابعادی جریان عبوری از سازه سرریز قوسی

پارامترهای موثر بر ضریب دبی سرریز قوسی مانند پارامترهای موثر بر ضریب دبی سرریز مرکب قوسی هستند، با این تفاوت که به دلیل فقدان بازشدگی، پارامترهای h_1 (ارتفاع بازشدگی اول)، h_2 (ارتفاع بازشدگی دوم)، b_1 (عرض بازشدگی دوم) و b_2 (عرض بازشدگی

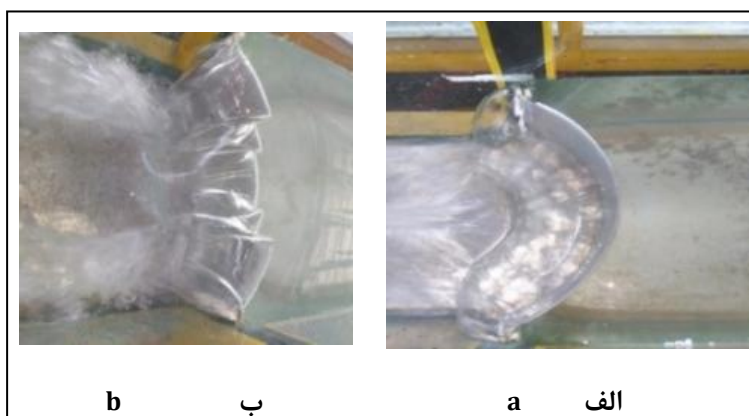
سیستم گردش جریان آب در این کانال بدین صورت است که در ابتدا جریان از مخزن ذخیره به مخزن ورودی پمپاژ می‌شود. مخزن ورودی در ابتدای کانال قرار دارد که آشفتگی جریان آب با ورود به این مخزن گرفته می‌شود و جریان به حالت آرام وارد کانال می‌شود. پس از عبور جریان از درون کانال، آب وارد مخزن خروجی می‌شود و دوباره به مخزن ذخیره باز می‌گردد. جریان ورودی به این

(شکل ۴-ب). این دستگاه طوری طراحی شده که با تغییر فرکانس دستگاه، دبی جریان نیز تغییر می‌یابد و هر فرکانس معرف دبی مشخصی است.



شکل ۴ - الف) عمق‌سنج دیجیتال، ب) دستگاه دیجیتالی تغییر دهنده فرکانس پمپ
Fig. 4- a) Digital depth gauge, b) Digital device to change the pump frequency

در آزمایش‌ها، برای ساخت سرریز مرکب قوسی از ورق گالوانیزه به قطر ۲ میلی‌متر استفاده شد. پس از طراحی و برش این ورقه‌ها، سرریز قوسی با زاویه‌های مرکزی ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ درجه ساخته شد. برای مرکب کردن سرریز قوسی، با استفاده از دستگاه مخصوص بازشدگی‌های مستطیل شکلی با ابعاد مشخص در بدنه سرریز ایجاد گردید. در شکل ۵ تصویرهایی واقعی از سرریزها نشان داده شده است.



شکل ۵ - الف) نمای از سرریز قوسی، ب) نمای از سرریز قوسی با دو پله (سرریز مرکب قوسی)
Fig. 5- a) View of the curved weir, b) View of the curved weir with two steps (compound curved weir)

عبارت‌اند از زاویه‌های قوس سرریز (\square)، طول سرریز (L)، عمق آب در بلا دست سازه (H)، دبی عبوری جریان (Q)، عمق آب روی سرریز (h)، ارتفاع بازشدگی دوم (h_2) و عرض بازشدگی دوم (b_1).

شرح آزمایش‌ها
پارامترهای ثابت در این بخش عبارت‌اند از شیب کانال (S_0)، عرض کانال (B)، ارتفاع سرریز (P)، ارتفاع بازشدگی اول (h_1) و عرض بازشدگی اول (b_2). پارامترهای متغیر

جدول ۱- مشخصات کلی و محدوده پارامترهای هیدرولیکی و هندسی

Table 1- General specifications and range of hydraulic and geometric parameters

محدوده تغییرات Range of changes	نماد و واحد Symbol and unit	پارامتر Parameter	
نزدیک به افق و ثابت		شیب کانال (بدون بعد)	
18	$P(\text{cm})$	ارتفاع سرریز (سانتی متر)	
52-16	$L(\text{cm})$	طول سرریز (سانتی متر)	
4,5	$h1(\text{cm})$	ارتفاع بازشدگی اول (سانتی متر)	پارامتر هندسی
20	$b2(\text{cm})$	عرض بازشدگی اول (سانتی متر)	geometric parameter
2-4	$h2(\text{cm})$	ارتفاع بازشدگی دوم (سانتی متر)	
10-15	$b1(\text{cm})$	عرض بازشدگی دوم (سانتی متر)	
40	$B(\text{cm})$	عرض کانال (سانتی متر)	
4-20	$Q(\frac{\text{lit}}{\text{s}})$	دبی جریان (لیتر بر ثانیه)	پارامتر هیدرولیکی
16,26-45,1	$H(\text{cm})$	عمق آب بالادست	hydraulic parameter
2,12-95,33	$h(\text{Cm})$	عمق آب روی سرریز ساده	

بر سرریز مستطیلی لبه تیز است (رابطه ۷).

$$Q_w = \frac{2}{3} C_{dw} \sqrt{2gL} h^3 \quad (7)$$

Q_w = دبی عبوری از سرریز (متر مکعب بر ثانیه)، L = طول موثر سرریز (متر)، h = هد آب روی سرریز (متر)، g = شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه)، C_{dw} = ضریب آبگذری سرریز. بنابراین ضریب دبی سرریز قوسی مطابق رابطه ۸ تعریف می شود:

$$C_{dw} = \frac{Q_w}{\frac{2}{3} L \sqrt{2gh}^{1.5}} \quad (8)$$

با توجه به اینکه بازشدگی سرریز مرکب قوسی به شکل مستطیل است، برای محاسبه دبی عبوری از سرریز مرکب قوسی از رابطه های زیر استفاده می شود. هنگامی که سرریز دارای یک پله باشد از رابطه (۹) برای محاسبه دبی کل استفاده می گردد.

ابتدا شیب کانال نزدیک به حالت افق تنظیم و در طول آزمایش ها ثابت نگه داشته شد. سرریزها در فاصله ۵ متری از ابتدای کانال نصب گردیدند. در حالت اول هر سه زاویه سرریز قوسی بدون بازشدگی آزمایش شدند. پس از آن، با ایجاد بازشدگی اولیه هر سه زاویه سرریز قوسی و سپس با ایجاد بازشدگی دوم و تغییر در عرض و ارتفاع آن زاویه های سرریز مرکب قوسی آزمایش شدند. در اجرای آزمایش ها ابتدا پمپ روشن و پس از حصول اطمینان از ثبات دبی و پایداری جریان، عمق آب در پنج نقطه قبل از سرریز و روی سرریز اندازه گیری شد. پس از اتمام اندازه گیری عمق ها برای یک قوس سرریز، سازه های با قوس دیگر به جای آن گذاشته و تمام مراحل قبلی برای سایر قوس ها تکرار شد.

اصول و روابط مورد استفاده در محاسبات

رابطه حاکم بر سرریزهای قوسی همانند رابطه حاکم

$$Q_s = 2Q_1 + Q_2 = 2\left(\frac{2}{3} C_{d1} L_1 \sqrt{2gh_3}^{1.5}\right) + \frac{2}{3} b_2 C_{d2} \sqrt{2gh_4}^{1.5} \quad (9)$$

بازشدگی اول سرریز، C_{d1} = ضریب آبگذری از روی سرریز، L_1 = طول کل سرریز منهای عرض باز شدگی اول (b_2) تقسیم بر دو، h_3 = عمق آب روی سرریز، C_{d2} = ضریب

که در آن،

Q_s = دبی کل عبوری از سرریز مرکب قوسی، Q_1 =

دبی عبوری از روی سرریز، Q_2 = دبی عبوری از روی

آبگذری از روی پلکان اول، $b_2 =$ عرض بازشدگی اول و h_4 زمانی که سرریز دارای دو پله باشد (سرریز مرکب قوسی)، عمق آب روی بازشدگی اول است. بنابراین، ضریب دبی سرریز مرکب قوسی در حالتی که یک بازشدگی داشته باشیم از رابطه زیر به دست می‌آید در این رابطه، C_{ds1} ضریب دبی سرریز مرکب قوسی با یک پلکان است.

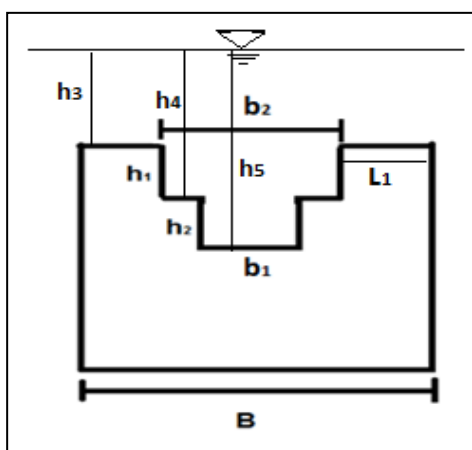
$$C_{ds1} = \frac{Q_s}{2\left(\frac{2}{3}L_1\sqrt{2gh_3}^{1.5}\right) + \frac{2}{3}b_2\sqrt{2gh_4}^{1.5}} \quad (10)$$

$$Q_s = 2Q_1 + 2Q_2 + Q_3 = 2\left(\frac{2}{3}C_{d1}L_1\sqrt{2gh_3}^{1.5}\right) + 2\left(\frac{2}{3}\left(\frac{b_2-b_1}{2}\right)C_{d2}\sqrt{2gh_4}^{1.5}\right) + \frac{2}{3}C_{d3}b_1\sqrt{2gh_5}^{1.5} \quad (11)$$

$Q_3 =$ دبی عبوری از روی بازشدگی دوم سرریز، $C_{d3} =$ ضریب آبگذری از روی بازشدگی دوم سرریز، $b_1 =$ عرض بازشدگی دوم سرریز، $h_5 =$ عمق آب روی بازشدگی دوم است. بنابراین ضریب دبی سرریز مرکب قوسی در حالتی که هر دو پلکان را داشته باشیم از رابطه ۱۲ به دست می‌آید:

$$C_{ds2} = \frac{Q_s}{2\left(\frac{2}{3}L_1\sqrt{2gh_3}^{1.5}\right) + 2\left(\frac{2}{3}\left(\frac{b_2-b_1}{2}\right)\sqrt{2gh_4}^{1.5}\right) + \frac{2}{3}b_1\sqrt{2gh_5}^{1.5}} \quad (12)$$

$C_{ds2} =$ ضریب دبی سرریز مرکب قوسی با دو پلکان است. در شکل ۶ پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه ضریب دبی در سرریز مرکب قوسی و سرریز قوسی با یک پله نشان داده شده است.



شکل ۶- پارامترهای اندازه‌گیری ضریب دبی در سرریز قوسی با یک پله و سرریز مرکب قوسی

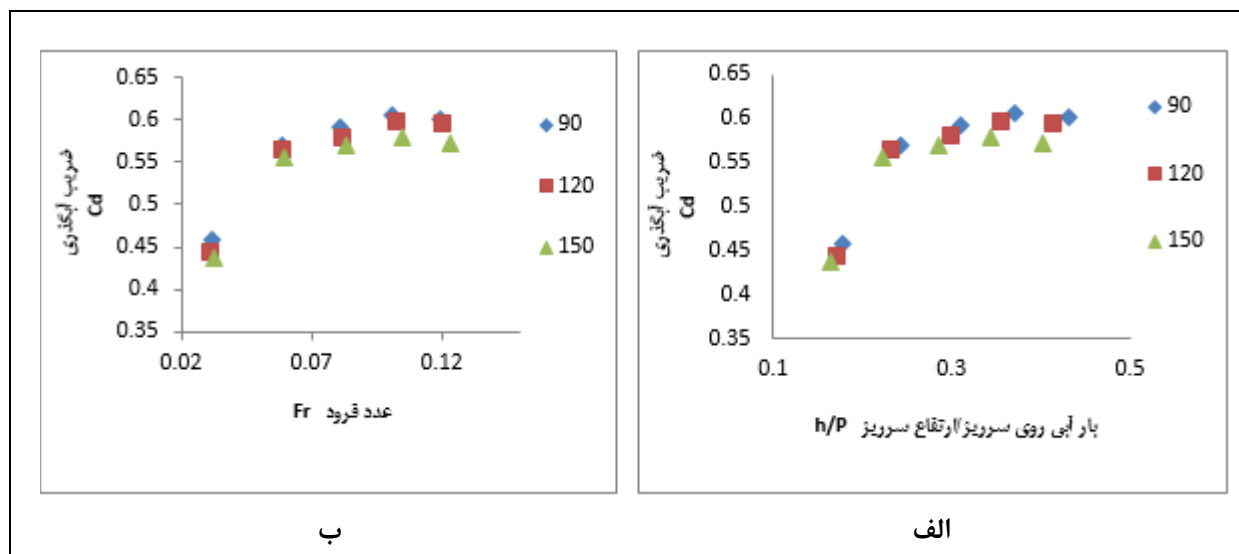
Fig. 6- Discharge coefficient measurement parameters in curved weir with one step and compound curved weir

مقابل ارتفاع بار آبی روی سرریز نسبت به ارتفاع سرریز $\left(\frac{h}{p}\right)$ و عدد فرود، در زاویه‌های مختلف سرریز قوسی ارائه شده است.

نتایج و بحث

ضریب دبی در سرریز قوسی:

در شکل (۷) تغییرات ضریب آبگذری سرریز قوسی در



شکل ۷- الف) تغییرات ضریب دبی با h/P در سرریز قوسی ساده با زاویه‌های مختلف،

ب) تغییرات ضریب دبی با عدد فرود در سرریز قوسی ساده با زاویه‌های مختلف

Fig. 7- a) Discharge coefficient changes with h/P in simple curved weir with different angles, b) Discharge coefficient changes with froude number in simple curved weir with different angles

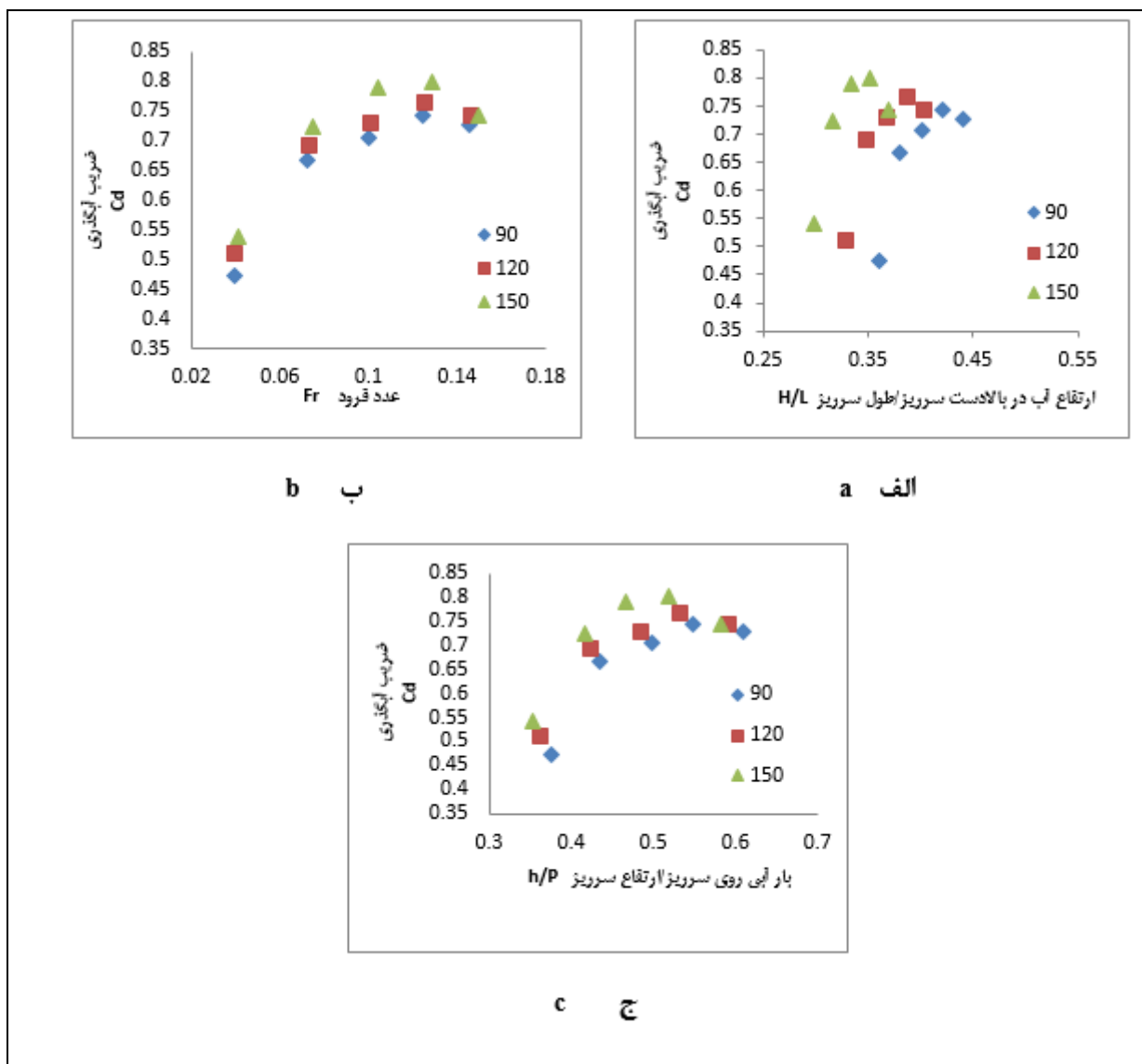
قوسی مورد آزمایش در سرریز قوسی، زاویه ۹۰ درجه دارای بیشترین ضریب دبی است و در زاویه‌های قوس بزرگ‌تر از ۹۰ درجه، از مقدار ضریب دبی کاسته می‌شود. مقدار ضریب دبی در سرریز قوسی ۹۰ درجه نسبت به سرریز قوسی ۱۲۰ و ۱۵۰ درجه به ترتیب ۲ و ۴٫۴ درصد افزایش یافته است. علت این امر، همگرایی بیشتر تیغه‌های جریان عبوری و تداخل بیشتر آن از روی سرریز است.

ضریب دبی در سرریز مرکب قوسی

در شکل‌های (۸) تا (۱۱) به ترتیب تغییرات ضریب آبگذری سرریز مرکب قوسی در مقابل ارتفاع بار آبی روی سرریز نسبت به ارتفاع سرریز ($\frac{h}{P}$)، نسبت ارتفاع آب در بالادست سرریز به طول سرریز ($\frac{H}{L}$) و عدد فرود، در زاویه‌های مختلف سرریز مرکب قوسی و در اندازه‌های مختلف عرض و ارتفاع پله دوم ارائه شده است.

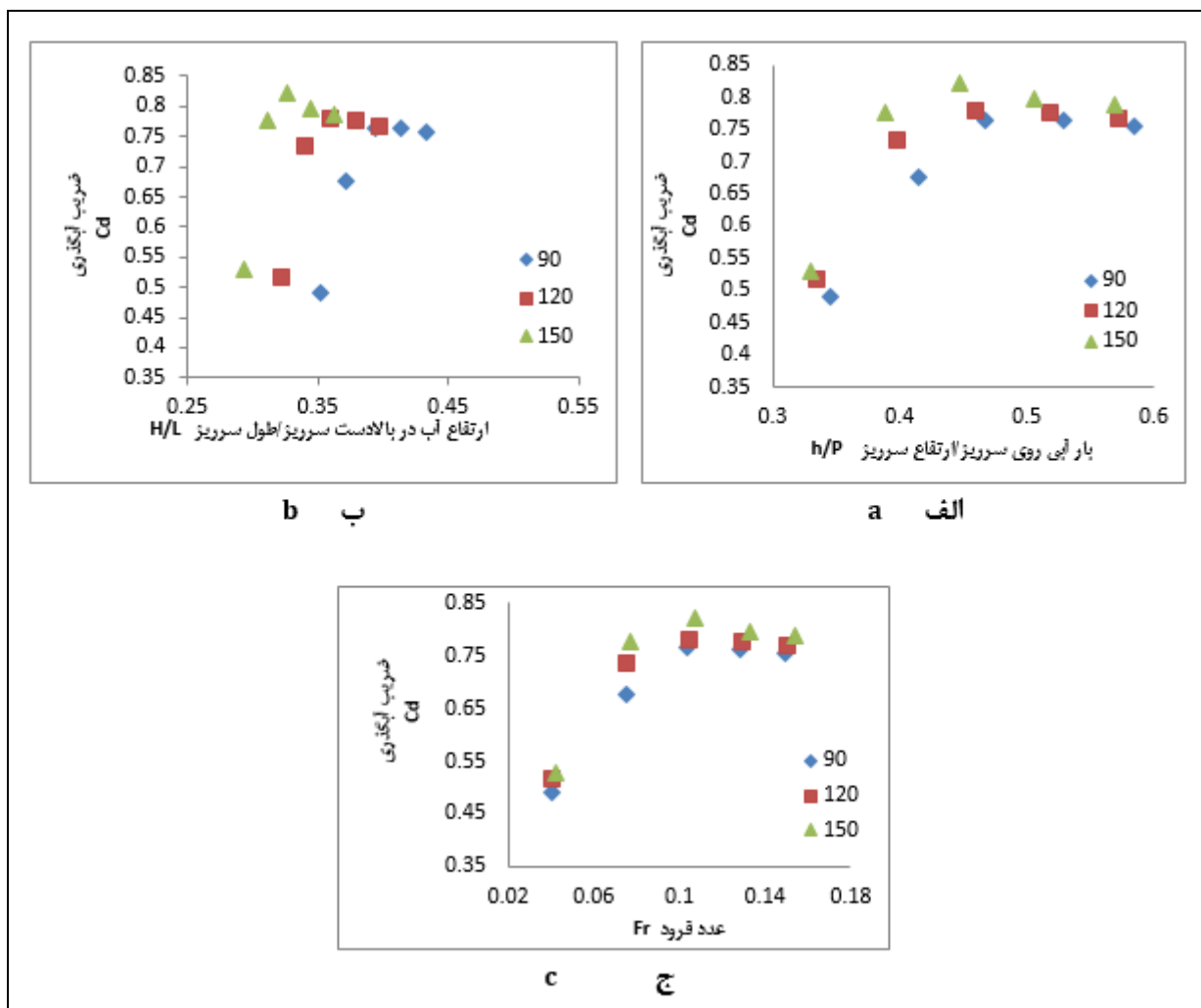
بررسی نمودارهای فوق نشان می‌دهد که در سرریزهای قوسی با زاویه‌های ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ درجه با افزایش نسبت h/P و Fr ، ضریب آبگذری افزایش می‌یابد. در محدوده $0,16 \leq h/P \leq 0,37$ و $0,31 \leq Fr \leq 0,1$ ، ضریب دبی تمامی سرریزها در زاویه‌های قوس ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ درجه افزایش می‌یابد. این در حالی است که در h/P و Fr های بزرگ‌تر به دلیل تداخل تیغه‌های جریان ریزشی از روی سرریزهای قوسی، از مقدار ضریب دبی به مقدار بسیار جزئی کاسته می‌شود و نمودار در h/P بزرگ‌تر از ۰/۴ و Fr بزرگ‌تر از ۰/۱۱ کم‌کم حالت نزولی به خود می‌گیرد. اندازه‌گیری دبی‌های بزرگ‌تر در کانال آزمایشگاه مشکل بود و از این رو ادامه روند نزولی بودن نمودار را نمی‌توان نشان داد.

نکته مهم در این شکل این است که در محدوده زاویه‌های



شکل ۸- الف) تغییرات ضریب آبگذری با h/P در زاویه‌های مختلف سرریز مرکب قوسی (نسبت ارتفاع به عرض در پله دوم $(\frac{h_2}{b_1})$ 0.2)،
 ب) تغییرات ضریب آبگذری با H/L در زاویه‌های مختلف سرریز مرکب قوسی (نسبت ارتفاع به عرض در پله دوم $(\frac{h_2}{b_1})$ 0.2)،
 ج) تغییرات ضریب آبگذری با عدد فرود در زاویه‌های مختلف سرریز مرکب قوسی (نسبت ارتفاع به عرض در پله دوم $(\frac{h_2}{b_1})$ 0.2)

Fig. 8- a) Discharge coefficient changes with h/P in different angles of compound curved weir (Height to width ratio in the second step $(\frac{h_2}{b_1})$ 0.2),
 b) Discharge coefficient changes with H/L in different angles of compound curved weir (Height to width ratio in the second step $(\frac{h_2}{b_1})$ 0.2),
 c) Discharge coefficient changes with froude number in different angles of compound curved weir (Height to width ratio in the second step $(\frac{h_2}{b_1})$ 0.2)



شکل ۹- الف) تغییرات ضریب آبگذری با h/P در زاویه‌های مختلف سرریز مرکب قوسی (نسبت ارتفاع به عرض در پله دوم $(\frac{h_2}{b_1}) 0.13$ ،

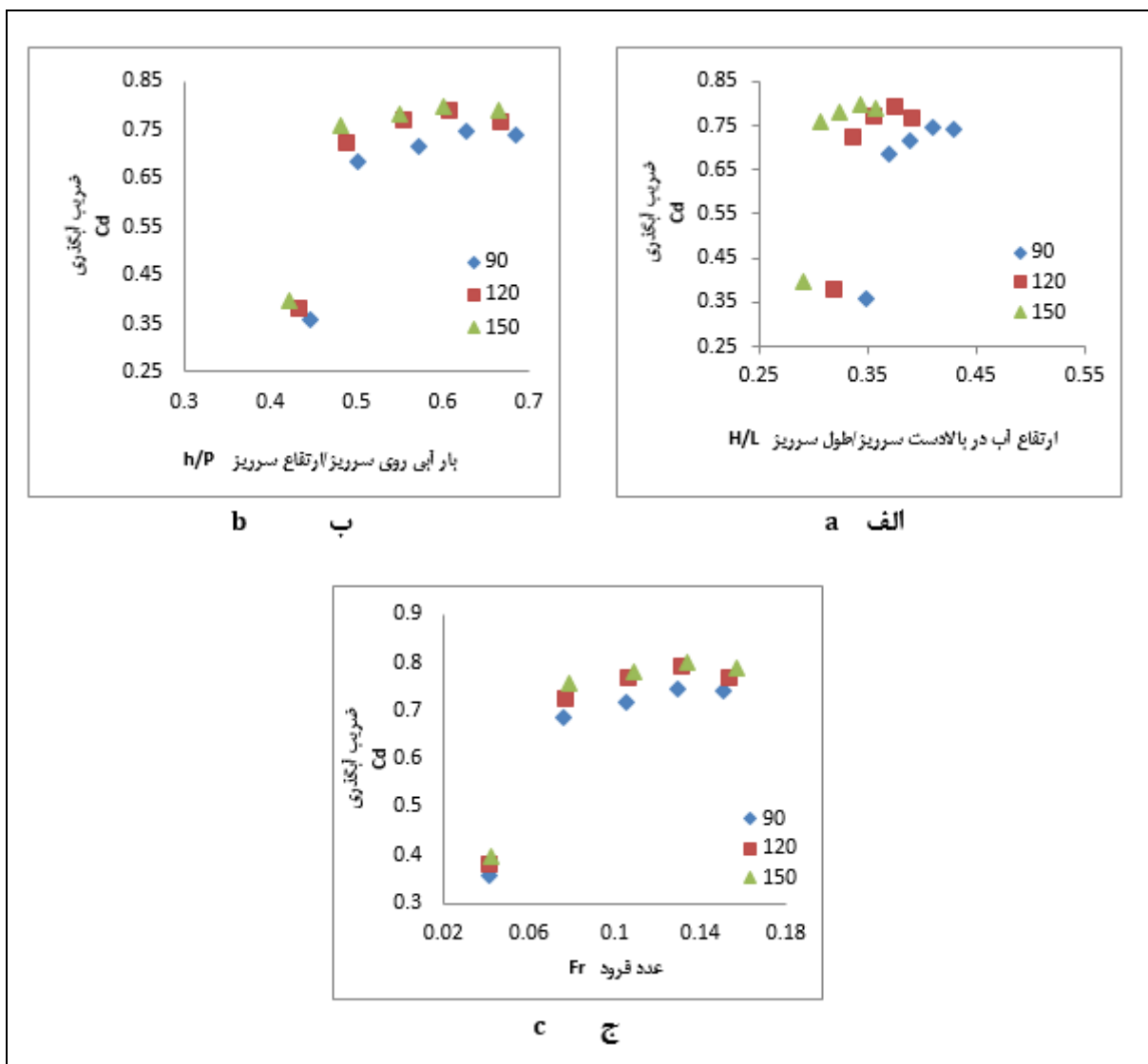
ب) تغییرات ضریب آبگذری با H/L در زاویه‌های مختلف سرریز مرکب قوسی (نسبت ارتفاع به عرض در پله دوم $(\frac{h_2}{b_1}) 0.13$ ،

ج) تغییرات ضریب آبگذری با عدد فرود در زاویه‌های مختلف سرریز مرکب قوسی (نسبت ارتفاع به عرض در پله دوم $(\frac{h_2}{b_1}) 0.13$)

Fig. 9- a) Discharge coefficient changes with h/P in different angles of compound curved weir (Height to width ratio in the second step $(\frac{h_2}{b_1}) 0.13$),

b) Discharge coefficient changes with H/L in different angles of compound curved weir (Height to width ratio in the second step $(\frac{h_2}{b_1}) 0.13$),

c) Discharge coefficient changes with froude number in different angles of compound curved weir (Height to width ratio in the second step $(\frac{h_2}{b_1}) 0.13$)



شکل ۱۰- الف) تغییرات ضریب آبگذری با h/P در زاویه‌های مختلف سرریز مرکب قوسی (نسبت ارتفاع به عرض در پله دوم $(\frac{h_2}{b_1}) 0.4$ ،

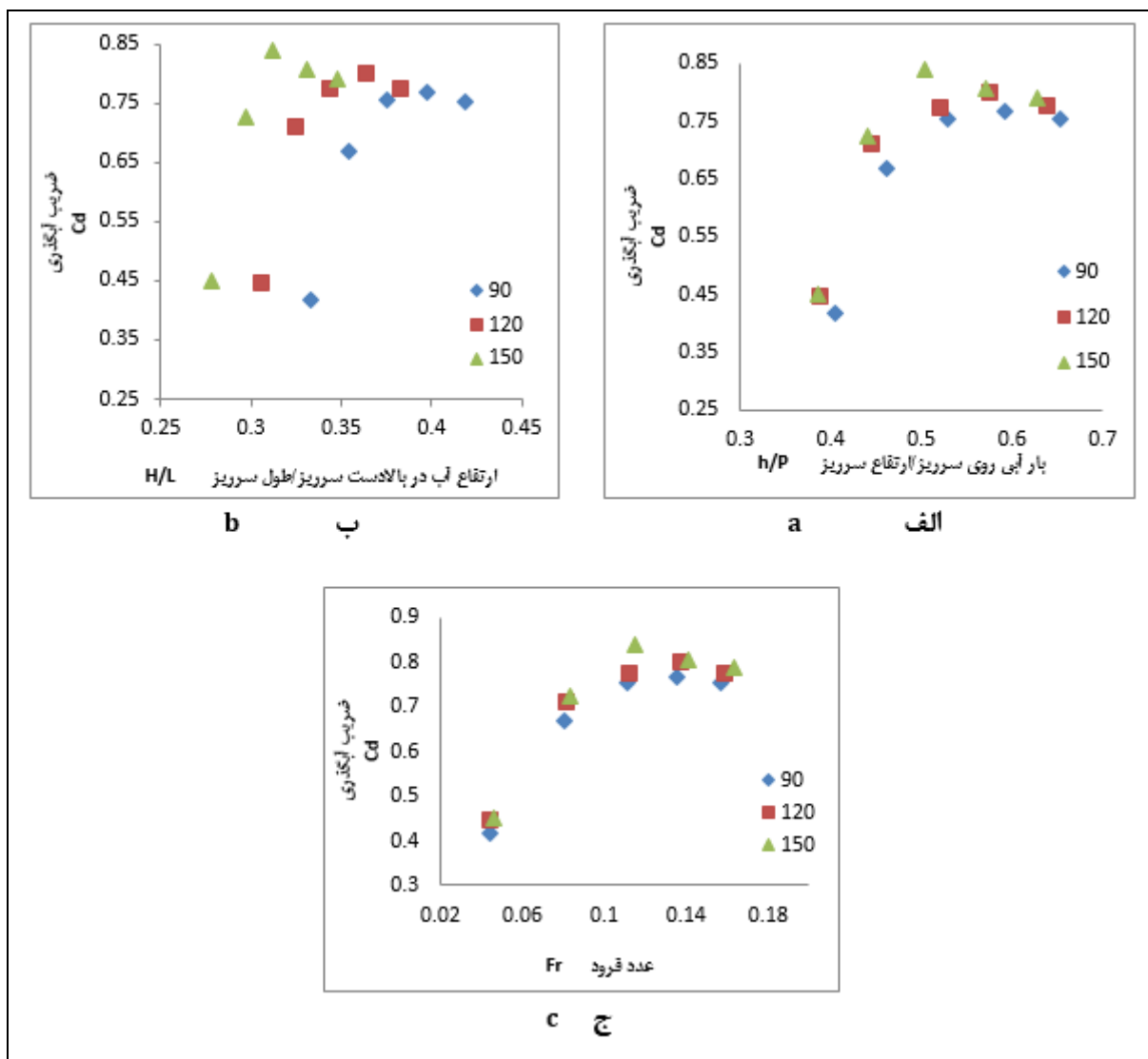
ب) تغییرات ضریب آبگذری با H/L در زاویه‌های مختلف سرریز مرکب قوسی (نسبت ارتفاع به عرض در پله دوم $(\frac{h_2}{b_1}) 0.4$ ،

ج) تغییرات ضریب آبگذری با عدد فرود در زاویه‌های مختلف سرریز مرکب قوسی (نسبت ارتفاع به عرض در پله دوم $(\frac{h_2}{b_1}) 0.4$)

Fig. 10- a) Discharge coefficient changes with h/P in different angles of compound curved weir (Height to width ratio in the second step $(\frac{h_2}{b_1}) 0.4$),

b) Discharge coefficient changes with H/L in different angles of compound curved weir (Height to width ratio in the second step $(\frac{h_2}{b_1}) 0.4$),

c) Discharge coefficient changes with froude number in different angles of compound curved weir (Height to width ratio in the second step $(\frac{h_2}{b_1}) 0.4$)



شکل ۱۱- الف) تغییرات ضریب آبگذری با h/p در زاویه‌های مختلف سرریز مرکب قوسی (نسبت ارتفاع به عرض در پله دوم $(\frac{h_2}{b_1}) 0.26$)،

ب) تغییرات ضریب آبگذری با H/L در زاویه‌های مختلف سرریز مرکب قوسی (نسبت ارتفاع به عرض در پله دوم $(\frac{h_2}{b_1}) 0.26$)،

ج) تغییرات ضریب آبگذری با عدد فرود در زوایای مختلف سرریز مرکب قوسی (نسبت ارتفاع به عرض در پله دوم $(\frac{h_2}{b_1}) 0.26$)

Fig. 11- a) Discharge coefficient changes with h/p in different angles of compound curved weir (Height to width ratio in the second step $(\frac{h_2}{b_1}) 0.26$),

b) Discharge coefficient changes with H/L in different angles of compound curved weir (Height to width ratio in the second step $(\frac{h_2}{b_1}) 0.26$),

c) Discharge coefficient changes with froude number in different angles of compound curved weir (Height to width ratio in the second step $(\frac{h_2}{b_1}) 0.26$)

سرریز در بالادست سازه افزایش می یابد، حدود ۱۷ درصد افزوده می شود.

همان طور که در این نمودارها مشخص است، با افزایش ارتفاع آب در بالادست سرریز و به دنبال آن

مقایسه نمودارهای ضریب دبی نسبت به عدد فرود و ضریب دبی نسبت به h/p در سرریز قوسی ساده و سرریزهای مرکب قوسی نشان می دهد که مقدار ضریب دبی (با توجه به اینکه ارتفاع آب روی

افزایش ارتفاع آب روی سرریز در بالادست سازه، ضریب دبی افزایش می‌یابد. اما هنگامی که ارتفاع آب از حدی بیشتر می‌شود به دلیل تداخل جریان از ضریب دبی کاسته می‌شود.

تعیین رابطه کلی ضریب دبی

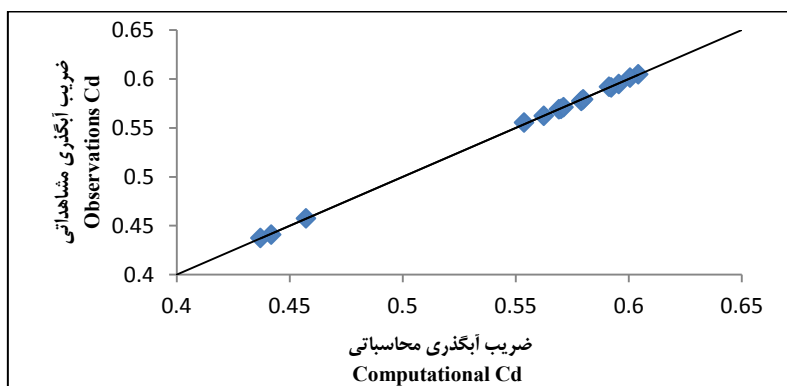
برای به دست آوردن رابطه کاربردی برای تحلیل ضریب دبی در سرریز قوسی با زاویه‌های مختلف با در نظر گرفتن پارامترهای بی‌بعد، رابطه ۱۳ به دست آمد که این رابطه کم‌ترین مقدار خطا را دارد و داده‌ها طبق شکل ۱۲

به زاویه ۴۵ درجه نزدیک هستند؛ همچنین ضریب همبستگی آن نزدیک به عدد ۱ است.

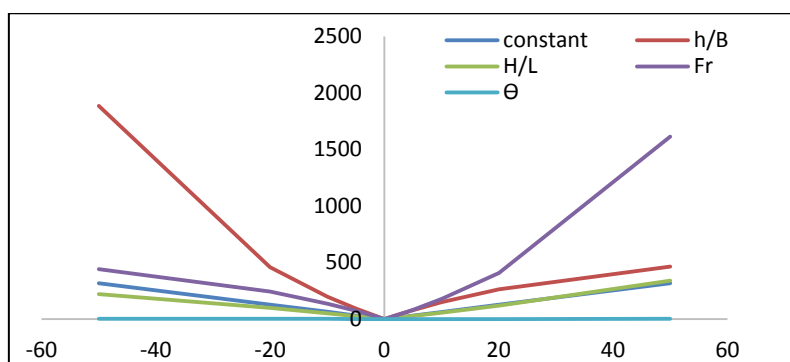
در شکل (۱۳) حساسیت برای رابطه به دست آمده برای تعیین ضریب دبی سرریز قوسی ساده (رابطه ۱۳) آنالیز شده است و ضریب‌ها بررسی شده‌اند.

$$C_d = 1.022 \left(\frac{h}{B}\right)^{-1.325} \left(\frac{H}{L}\right) Fr^{0.951} \theta^{0.012} \quad (13)$$

$R^2 = 0.99$



شکل ۱۲- مقایسه ضریب دبی مشاهده‌ای با ضریب دبی محاسباتی از رابطه (۱۳) برای سرریزهای قوسی ساده
 Fig. 12- Comparison of observations discharge coefficient with computational discharge coefficient from the relationship (13) for simple curved weirs



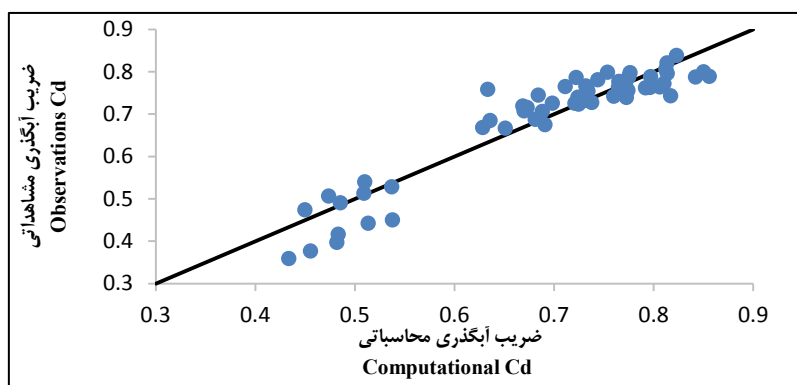
شکل ۱۳- آنالیز حساسیت برای رابطه (۱۳)
 Fig. 13- Sensitivity analysis for relationship (13)

گرفتن پارامترهای بی‌بعد، رابطه ۱۴ به دست آمد که این رابطه مقدار خطا را دارد و داده‌ها طبق شکل ۱۴ به زاویه ۴۵ درجه نزدیک هستند؛ ضریب همبستگی آن

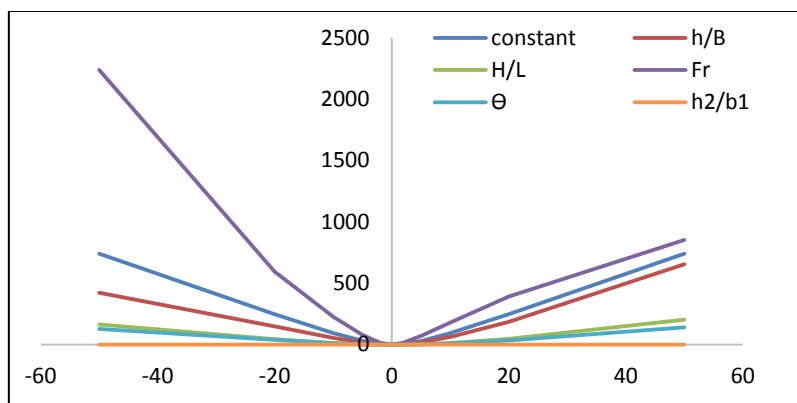
تعیین رابطه کلی ضریب دبی سرریز مرکب قوسی برای به دست آوردن رابطه‌ای کاربردی برای تحلیل ضریب دبی در سرریز مرکب قوسی با زاویه‌های مختلف با در نظر

نیز نزدیک به عدد ۱ است. در شکل ۱۵ حساسیت برای قوسی (رابطه ۱۴) آنالیز شده است و ضریبها بررسی رابطه به دست آمده برای تعیین ضریب دبی سرریز مرکب شده‌اند.

$$C_d = 1.811 \left(\frac{h}{B}\right)^{-0.0501} \left(\frac{H}{L}\right)^{-0.309} Fr^{0.751} \theta^{-0.357} \left(\frac{h_2}{b_1}\right)^{-0.006} \quad R^2 = 0.895 \quad (14)$$



شکل ۱۴- مقایسه ضریب دبی مشاهداتی با ضریب دبی محاسباتی از رابطه (۱۴) برای سرریزهای مرکب قوسی
 Fig. 14- Comparison of observations discharge coefficient with computational discharge coefficient from the relationship (14) for compound curved weirs



شکل ۱۵- آنالیز حساسیت برای رابطه (۱۴)
 Fig. 15- Sensitivity analysis for relationship (14)

۲ و ۴/۴ درصد افزایش یافته است اما با مرکب کردن سرریز عکس این حالت اتفاق می‌افتد، یعنی در سرریز مرکب قوسی بیشترین ضریب آگذری در سرریز ۱۵۰ درجه دیده می‌شود. رابطه عمومی برای محاسبه ضریب دبی سرریز قوسی و سرریز مرکب قوسی (در عرض و ارتفاع مختلف از پله دوم) به دست آمده است که با داشتن زاویه مرکزی قوس، عمق آب در بالادست سازه و مقدار طول سرریز می‌توان ضریب دبی و میزان جریان عبوری از

نتیجه‌گیری

در تمامی زاویه‌های مورد مطالعه، با افزایش ارتفاع آب روی سرریز در بالادست سازه، ضریب دبی سرریز افزایش می‌یابد. در دبی‌های زیاد (۲۰ لیتر بر ثانیه و بیشتر از آن)، به دلیل تداخل جریان از میزان ضریب دبی کاسته می‌شود. در سرریز قوسی ساده، زاویه ۹۰ درجه بیشترین ضریب آگذری را دارد. مقدار ضریب دبی در سرریز قوسی ۹۰ درجه، نسبت به سرریز قوسی ۱۲۰ و ۱۵۰ درجه، به ترتیب

سرریز را تخمین زد. در سرریز مرکب قوسی، با افزایش عرض و ارتفاع پله دوم بر میزان ضریب آبگذری افزوده می‌شود. مقایسه نتایج به دست آمده نشان می‌دهد در زاویه-ای یکسان، سرریز مرکب قوسی که در آن نسبت ارتفاع به عرض $(\frac{h_2}{b_1})$ پله دوم ۰/۲۶ است، نسبت به سایر سرریزها در همان زاویه، دارای ضریب دبی بیشتری است. بررسی نتایج نشان می‌دهد با مرکب کردن سرریز قوسی ساده، مقدار ضریب دبی حدود ۱۷ درصد افزایش می‌یابد.

مراجع

- Anzani, A. (2015). Experimental study of the coefficient discharge of the composite structure of the arc overflow- orifice in plan with upstream and downstream arches (Master's thesis for water structures), Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. (in Persian)
- Chanson, H. (2009). Discussion of Hydraulic of broad-crested weirs with varying side slopes. *Journal of irrigation and drainage engineering*. ASCE. 136(7), 508-509.
- Crookston, B.M. & Tullis, B. P. (2012). Discharge efficiency of reservoir-application-specific labyrinth weirs. American society of civil engineering, *Journal of hydraulic engineering*, 138(6), 564-568.
- Fattahi, M. (2015). Experimental study of the discharge coefficient in sharp edge arc overflow- orifice in plan (Master's thesis for water structures), Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. Gorgan, Iran. (in Persian)
- Hosseini, M. & Abrishami, J. (2007). *Hydraulic open channels*. Imam Reza University, 613 p. (in Persian)
- Khosrojerdi, A., Kavianpur, M. R., Shamsayi, A. & Daemi, A. (2009). Hydrological study of wide edge overflows and axial arc effect. *Journal of agricultural science and technology and natural resources, Water and soil sciences*, 5(53), 36-53. (in Persian)
- Kuhsari node, A., Dehghani, A., Mefah halaghi, M., & Zahiri, A., (2015). The prediction of arc orifice discharge coefficient in plan using genetic programming. *Third National Conference on Agriculture and Sustainable Natural Resources*. June. 17. Mehr Alvand Higher Education Institute, Tehran, Iran. (in Persian)
- Kumar, S. & Ahmad, Z. (2012). Discharge characteristics of sharp crested weir of curved plan-from. *Research Journal of Engineering Sciences*, 1 (14), 16-20.
- Margeirsson, B. (2007). Computational modeling of flow over a spillway in Vattenfall dam in Iceland (Master thesis). Goteborg Sweden, Department of applied mechanics, Chalmers University of Technology, Sweden.
- Sangsefidi, M. & Ghodsian, M. (2019). Investigation of Effect of Entrance Channel Walls on the Hydraulic Performance of Arced Labyrinth Weirs. *Civil Engineering Instructor*, 19(1), 181-193. (in Persian)
- Sheykhkazemi, J. & Eshrati, T. (2013). Determination profile of ogee overflow stream in axial arc conditions, *7th National Civil Engineering Congress*. May. 7-8. University of Sistan and Baluchestan. Zahedan. Iran. (in Persian)
- Toofani movaghar, H. (2013). Study of the effect of arc overflows in the plan on flow conditions using FLOW3D software (Master's thesis for water structures). Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. Gorgan, Iran. (in Persian)

بررسی آزمایشگاهی تعیین ضریب دبی در سرریزهای ...

United States Bureau of Reclamation (USBR). (1963). Compound weir study. Hydraulic laboratory report No. Hyd. 505.

Yong, J. (1999). Vattenfall hydropower project, Iceland- Hydraulic model studies of flood discharge structures. *Vattenfall Utveckling Report serial. 99(8)*, 1-28.



Research Paper

Experimental assesment of discharge coefficient in curved compound weirs

N.S. Hoseini, M.Meftah Halaghi* , A.Dehghani and A. Zahiri

* Crresponding Author: Associate Professor., Department of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. Email: meftahhalaghi@gmail.com

Received:1 June 2019, Accepted:15 May 2020

Extended Abstract

Introduction

Weir structure is widely used as a flow measurement, grade control structure and water surface control in sewer systems, open channels and stilling basins. Having a simple stage-discharge relationship is the most important reason for using these structures as measuring instruments. Curved weir is part of a circle with the non-linear crest axis. To increase the discharge coefficient, one can used curved weir.

Methodology

In this study, hydraulic performance of curved weir and system of compound curved weir with central angles of 90, 120 and 150 degree and with 18 centimeter height were used to investigate and obtain equations for discharge coefficient and flow discharge of this structures.

Results and Discussion

The experiments were conducted in a rectangular channel with length of 9 meter, height and width of 40 centimeter. The results showed that the increase of parameters h/p (water head of the weir to the height of the weir), H/L (water depth upstream of the weir to the length of the weir), h/B (water head of the weir to the width of the channel) and Froude number led to increase discharge coefficient in simple curved weir and compound curves weir. Comparing the weir discharge coefficient showed that the curvature and compounding of weir has a great influence on the discharge coefficient of this structures. So that in simple curved weir, angle of 90 degree has a greater discharge coefficient, but in compound curved weir, angle of 150 degree has a greater discharge coefficient. Also checking of results showed that compound simple compound weir, led to increase value of discharge coefficient around 17 percent.

Conclusions

Checking of discharge coefficient on compound curved weir showed that, increasing dimension of second step in compound curved weir, led to increasing discharge coefficient. So that in discharge equals 12 (lit/sec) discharge coefficient of compound curved weir that height of second step to the width of second step (b_2/b_1) in that equals 0.26) towards compound curved weir that height of second step to the width of second step (h_2/b_1) in that equals 0.4 in vertex angles of 90, 120 and 150 respectively increasing 6, 1.5 and 7 percent .

Keywords: Arc Angle, Coefficient Discharge, Curvature of the Curved, Curved Weir, Water Pass.