نشریه علوم آب و خاک
سال بیست و ششم / شماره دوم / تابستان ۱۴۰۱/ مقاله علمی-پژوهشی: صفحات ۱۰۷ تا ۱۱۸

بررسی آزمایشگاهی هیدرولیک جریان آزاد و مستغرق در سرریز مرکب مستطیلی- قوس دایره‌ای

مهسا صبوری، علیرضا عمادی* و رامین فضل اولی[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۸/۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۵/۹)

چکیده

سرریزهای لبه تیز مرکب اغلب به‌منظور اندازه‌گیری دامنه وسیعی از جریان با دقت مناسب در کانال‌های روباز مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش آزمایش‌هایی به‌منظور بررسی هیدرولیک جریان عبوری از سازه سرریز مرکب مستطیلی- قوس دایره‌ای با تغییرات پارامترهای هیدرولیکی و هندسی در شرایط جریان آزاد و مستغرق انجام شد. مشخصات سرریزهای مورد استفاده شامل عرض دهانه مستطیلی ۳۹ سانتی‌متر، شعاع قوس دایره ۵، ۷/۵ و ۱۲/۵ سانتی‌متر و ارتفاع سرریز ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر هستند. نتایج نشان داد افزایش شعاع قسمت قوس دایره‌ای و ارتفاع سرریز، موجب افزایش ۲۸/۴ درصدی عمق آب بالادست می‌شود. در یک h/p ثابت، با افزایش شعاع قسمت قوس‌دایره‌ای، میزان ضریب دبی افزایش می‌یابد. همچنین ضریب دبی در حالت مستغرق، کمتر (تا حدود ۴۰ درصد) از حالت جریان آزاد است که علت آن مقاومت عمق پایاب ایجاد شده در برابر عبور جریان است که با افزایش مقدار عمق پایاب، مقاومت در برابر جریان افزایش یافته و به‌عبارت دیگر مقدار ضریب دبی کمتر می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ضریب دبی، سرریز مرکب، استغراق، سرریز دایره‌ای، بررسی آزمایشگاهی.

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: emadia355@yahoo.com

مقدمه

سرریزها یکی از سازه‌های مهم در شبکه‌های آبیاری و زهکشی هستند که به‌منظور تنظیم سطح آب، اندازه‌گیری دبی و کنترل سیلاب به‌کار می‌روند. سرریزهای لبه‌تیز ساده از نظر دقت اندازه‌گیری دبی جریان دارای محدودیت بوده و به‌همین دلیل سرریزهای لبه‌تیز با مقطع مرکب مورد استفاده قرار می‌گیرند. خصوصیات جریان در سرریزهای لبه‌تیز مرکب در مقایسه با سرریزهای لبه‌تیز ساده کاملا متفاوت است. این سرریزها از دو قسمت، مرکز در پایین و دهانه در قسمت بالای خود تشکیل شده است. قسمت مرکزی و دهانه به شکل‌های مختلفی نظیر مستطیلی، ذوزنقه، دایره و غیره طراحی می‌شود. مهم‌ترین امتیاز سرریزهای مرکب توانایی اندازه‌گیری دبی در حجم بالاتری از جریان و دقت در محاسبه دبی برای جریان‌های کم تا زیاد است.

اولین مطالعات تجربی روی سرریزهای مرکب، توسط برگمن (۵) انجام شده که ظرفیت جریان روی سه مدل سرریز لبه‌تیز مرکب با فشردگی جانبی در یک کانال مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج به‌صورت یک معادله تجربی، به‌منظور ارزیابی دبی جریان برحسب بار هیدرولیکی نسبت به دهانه مثلثی، بار هیدرولیکی نسبت به تاج افقی دهانه مستطیلی و عرض دهانه مستطیلی سرریز ارائه شد. مارتینز و همکاران (۹) با بررسی روی سرریز لبه تیز مرکب مثلثی- مثلثی با اثبات پیوستگی رابطه دبی- اشل در تمامی عمق‌های جریان روی این نوع سرریز، آن را برای استفاده در سدهای رسوب‌گیر در حوضه‌های کوهستانی پیشنهاد کردند. یاسی و عباسپور (۱۵) با بررسی جریان در سرریز لبه‌تیز مرکب مثلثی- مستطیلی با زاویه رأس ۹۰ درجه در حالت فشردگی و بدون فشردگی جانبی به این نتیجه رسیدند که با افزایش ارتفاع سطح آب روی سرریز و در محدوده تداخل جریان در مرز سرریزهای مثلثی و مستطیلی، ضریب دبی به‌طور متناوب افزایش و کاهش می‌یابد. ارونقی و همکاران (۲) با هدف افزایش ضریب جریان در سرریز ذوزنقه‌ای، دو سرریز ذوزنقه‌ای و نیم‌دایره‌ای را ترکیب کردند که در این حالت ضریب جریان حدود ۱۵ درصد افزایش یافت.

لی و همکاران (۸) در آزمایش‌های خود به بررسی ضریب دبی در یک مدل با هندسه خاص سرریز لبه تیز مرکب ذوزنقه‌ای- مستطیلی پرداختند و با برداشت داده‌های پروفیل سرعت نتیجه گرفتند که ضریب انرژی جنبشی با افزایش عمق آب روی سرریز کاهش می‌یابد. پوراسکندر و همکاران (۱۲) با بررسی آزمایشگاهی سرریز لبه پهن مستطیلی- مستطیلی با عرض‌های مختلف در قسمت مرکزی و ارتفاع‌های مختلف نشان دادند که به‌ازای هد ثابت روی سرریز، با افزایش عرض در قسمت مرکزی دبی عبوری و ضریب دبی افزایش یافته، آستانه استغراق کاهش می‌یابد. التوخی و ابراهیم (۷) به بررسی توزیع سرعت در جهت عرضی و طولی در پایین‌دست سرریزهای مرکب پرداختند. در این مطالعه، سه سرریز مرکب مثلثی- ذورنقه‌ای با سه بازشدگی، دو بستر به‌صورت ماسه‌ای و پلاستیک و در سه عمق پایین‌دست استفاده شده است. عامری و همکاران (۱) به بررسی ضریب تخلیه سرریز مرکب جانبی مثلثی- مستطیلی در شرایط جریان زیربحرانی پرداختند. در این مطالعه، ضریب تخلیه از ترکیب سرریز لبه تیز جانبی متشکل از بخش مستطیل شکل و مثلثی به‌دست آمد. نتایج به‌دست آمده نشان داد، ضریب تخلیه یک سرریز جانبی مرکب تابعی از عدد فرود بالادست، نسبت ارتفاع وزنی تاج به عمق آب بالادست و نسبت طول به عمق آب بالادست است. صیادی و حیدرپور (۱۳) ضریب دبی سرریز مستطیلی با فشردگی جانبی و سرریز مرکب مستطیلی- مستطیلی را در شرایط آزاد و مستغرق مطالعه کردند. نتایج نشان داد که با افزایش دبی جریان تا شروع جریان به‌صورت عبور از سرریز مرکب مستطیلی- مستطیلی، ضریب دبی کاهش می‌یابد. نتایج تحقیق موسوی و همکاران (۱۰) نشان داد به‌ازای بار آبی معین، با افزایش ارتفاع تاج سرریز در سرریز مرکب قوس- دایره‌ای- مستطیلی، ضریب دبی حدوداً تا ۵ درصد کاهش می‌یابد. همچنین به‌ازای بار آبی معین، با افزایش عرض دهانه مستطیلی، ضریب دبی در حدود ۲ تا ۱۰ درصد افزایش می‌یابد. پسرکلو و عمادی (۱۱) در مقایسه سازه ترکیبی سرریز- دریچه با سرریز مرکب دایره‌ای- ذوزنقه‌ای- مستطیلی سرریز -دریچه

نشان دادند ضریب دبی جریان در سرریزهای مرکب در محدوده ۰/۵۸ تا ۰/۸۵ و در سرریز- دریچه مرکب در محدوده ۰/۳۸ تا ۰/۷۸ است. همچنین آذر پیوند و همکاران (۳) در بررسی تأثیر افزایش طول مؤثر بر دبی عبوری سرریزهای کنگره‌ای ذوزنقه‌ای شکل مرکب نشان دادند نسبت پارامتر ضریب دبی به پارامتر بار هیدرولیکی کل به ارتفاع سرریز ابتدا افزایش یافته و پس از رسیدن به یک مقدار حداکثر شروع به کاهش می‌کند. بیشترین تأثیرات بر ضریب دبی ناشی از تعداد سیکل و نسبت بار هیدرولیکی کل به ارتفاع سرریز است. بادور (۴) به‌منظور بهبود عملکرد هیدرولیکی سرریزهای مرکب، روش‌های طراحی این سرریزها را به‌عنوان سرریزهای سهمی شکل مورد بحث قرار داد.

هدف از انجام پژوهش حاضر بررسی آزمایشگاهی هیدرولیک جریان عبوری از سازه سرریز مرکب با دو مقطع مستطیلی و دایره‌ای با تغییرات پارامترهای عمق آب بالادست، شعاع سرریز دایره‌ای، ارتفاع‌های مختلف سرریز در شرایط جریان آزاد و مستغرق است.

مواد و روش‌ها

تحلیل ابعادی

پارامترهای مؤثر بر هیدرولیک جریان آزاد روی سرریز مرکب لبه‌تیز مستطیلی- قوس دایره‌ای به‌صورت رابطه ۱ است. رابطه ۲ پارامترهای بدون بعد به‌دست آمده از آنالیز ابعادی را نشان می‌دهد:

$$f(h,p,w,b_1,R,\nu,\rho,\sigma,\mu,g,y,C_d)=0 \qquad (۱)$$

در این رابطه، h: بار آبی مؤثر، b1: عرض مؤثر، P: ارتفاع سرریز و R: شعاع است.

$$\left(\frac{\rho vh}{\mu},\frac{\rho v^2 h}{\sigma},\frac{v^2}{h\rho},\frac{h}{b_1},\frac{h}{R},\frac{h}{P},\frac{w}{h},\frac{h}{y},Cd\right)=0 \qquad (۲)$$

که رابطه ۲ به شکل رابطه ۳ ساده می‌شود:

$$f\left(Re,\ We,\ Fr,\frac{h}{b_1},\frac{h}{R},\frac{h}{P},\frac{w}{h},\frac{h}{y},C_d=0\right) \qquad (۳)$$

اگر جریان روی سازه ورقه‌ای نباشد، از رابطه فوق می‌توان تأثیرات لزجت در رفتار سیال را نادیده گرفت. چنانچه مقدار محدودیت حداقل ارتفاع آب روی سرریز (۲/۵ سانتی‌متر) رعایت شود، می‌توان اثر کشش سطحی را کاهش داد (۶). بدین ترتیب با حذف اعداد بی‌بعد رینولدز و وبر می‌توان رابطه ۳ را به‌صورت رابطه ۴ بیان کرد:

$$f\left(Fr,\frac{h}{b_1},\frac{h}{R},\frac{h}{P},\frac{w}{h},\frac{h}{y},C_d\right)=0 \qquad (۴)$$

در نتیجه، ضریب دبی (Cd) در سرریز مرکب مستطیلی- قوس دایره‌ای، تابعی از پارامترهای بی‌بعد رابطه ۵ است:

$$C_d=f\left(Fr,\frac{h}{b_1},\frac{h}{R},\frac{h}{P},\frac{w}{h},\frac{h}{y}\right)=0 \qquad (۵)$$

جریان عبوری از سازه ترکیبی زمانی مستغرق نامیده می‌شود که تراز آب پایین‌دست سازه روی ضریب دبی تأثیر بگذارد. بنابراین در شرایط جریان مستغرق عمق پایین‌دست سازه نیز یکی از پارامترهای مؤثر بر ضریب دبی است. بدین ترتیب تابع جریان روی سرریز مرکب لبه تیز مستطیلی- قوس دایره‌ای در حالت مستغرق را می‌توان به‌صورت ذیل نوشت:

$$f\left(h,p,w,b_1,R,h_d,\nu,\rho,\sigma,\mu,g,y,C_d\right)=0 \qquad (۶)$$

$$\left(\frac{\rho vh}{\mu},\frac{\rho v^2 h}{\sigma},\frac{v^2}{h\rho},\frac{h}{b_1},\frac{h}{R},\frac{h}{P},\frac{w}{h},\frac{h}{y},\frac{hd}{h},C_d\right)=0 \qquad (۷)$$

h_d: ارتفاع آب روی سرریز در پایین‌دست سازه است.

با حذف اثرات لزجت و کشش سطحی در رابطه فوق، ضریب دبی (Cd) در سرریز مرکب مستطیلی- قوس دایره‌ای، تابعی از پارامترهای بی‌بعد رابطه ۸ می‌شود:

$$C_d=f\left(Fr,\frac{h}{b_1},\frac{h}{R},\frac{h}{p},\frac{h}{h_d},\frac{w}{h},\frac{h}{y},\frac{hd}{h}\right) \qquad (۸)$$

تحلیل ریاضی

در حالتی که آب از دو مقطع می‌گذرد، دبی از مجموع یک مقطع مستطیلی و یک مقطع دایره‌ای و قرار دادن عمق مؤثر روی هر مقطع به‌دست آید. در حالت کلی برای سرریز مرکب دبی کل از رابطه ۹ محاسبه می‌شود:

$$Q_T=Q_R+Q_C \qquad (۹)$$

که در آن Q_R دبی سرریز مستطیلی و Q_C دبی سرریز دایره‌ای است.

رابطه ۱۰ دبی عبوری از سرریزهای لبه تیز مستطیلی را به صورت کلی نمایش می‌دهد:

$$Q_R = \frac{2}{3}.C_{dR}.b.\sqrt{2g}.H^{\frac{3}{2}} \quad (۱۰)$$

که در این رابطه Q_R: دبی عبوری (مترمکعب بر ثانیه)، C_{dR}: ضریب دبی سرریز مستطیلی (متر)، b: عرض سرریز مستطیلی (متر)، g: شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه) و H: هد کل آب روی سرریز (متر) هستند.

دبی عبوری از سرریزهای دایره‌ای به‌صورت رابطه زیر است (۱۴):

$$Q = C_{dc}\, 2\sqrt{2g}\,(h)^{1.5}\,\varphi(\eta)\,D \quad (۱۱)$$

در این معادله پارامتر D، قطر سرریز دایره‌ای لبه تیز، h، ارتفاع آب بالادست و C_{dc} ضریب دبی سرریز دایره‌ای است. مقدار $\varphi(\eta)$ با استفاده از معادله ۱۲ به‌دست می‌آید:

$$\varphi(\eta) = 0.1963\eta^{0.5}\left(\sqrt{1-0.2200\eta}\right)+\sqrt{1-0.7730\eta} \quad (۱۲)$$

η نسبت پرشدگی سرریز به‌صورت $\eta = \frac{h}{D}$ بیان می‌شود که این نسبت برای $0 < \eta < 1$ می‌شود.

روابط ۱۳ و ۱۴ ضریب دبی عبوری از سرریز مرکب مستطیلی- قوس دایره‌ای را نشان می‌دهند:

$$Q = \frac{2}{3}(C_{dR})(b)\sqrt{2g}\,(H)^{1.5} + C_{dC}\Phi D^{2.5} \quad (۱۳)$$

$$C_d = \frac{Q}{\frac{2}{3}b\sqrt{2g}H^{1.5} + \Phi D^{2.5}} \quad (۱۴)$$

تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری در یک فلوم مستطیل شکل از جنس شیشه به‌طول ۱۰، عرض ۰/۴۹ و ارتفاع ۰/۸ متر انجام شد. دبی فلوم از دو پمپ با مجموع دبی حداکثر ۶۰ لیتر بر ثانیه به‌صورت گردشی تأمین می‌شود. شکل ۱ نمای جانبی کانال آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

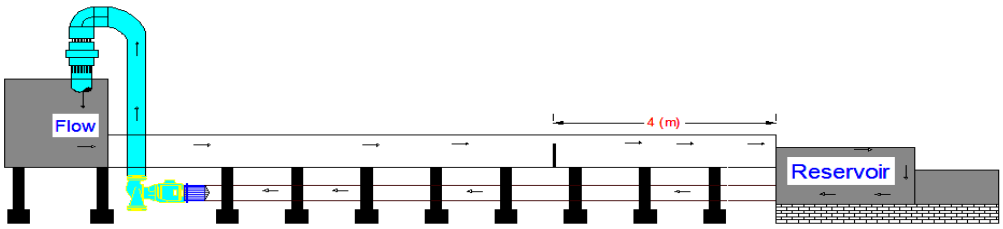
سرریزهای مرکب مستطیلی - قوس دایره‌ای (Weir Compound Rectangular Semi Circular) WCRC استفاده شده در این پژوهش از جنس پلکسی گلاس به ضخامت ۱۰ میلی‌متر بوده، که به‌وسیله لیزر برش داده شد و با دستگاه، تاج سرریز به‌صورت لبه‌تیز درآمد. در این پژوهش سعی شد که سطح تاج لبه، تیز و صاف باشد تا اثر زبری سطح تاج کاهش یابد و بتوان از اثر زبری روی ضریب دبی صرف‌نظر کرد. در جدول ۱ مشخصات سرریزها ارائه شده است. شکل ۲ سرریز مرکب مستطیلی- قوس دایره‌ای را نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

بررسی منحنی دبی- اشل

شکل ۳ منحنی دبی- اشل سرریز مرکب مستطیلی- قوس دایره‌ای، برای سه شعاع دایره ۵، ۷/۵ و ۱۲/۵ سانتی‌متر با ارتفاع‌های سرریز ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر را نشان می‌دهد. با توجه به شکل می‌توان گفت که در یک ارتفاع ثابت، هر چه مقدار شعاع قسمت دایره‌ای بیشتر شود دبی عبوری از سرریز افزایش می‌یابد که ناشی از افزایش سطح مقطع جریان عبوری است. با توجه به شکل ۳-الف در یک h ثابت به‌طور میانگین، میزان افزایش دبی عبوری در شعاع‌های ۷/۵ و ۱۲/۵ سانتی‌متر نسبت به شعاع ۵ سانتی‌متر به‌ترتیب ۴/۳ و ۱۸ درصد افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به شکل ۳-ب در یک h ثابت به‌طور متوسط، میزان افزایش دبی عبوری در شعاع‌های ۷/۵ و ۱۲/۵ سانتی‌متر نسبت به شعاع ۵ سانتی‌متر به‌ترتیب ۲ و ۲۱ درصد افزایش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در رابطه دبی- اشل در تمامی عمق‌های جریان، پیوستگی وجود دارد.

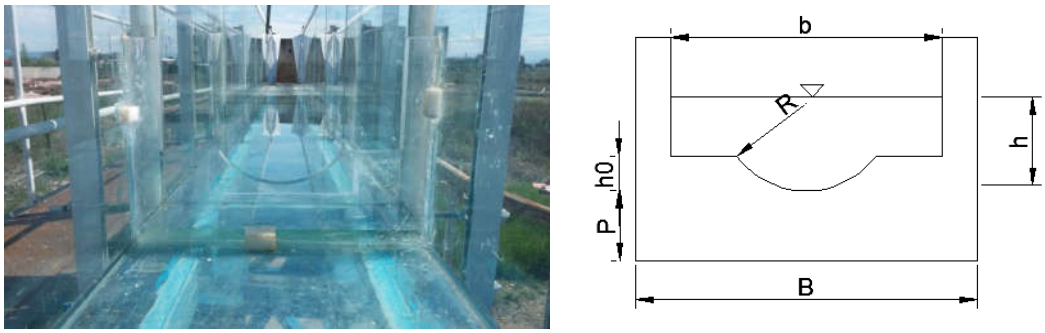
با افزایش ارتفاع سرریز در یک h و R ثابت، دبی افزایش می‌یابد. به‌ازای یک عمق ثابت، سرریز با شعاع ۱۲/۵ و ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر بیشترین میزان دبی عبوری و سرریز با شعاع ۵ و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر کمترین میزان دبی عبوری دارد. بنابراین افزایش شعاع قسمت قوس دایره‌ای و ارتفاع سرریز، موجب



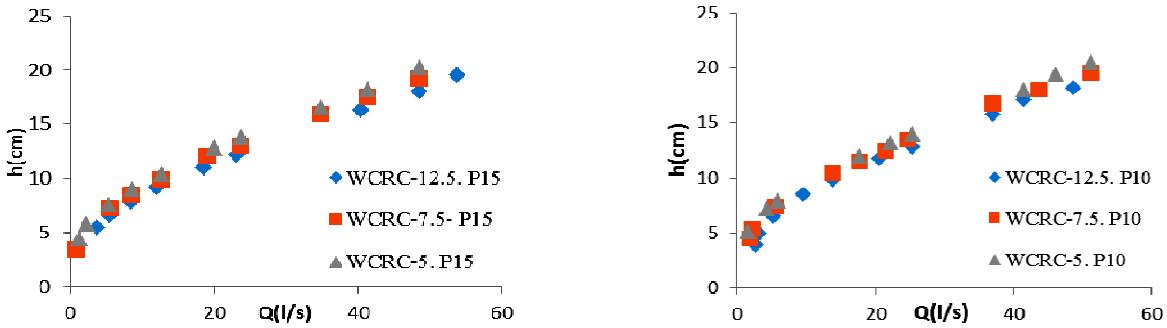
شکل ۱. نمای جانبی کانال آزمایشگاهی

جدول ۱. مشخصات سرریز مرکب مستطیلی- قوس دایره‌ای

ردیف	نام سرریز	عرض سرریز (B) (سانتی‌متر)	ارتفاع سرریز (P) (سانتی‌متر)	شعاع قوس دایره (R) (سانتی‌متر)	طول قسمت مستطیلی (b) (سانتی‌متر)
۱	WCRC-5.P10	۴۹	۱۰	۵/۰	۳۹
۲	WCRC-7.5.P10	۴۹	۱۰	۷/۵	۳۹
۳	WCRC-12.5.P10	۴۹	۱۰	۱۲/۵	۳۹
۴	WCRC-5.P15	۴۹	۱۵	۵/۰	۳۹
۵	WCRC-7.5.P15	۴۹	۱۵	۷/۵	۳۹
۶	WCRC-12.5.P15	۴۹	۱۵	۱۲/۵	۳۹



شکل ۲. سرریز مرکب مستطیلی- قوس دایره‌ای



ب- ارتفاع سرریز ۱۵ سانتی‌متر
الف- ارتفاع سرریز ۱۰ سانتی‌متر

شکل ۳. منحنی دبی- اشل در مدل‌های WCRC با شعاع‌های مختلف

افزایش ۲۸/۴ درصدی عمق آب بالادست می‌شود.

تغییرات ضریب دبی نسبت به دبی

شکل ۴ تغییرات ضریب دبی در برابر دبی سرریز مرکب مستطیلی- قوس دایره‌ای را نشان می‌دهد. در هر دو ارتفاع، سرریز با شعاع ۱۲/۵ سانتی‌متر بیشترین ضریب دبی را دارا است، بنابراین مدل با شعاع بیشتر در هر دو ارتفاع، بهترین مدل در حالت آزاد برآورد می‌شود. با افزایش دبی، عمق جریان در بالادست افزایش می‌یابد. با این افزایش عمق، روند تأثیر فشردگی جریان ناشی از مقطع نسبت به افزایش دبی کمتر می‌شود. بنابراین به‌تدریج تأثیر فشردگی خطوط جریان ثابت شده و درنتیجه ضریب دبی ثابت می‌شود.

با توجه به شکل ۵ با درنظر گرفتن دبی ثابت سرریز با شعاع ۱۲/۵ و ارتفاع سرریز ۱۵ سانتی‌متر بیشترین ضریب دبی را نسبت به تمامی حالت‌ها دارد و مدل بهینه درنظر گرفته می‌شود.

بررسی تغییرات ضریب دبی نسبت به پارامتر بدون بعد h/p

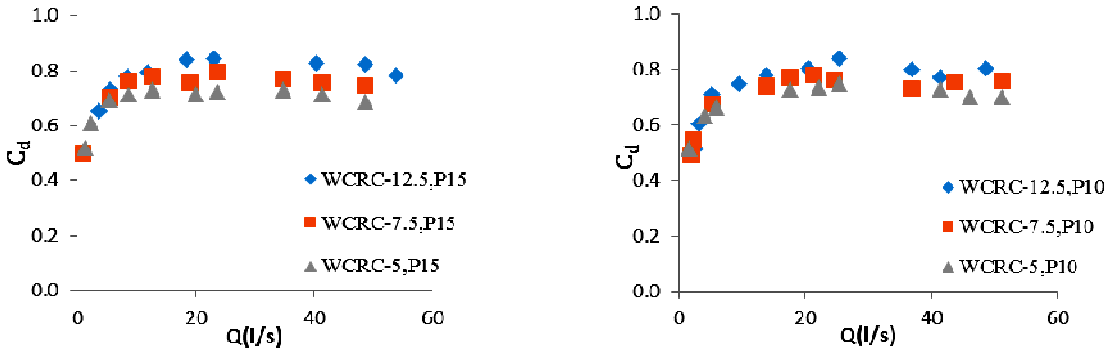
با توجه به شکل ۶ (الف و ب)، تغییرات ضریب دبی (Cd) با افزایش ارتفاع سطح آب بالادست (h)، تحت تأثیر محدوده تداخل هندسه جریان قوس دایره‌ای و مستطیلی و ایجاد شرایط استغراق جریان و توسعه شدت تلاطم بر سطح آب بالادست، قرار می‌گیرد. به‌طوری که با توجه به شکل ۶-الف وقتی جریان در محدوده سرریز قوس دایره‌ای، یعنی ۰/۴ <h/p<۰/۵۴، ضریب دبی با افزایش h/p افزایش می‌یابد. هنگامی که سطح جریان در محدوده سرریز مستطیلی قرار می‌گیرد یعنی h/p>۰/۵۴، سهم جریان در مقطع مستطیلی غالب و ضریب دبی با افزایش h/p با شیب کمتری افزایش می‌یابد و با افزایش دبی تغییرات به‌نسبت ثابت می‌شود که در این پژوهش با توجه به محدود بودن داده‌ها در دبی بالا این ثبات به‌طور کامل مشاهده نمی‌شود. همچنین با توجه به شکل ۶- ب جریان در محدوده سرریز قوس دایره‌ای، یعنی ۰/۲۳ <h/p<۰/۳۲، ضریب دبی با افزایش h/p افزایش می‌یابد. هنگامی که سطح جریان در محدوده سرریز مستطیلی قرار می‌گیرد یعنی h/p>۰/۳۲، سهم جریان در مقطع مستطیلی غالب و ضریب دبی با افزایش h/p با شیب کمتری افزایش می‌یابد و با افزایش دبی تغییرات به‌نسبت ثابت می‌شود. در واقع با توجه به اینکه در سرریز مستطیلی، دبی متناسب با $h^{3/2}$ است، تغییرات ضریب دبی به‌تدریج تعدیل می‌یابد. همچنین می‌توان مشاهده کرد که در یک h/p ثابت، با افزایش شعاع قسمت قوس دایره‌ای، میزان ضریب دبی افزایش می‌یابد که به‌دلیل کاهش تداخل جت آب عبوری در شعاع بیشتر و درنتیجه کاهش استغراق محلی است.

تغییرات ضریب دبی نسبت به عدد فرود

شکل ۷ تغییرات ضریب دبی در برابر عدد فرود را نشان می‌دهد. در هر دو ارتفاع، سرریز با شعاع ۱۲/۵ سانتی‌متر بیشترین ضریب دبی را دارا است، بنابراین مدل با شعاع بیشتر در هر دو ارتفاع، بهترین مدل در حالت آزاد برآورد می‌شود.

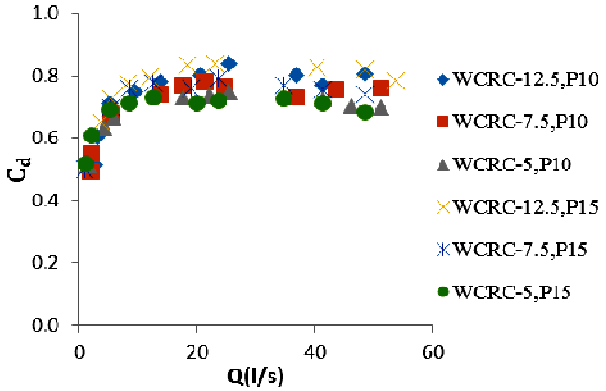
تأثیر میزان استغراق بر ضریب دبی نسبی در مدل‌های WCRC

شکل ۸ تأثیر میزان استغراق بر ضریب دبی نسبی (ضریب دبی حالت مستغرق به حالت آزاد) را نشان می‌دهد. مطابق شکل با افزایش میزان استغراق H_{TW}/H، در هر سه شعاع ضریب دبی نسبی با دو روند متفاوت کاهش یافته است. یکی مربوط به زمانی که عمق پایاب (H_{TW}) تنها سبب استغراق سرریز قوس‌دایره‌ای شده و دیگری مربوط به حالتی است که عمق پایاب علاوه بر مستغرق کردن سرریز قوس دایره‌ای، سبب استغراق سرریز مستطیلی نیز می‌شود. مطابق شکل ۸- الف در محدوده استغراق سرریز قوس دایره‌ای یعنی تا میزان استغراق ۰/۷، تغییرات کاهش ضریب دبی کم و شیب نمودار تند بوده است ولی با شروع استغراق سرریز مستطیلی تغییرات کاهش ضریب دبی بسیار افزایش یافته و شیب نمودار کند و تقریباً ثابت می‌شود. همان‌طور که در شکل ۸- ب مشاهده می‌شود قبل از میزان استغراق ۰/۶، شیب نمودار تند و بعد از آن شیب کند می‌شود. همچنین با توجه به شکل ۸- ج شیب نمودار در میزان

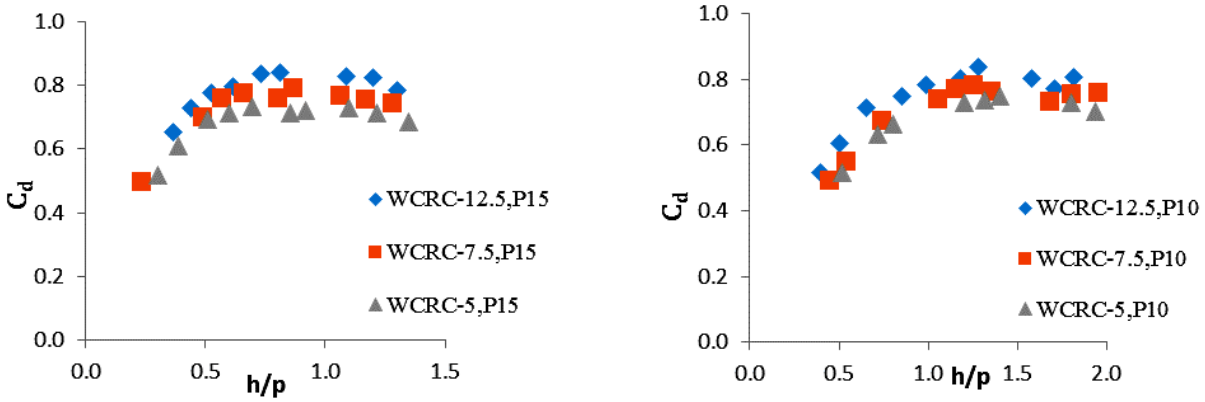


ب- ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر الف- ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر

شکل ۴. منحنی دبی در برابر ضریب دبی

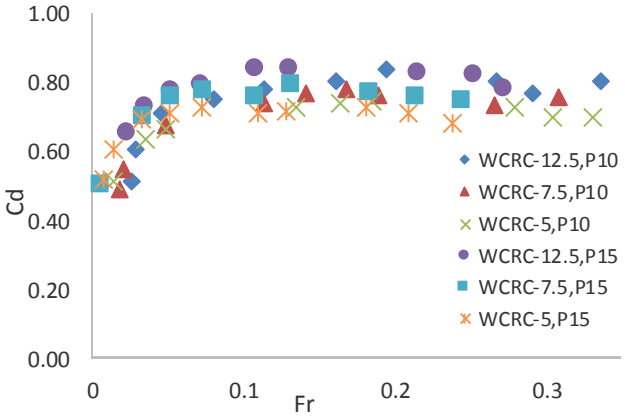


شکل ۵. منحنی دبی در برابر ضریب دبی در مدل‌های WCRC با شعاع‌های مختلف در ارتفاع‌های متفاوت سرریز

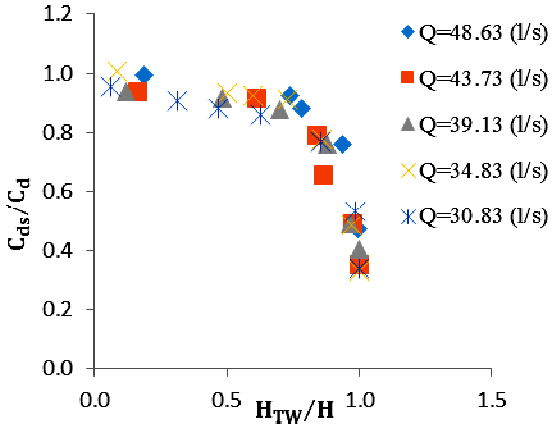


ب- ارتفاع سرریز ۱۵ سانتی‌متر الف- ارتفاع سرریز ۱۰ سانتی‌متر

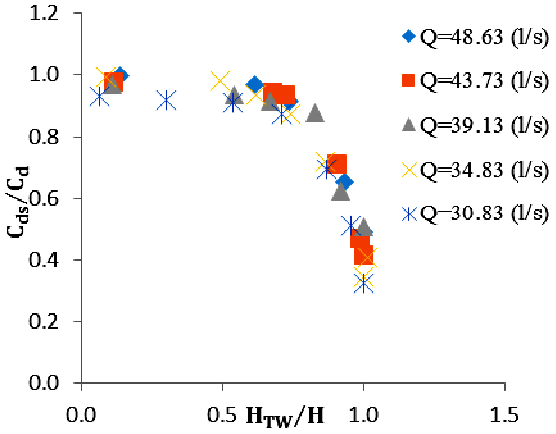
شکل ۶ . تغییرات Cd نسبت به پارامتر بدون بعد h/p



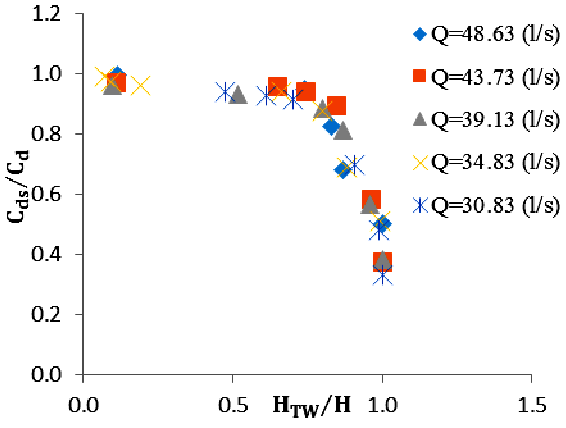
شکل ۷. تغییرات Cd نسبت به عدد فرود



الف- شعاع ۱۲/۵ سانتی‌متر



ب- شعاع ۷/۵ سانتی‌متر



ج-شعاع ۵ سانتی‌متر

شکل ۸. منحنی تغییرات H_{TW}/H نسبت به C_{ds}/C_d با ارتفاع سرریز ۱۰ سانتی‌متر

استغراق ۰/۲ از حالت تند به حالت کند تغییر پیدا می‌کند. با بررسی شکل ۸ (الف، ب و ج) اثر استغراق ضریب دبی سازه سرریز مرکب مستطیلی- قوس دایره‌ای را بسته به میزان استغراق، تا حدود ۳۰ درصد ضریب دبی در حالت آزاد، کاهش می‌دهد.

تغییرات میزان استغراق با ضریب دبی با ارتفاع سرریز ۱۵ سانتی‌متر در شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به شکل با افزایش میزان استغراق، مقدار ضریب دبی نسبی کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به شکل محدوده کاهش شیب و افزایش نرخ کاهش ضریب دبی برای شعاع ۱۲/۵، ۷/۵ و ۵ سانتی‌متر به‌ترتیب برابر میزان استغراق ۰/۶۵، ۰/۶۳ و ۰/۵۹ است. نکته مهم در این سه نمودار، تفاوت شیب در دو محدوده استغراق است. می‌توان این‌گونه بیان کرد که تأثیر همزمان سرریز مستطیلی و قوس دایره‌ای باعث افزایش نرخ کاهش ضریب دبی شده و همچنین تأثیر مدل ترکیبی سرریز مرکب مستطیلی- قوس دایره‌ای به ضریب دبی بیشتر از حالت سرریز ساده است. با بررسی شکل ۹ اثر استغراق ضریب دبی را بسته به میزان استغراق، تا حدود ۴۰ درصد نسبت به ضریب دبی در حالت آزاد، کاهش می‌دهد.

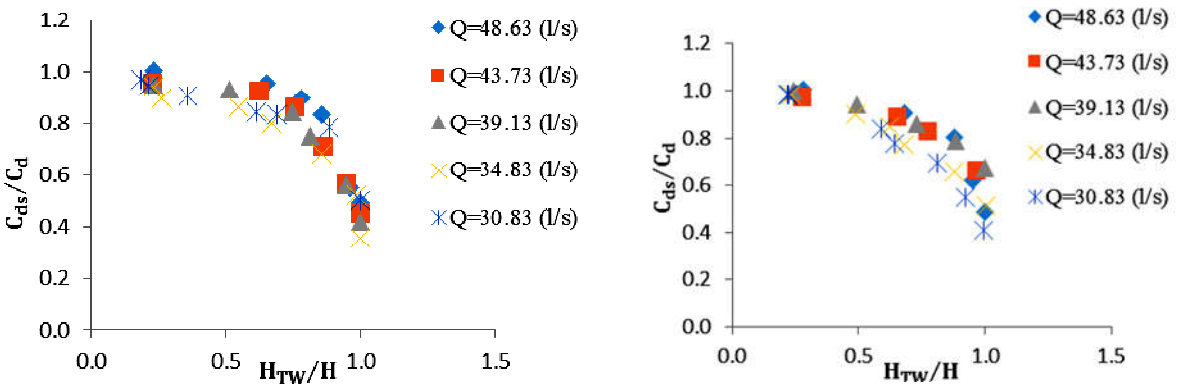
مقایسه تأثیر میزان استغراق بر ضریب دبی مستغرق با ارتفاع سرریز متفاوت در دبی حداکثر

با توجه به شکل ۱۰ برای یک ارتفاع ثابت، با افزایش شعاع سرریز قوس دایره‌ای مقدار ضریب دبی مستغرق نیز افزایش می‌یابد، زیرا در یک دبی ثابت، تقریباً عمق بالادست ثابت بوده و افزایش شعاع باعث دیرتر مستغرق شدن و افزایش ضریب دبی مستغرق می‌شود. همچنین با درنظر گرفتن شعاع یکسان برای دو مدل و ارتفاع متفاوت سرریز مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع سرریز مقدار ضریب دبی نیز افزایش می‌یابد، که این‌گونه می‌توان بیان کرد که با افزایش ارتفاع سرریز، مقدار ارتفاع بالادست نیز افزایش می‌یابد و همچنین با افزایش شعاع، زمان بیشتری نسبت به ارتفاع کمتر سرریز برای مستغرق شدن مدل لازم خواهد بود. با درنظر گرفتن میزان استغراق ثابت در یک ارتفاع ثابت سرریز ۱۰ سانتی‌متر، مقدار ضریب دبی مستغرق برای شعاع ۱۲/۵ و ۷/۵ سانتی‌متر نسبت به شعاع ۵ سانتی‌متر به‌ترتیب ۲۴ و ۲ درصد افزایش می‌یابد و با درنظر گرفتن میزان استغراق ثابت در شعاع ثابت ۱۲/۵ سانتی‌متر در دو ارتفاع، مقدار ضریب دبی مستغرق برای ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر نسبت به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر ۲۳/۵ درصد افزایش می‌یابد.

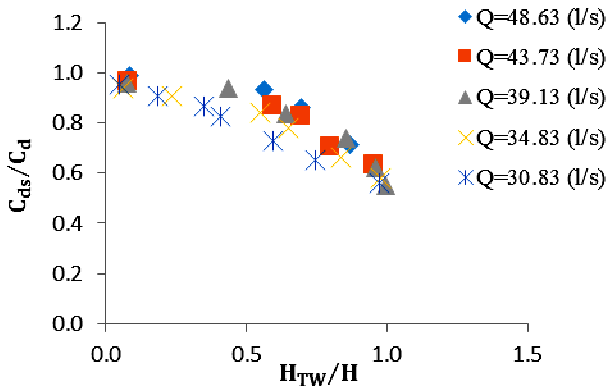
نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی آزمایشگاهی هیدرولیک جریان عبوری از سازه سرریز مرکب مستطیلی- قوس دایره‌ای با تغییرات پارامترهای هیدرولیکی و هندسی مانند میزان عمق آب بالادست و ابعاد سازه، در شرایط جریان آزاد و مستغرق پرداخته و نتایج زیر به‌دست آمد:

- در رابطه دبی- اشل در تمامی عمق‌های جریان، پیوستگی وجود دارد. با توجه به منحنی‌های دبی- اشل، این سرریزها از دبی‌های کم تا دبی‌های زیاد (زمان‌های سیلابی) کاربرد دارد، به این صورت که از سرریز قسمت پایینی برای اندازه‌گیری دقیق دبی‌های کم و از سرریز مستطیلی بالایی برای اندازه‌گیری دبی‌های زیاد استفاده می‌شود.
- در این نوع سرریزها با افزایش شعاع و ارتفاع سرریز، مقدار دبی عبوری از سرریز نیز افزایش می‌یابد.
- در سرریز مرکب مستطیلی- قوس دایره‌ای با افزایش مقدار پارامتر بدون بعد h/p، ضریب دبی افزایش می‌یابد. هنگامی که سرریز فقط در مقطع دایره‌ای عمل می‌کند، نمودار شیب بیشتری دارد ولی با افزایش ارتفاع آب بالادست و تأثیر مقطع مستطیلی سرریز در جریان، سرریز مستطیلی غالب شده و افزایش ضریب دبی با شیب کمتری ادامه پیدا می‌کند تا جایی که نمودار ثابت می‌شود.
- در یک h/p ثابت، با افزایش شعاع قسمت قوس دایره‌ای،

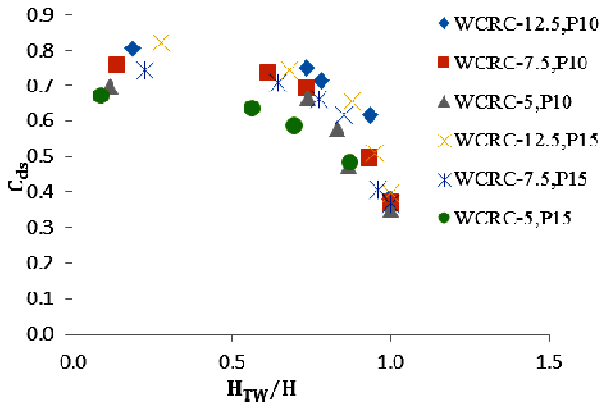


الف- شعاع ۱۲/۵ سانتی‌متر ب- شعاع ۷/۵ سانتی‌متر



ج- شعاع ۵ سانتی‌متر

شکل ۹. منحنی تغییرات H_{TW}/H نسبت به C_{ds}/C_d با ارتفاع سرریز ۱۵ سانتی‌متر



شکل ۱۰. منحنی تغییرات H_{TW}/H نسبت به C_{ds} برای مدل‌های WCRC در دبی حداکثر

- میزان ضریب دبی افزایش می‌یابد. این مسئله به‌دلیل کاهش تداخل جت آب عبوری در شعاع بیشتر و درنتیجه کاهش استغراق محلی است.
- با افزایش میزان استغراق H_{TW}/H، ضریب دبی نسبی با دو روند متفاوت کاهش یافته و این نشان می‌دهد، در این نوع سازه دو حد استغراق وجود دارد. یکی مربوط به زمانی که عمق پایاب (H_{TW}) تنها سبب استغراق سرریز قوس‌دایره‌ای شده و دیگری مربوط به حالتی است که عمق پایاب علاوه بر مستغرق

کردن سرریز قوس‌دایره‌ای، سبب استغراق سرریز مستطیلی نیز می‌شود.

- برای یک ارتفاع ثابت، با افزایش شعاع سرریز قوس دایره‌ای مقدار ضریب دبی مستغرق نیز افزایش می‌یابد، زیرا در یک دبی ثابت، تقریباً عمق بالادست ثابت بوده و افزایش شعاع باعث دیرتر مستغرق شدن و افزایش ضریب دبی مستغرق می‌شود. همچنین با درنظر گرفتن شعاع یکسان برای دو مدل و ارتفاع متفاوت سرریز مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع سرریز مقدار ضریب دبی نیز افزایش می‌یابد، که این گونه می‌توان بیان کرد که با افزایش ارتفاع سرریز، به‌تبع مقدار ارتفاع بالادست نیز افزایش می‌یابد و همچنین با افزایش شعاع زمان بیشتری نسبت به ارتفاع کمتر سرریز برای مستغرق شدن مدل لازم خواهد بود.
- ضریب دبی در حالت مستغرق، کمتر از حالت جریان آزاد است که علت آن مقاومت عمق پایاب ایجاد شده در برابر عبور جریان است که با افزایش مقدار عمق پایاب، مقاومت در برابر جریان افزایش یافته و به‌عبارت دیگر مقدار ضریب دبی کمتر می‌شود.

منابع مورد استفاده

1. Ameri, M., A. Ahmadi and A. A. Dehghani. 2015. Discharge coefficient of compound triangular-rectangular sharp-crested side weirs in subcritical flow conditions. *Journal of Flow Measurement and Instrumentation* 45: 170-175.
2. Arvanaghi, H., Gh. Mahtabi, M. Valinia, S. Zamanzad Ghavidel and V. Azimi. 2011. Investigation of flow rate coefficient in trapezoidal-semicircular Weir. 10th Iranian Hydraulic Conference 2011, Rasht, Iran.
3. Azarpeyvand, H., A. R. Emadi and A. M. Sedghi. 2019. An experimental study of the discharge of the length increase effect on the composite trapezoidal labyrinth spillway. *Journal of Water and Soil Science (Science and Tecnology of Agriculture and Natural Resources)* 23(10): 405-418.
4. Baddour, E. 2019. Redesigning compound weirs as polynomial weirs. World Environmental and Water Resources Congress 2019. Pittsburgh, Pennsylvania.
5. Bergmann, M. 1963. Specal Weirs. USBR. Water Measurment Manual.
6. Chanson, H. 2009. Discussion of hydraulics of broad-crested weirs with varying side slopes. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 136(7): 508-509.
7. Eltoukhy, M. and M. Ibrahim. 2015. Velocity distribution downstream compound weirs. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences* 9(1): 238-245.
8. Lee, J. T., H. C. Chan, C. K. Huang and J. M. Leu. 2012. Experiments on hydraulic relations for flow over a compound sharp-crested weir. *International Journal of Physical Sciences* 7(14): 2229-2237.
9. Martinez J., J. Recca, M. T. Morillas and J. G. Lopez. 2005. Design andcalibration of a compound sharp-crested weir. *Journal of Hydraulic Engineering* 131(2): 112-116.
10. Mousavi, S. N., D. Farsadizadeh, H. Arvanaghi and A. Abbaspour. 2015. Investigation of discharge of effective parameters on discharge coefficient of compound arched circular-rectangular sharp-crested weirs. *Journal of Water and Soil* 29(4): 861-873. (In Farsi).
11. Pesarakloo, M. and A. R. Emadi. 2018. Study the hydraulic flow on the compound structure of weir- gate with compound weir of circular- trapezoidal rectangular. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research* 19(71): 99-112. (In Farsi).
12. Poureskandar, S., F. Salmasi and A. Hoseinzadeh Dalir. 2012. Experimental investigation of flow over compound rectangular broad-crested weir. 9th International Congress on Civil Engineering 2012. Isfahan, Iran.
13. Sayadi, K. and M. Heydarpour. 2015. Experimental investigation of rectangular weir discharge coefficient with lateral compression and rectangular-rectangular compound weir in free and submerged conditions. 2st National Conference on Development of Civil Engineering 2015, Architecure, Electricity and Mechanical in Iran. Gorgan, Iran.
14. Vatankhah, A. R. 2010. Flow measurement using circular sharp crested weirs. *Flow Measurement and Instrumentation* 21(2): 118-122.
15. Yasi, M. and A. Abbaspour. 2005. Flow over Sharp-Crested, Truncated-Triangular Weirs. *The Scientic Journal of Agriculture (SJA)* 28(2): 165-181. (In Farsi).

Journal of Water and Soil Science
Vol. 26, No. 2, Summer 2022, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Hydraulic Experimental Evaluation of Free and Submerged Flow over Compound Weir of Circular-Rectangular

M. Sabouri, A. R. Emadi* and R. Fazloula[1]

(Received: October 27-2020; Accepted: July 31-2021)

Abstract

A compound sharp-crested weir is often used to measure a wide range of flows with appropriate accuracy in open channels. In this study, experiments were performed to investigate the hydraulic flow through a compound weir of circular-rectangular with changes in hydraulic and geometric parameters in free and submerged flow conditions. The characteristics of the weirs include rectangular spans width of 39 cm, a circular radius of 5, 7.5, and 12.5 cm, and heights of 10 and 15 cm. The results showed that by increasing the radius and height of the Weir, upstream water depth increases around 28.4%. At a constant h/p, the discharge coefficient increases with the increasing radius of the circular arc. Also, in the submerged conditions, the discharge coefficient is less (around 40%) than in the free flow condition, which is due to the resistance of the depth of the created stream against the passage of the flow.

Keywords: Discharge coefficient, Compound weir, Submergence, Circular weir, Experimental evaluation

1. Department of Water Engineering, College of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran
*: Corresponding author, Email: emadia355@yahoo.com