

بررسی آزمایشگاهی جریان آزاد و مستغرق روی سرریزهای شیب‌دار

مهرداد خیرایی^۱، حجت‌اله یونسی^{۲*}، منوچهر فتحی‌مقدم^۳، بابک شاهی‌نژاد^۴ و حسن ترابی‌پوده^۵

۱، ۲، ۴ و ۵- به ترتیب: دانشجوی دکتری سازه‌های آبی؛ استادیاران؛ و دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

۳- استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۵/۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۷/۳۰

چکیده

سرریزها از سازه‌های هیدرولیکی مهم برای کنترل جریان، تنظیم سطح آب و اندازه‌گیری دبی جریان در کانال‌های آبیاری هستند. مزیت سرریزهای شیب‌دار به واسطه وجود شیب بالادست آن است که از به‌وجود آمدن منطقه سکون آب در بالادست جلوگیری می‌کند. سرریزها با تسهیل در عبور ذرات رسوب می‌توانند استغراق زیادی را تحمل کنند. هدف از این تحقیق بررسی شرایط جریان آزاد و مستغرق و ارائه روابطی برای محاسبه ضریب دبی این نوع سرریزها و مقایسه این نوع سرریزها با سرریز لبه پهن مستطیلی است. برای این منظور، سه مدل سرریز شیب‌دار با شیب بالادست، شیب پایین‌دست و شیب ترکیبی بالادست و پایین‌دست و یک مدل سرریز لبه پهن مستطیلی در دامنه‌ای وسیع از دبی‌ها (۳ تا ۳۰ لیتر بر ثانیه با گام‌های ۳ لیتر بر ثانیه) در یک فلوم آزمایشی به طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۱۵، ۰/۳ و ۰/۵ متر بررسی شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد با افزایش نسبت هد کل جریان روی سرریز به عرض قاعده سرریز از ۰/۲ تا ۱، ضریب انتقال دبی سرریزهای شیب‌دار از ۰/۳۷ به ۰/۵۶ افزایش می‌یابد و ضریب انتقال دبی سرریز لبه پهن مستطیلی از ۰/۵۵ به ۰/۴۱ کاهش می‌یابد و بیشترین ضریب انتقال دبی مربوط به مدل سرریز با شیب ترکیبی بالادست و پایین‌دست و کمترین ضریب انتقال دبی مربوط به مدل سرریز با شیب بالادست است. نتایج تحقیق همچنین نشان داد سرریز لبه پهن حساسیت کمتری به تغییرات نسبت هد کل جریان روی سرریز به عرض قاعده سرریز دارد. دو رابطه نیز برای محاسبه ضریب‌های انتقال دبی در شرایط جریان آزاد و مستغرق در سرریزهای شیب‌دار ارائه شده است. ضریب تبیین و جذر میانگین مربعات خطا به ترتیب برای شرایط جریان آزاد ۰/۹۰ و ۰/۰۱۷ و برای شرایط جریان مستغرق به ترتیب ۰/۹۱ و ۰/۰۴۰ به دست آمد.

واژه‌های کلیدی

پروفیل سطح آب، ضریب انتقال دبی، نسبت ارتفاع به عرض سرریز

مقدمه

می‌کنند و از این رو هر یک از آنها برای هدف‌هایی معین به کار گرفته می‌شود. سرریزها سازه‌هایی هستند که باعث بالا آمدن سطح آب در پشت خود و ایجاد مقطع کنترل می‌شوند و وسیله‌ای ساده و مطمئن برای اندازه‌گیری جریان آب به حساب می‌آیند. از آنجاکه سرریزها در کارهای مهندسی آب

هر سازه‌ای که در مسیر جریان قرار گیرد و یک رابطه دبی و عمق ساده، مشخص و معینی در اطراف خود تثبیت کند، سازه کنترل‌کننده جریان نامیده می‌شود. سازه‌های مختلف با توجه به شرایط فیزیکی خاص، روابط متفاوتی بین دبی و عمق جریان ایجاد

مطالعات آنها استفاده کردند. وودبرن (Woodburn, 1932) در شرایط جریان مستغرق به آزمایش‌هایی پرداخت و نشان داد که با استفاده از عمق بحرانی به وجود آمده روی سرریز می‌توان بدون استفاده از ضریب‌های دبی و به‌صورت مستقیم دبی را اندازه‌گیری کرد. ترسی (Tracy, 1957) به کمک تحلیل ابعادی نتیجه گرفت که ضریب دبی تابع بار کل آب در بالادست جریان، طول تاج و ارتفاع سرریز است. اسمیت (Smith, 1959) به‌منظور مطالعه جریان مستغرق روی سرریز با شیب‌های بالادست و پایین‌دست، به دو سری آزمایش دست زد. تغییرات هد بالادست بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۵ متر، طول تاج سرریز ۰/۱۵ متر و شیب‌های بالادست و پایین‌دست ۱:۱ و ۲:۱ بود. ابوسیدا و قریشی (Abou-seida & Quraishi, 1976) به بررسی آزمایشگاهی هیدرولیک جریان روی سرریز لبه تیز و لبه پهن در شرایط جریان آزاد و مستغرق پرداختند. هگر و شوالت (Hager & Schwalt, 1994) پهن با تاج تیز گوشه و بالادست عمودی را بررسی کردند. سارجیسن و پرسی (Sargison & Percy, 2009) به بررسی اثر شیب‌های بالادست و پایین‌دست و شیب ترکیبی بالادست و پایین‌دست بر سرریز لبه پهن پرداختند و سرریز لبه پهن با شیب‌های جانبی ۱:۱ و ۲:۱ و عمودی و ترکیب شیب بالادست و پایین‌دست را مطالعه کردند و نشان دادند که با افزایش شیب بالادست به عمودی ارتفاع پروفیل سطح آب کاهش و در نتیجه فشار استاتیکی تاج کاهش می‌یابد و افزایش شیب بالادست به عمودی باعث کاهش ضریب دبی می‌شود. شکری و همکاران (Shokri et al., 2008) به بررسی تأثیر شیب‌دار کردن وجه بالادست در ضریب تخلیه و مشخصات جریان سرریزهای لبه پهن مستطیلی

به‌منظور کنترل سطح آب و اندازه‌گیری جریان در کانال‌های آبیاری به‌کار می‌روند، بررسی آنها اهمیتی خاص دارد (Ghomshei & Emamgholizadeh, 2008).

سرریزها را بر اساس ضخامت تاجشان می‌توان به سه دسته کلی سرریز لبه تیز، سرریز لبه کوتاه و سرریزهای لبه پهن تقسیم کرد. از سرریزهای لبه تیز معمولاً برای اندازه‌گیری دبی‌های کم در کانال‌های روباز استفاده می‌شود. سرریزهای لبه کوتاه نسبت به سرریزهای لبه تیز مستحکم‌تر و مقاوم‌ترند و از آنها برای اندازه‌گیری و تنظیم سطح آب در کانال‌ها و رودخانه‌ها استفاده می‌شود. در سرریزهای لبه پهن، لبه سرریز به اندازه کافی پهن است و اندازه آن در مقایسه با سایر ابعاد قابل توجه است. یکی از انواع سرریزهای لبه کوتاه، سرریز شیب‌دار است. شیب بالادست سرریز ضمن جلوگیری از منطقه سکون آب که در سرریز لبه پهن به‌وجود می‌آید می‌توانند استغراق زیادی را تحمل کند و برای دبی‌های کم و زیاد قابل استفاده است. معمولاً از سرریزهای شیب‌دار برای اندازه‌گیری دبی جریان عبوری از رودخانه‌ها استفاده می‌شود. در این نوع سرریزها نیز مانند سرریزهای لبه پهن، جریان بحرانی روی تاج اتفاق می‌افتد. از این‌رو، از مفهوم انرژی مخصوص و شرایط بحرانی برای به‌دست آوردن رابطه دبی جریان از روی تاج سرریز استفاده می‌شود (Ghomshei & Emamgholizadeh, 2008).

بازن و شوالت (Bazin & Schwalt, 1898) اولین کسانی بودند که با پرداختن به آزمایش‌هایی روی سرریز لبه پهن مستطیلی، رابطه‌هایی بین تغییرات طول سرریز نسبت به ارتفاع آن به‌دست آوردند. هرچند نتوانستند نتایج به‌دست آمده را به‌صورت تحلیلی ارائه دهند ولی محققان بعدی از نتایج

این تحقیق برای سهولت محاسبات دبی از روی سرریزهای لبه تیز، معادلات حاکم بر سرریزهای سهموی بررسی و معادله‌ای ساده و دقیق برای محاسبات شدت جریان توسعه داده شد. همچنین با استفاده از مدل فیزیکی در زاویه‌ها و ارتفاع‌های مختلف، خصوصیات هیدرولیکی این سرریزها بررسی شد. مشکاواتی و همکاران (Meshkavati *et al.*, 2017) با بررسی آزمایشگاهی ضریب دبی در سرریزهای کنگره‌ای دوزنقه‌ای نشان دادند برای یک طول مشخص از سرریز با افزایش ارتفاع سرریز، ضریب دبی روند کاهشی دارد و در یک ارتفاع ثابت با افزایش طول سرریز ضریب دبی روند کاهشی دارد. بابایی و همکاران (Babaei *et al.*, 2018) با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D هیدرولیک جریان روی سرریزهای لبه تیز افقی مثلی را بررسی کردند. از مهم‌ترین نتایج این تحقیق می‌توان به تعیین زاویه ۱۵۰ درجه رأس سرریز اشاره کرد که بیشترین ضریب دبی را دارد.

با توجه به اهمیت مبحث اندازه‌گیری جریان در مجاری روباز، هدف از مطالعه حاضر بررسی عملکرد هیدرولیکی سرریز شیب‌دار و تعیین ضریب انتقال دبی در این سازه در شرایط جریان آزاد و مستغرق و ارائه رابطه‌هایی برای پیش‌بینی ضریب انتقال دبی در سرریزهای شیب‌دار است. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها نیز با نتایج آزمایشگاهی سرریز لبه پهن مقایسه شده است.

مواد و روش‌ها

- تحلیل ابعادی

بر اساس رابطه ۱ می‌توان دبی سرریزها را تعیین کرد.

$$Q = \frac{2}{3} C_d B \sqrt{2gH^3} \quad (1)$$

پرداختند و در تحقیقات خود تأثیرشیب‌دار کردن وجه بالادست سرریزهای لبه پهن مستطیلی را بر ضریب تخلیه جریان و مشخصات جریان بررسی کردند. نتایج مطالعات این محققان نشان داد با تغییر وجه بالادست سرریز، ضریب دبی جریان و در نتیجه ظرفیت تخلیه سرریز، متناسب با کاهش شیب بالادست سرریز لبه پهن استاندارد، افزایش می‌یابد و این افزایش در سرریز با شیب ۱۵ درجه در وجه بالادست تا ۲۰ درصد نیز خواهد رسید. مددی و همکاران (Madadi *et al.*, 2012) تأثیر شیب وجه بالادست سرریز با مقطع طولی دوزنقه‌ای را بر ضریب دبی و نمودار دبی-اشل و با استفاده از مدل آزمایشگاهی تأثیر شیب وجه بالادست سرریز لبه پهن با مقطع طولی دوزنقه را بر ضریب دبی و نمودار دبی-اشل بررسی کردند. در مجموع چهار شیب برای وجه بالادست سرریز در نظر گرفته شد و نتایج را باحالتی مقایسه کردند که وجه بالادست قائم بود. نتایج نشان داد که با ملایم شدن شیب وجه بالادست از حالت قائم به حالتی که زاویه شیب آن ۲۱ درجه است، ضریب دبی به میزان ۱۰/۲۸ درصد افزایش می‌یابد. تجزیه و تحلیل نمودار دبی اشل سرریز همچنین نشان داد که با افزایش بار آبی روی سرریز، تأثیر شیب بر افزایش دبی بیشتر می‌شود.

عبداله‌پور و سلماسی (Abdollahpour & Salmasi, 2013) به تحلیل و بررسی ضریب دبی در سرریزهای لبه پهن مستطیلی پرداختند و نشان دادند ضریب دبی در سرریز لبه پهن عددی ثابت نیست و تابعی است از پارامترهایی مانند طول سرریز، ارتفاع سرریز و ارتفاع آب روی سرریز.

شریعتی و خداشناس (Shariati & Khodashenas, 2016) به بررسی آزمایشگاهی ضریب دبی سرریزهای لبه تیز سهموی پرداختند. در

مؤثر در این آزمایش‌ها در رابطه ۳ ارائه شده است. که در آن،

$$F(H, P, y_1, y_2, L_w, q, g, \mu, \rho, \sigma) = 0 \quad (3)$$

که در آن،

H = بار کل روی سرریز $(h + v^2/2g)$ ؛ P = ارتفاع سرریز (متر)؛ y_1 = عمق جریان در بالادست سرریز (متر)؛ y_2 = عمق جریان در پایین‌دست سرریز (متر)؛ L_w = طول قاعده سرریز در جهت جریان (متر)؛ q = دبی در واحد عرض جریان (مترمکعب بر ثانیه در واحد عرض)؛ μ = لزوجت دینامیکی سیال (پاسکال-ثانیه)؛ ρ = جرم مخصوص سیال (کیلوگرم بر مترمکعب)؛ و σ = کشش سطحی سیال (نیوتن بر متر) است. لازم است گفته شود از متغیرهای y_1 و y_2 فقط در تحلیل ابعادی برای جریان مستغرق استفاده شده است. با استفاده از روش π باکینگهام، پارامترهای بدون بعد برای هر دو حالت جریان آزاد و مستغرق به ترتیب در رابطه ۴ و ۵ به دست آمد.

Q = دبی جریان (مترمکعب بر ثانیه)؛ C_d = ضریب دبی (بدون بعد)؛ B = طول سرریز (متر)؛ g = شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه)؛ و H = ارتفاع آب روی سرریز (متر). همچنین می‌توان با تعریف $C = 2/3 C_d \sqrt{2}$ به عنوان ضریب انتقال جریان، رابطه ۱ را به فرم ۲ بازنویسی کرد (Mohamed, 2010):

$$Q = CB\sqrt{g}H^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

در این تحقیق، رابطه ۲ مبنای محاسبه دبی عبوری از روی سرریزها قرار گرفته است. به منظور دستیابی به هدف‌های این تحقیق ابتدا به شناخت متغیرهای متعددی پرداخته می‌شود که بر هیدرولیک جریان سرریزهای شیب‌دار مؤثر است و پس از آن با تحلیل ابعادی، رابطه کلی شامل پارامترهای بدون بعد استخراج شده است. متغیرهای

$$\frac{Q}{B\sqrt{g}H^{1.5}} = f\left(\frac{H}{L_w}, \frac{H}{P}, Re, We\right) \rightarrow C_{df} = f\left(\frac{H}{L_w}, \frac{H}{P}, Re, We\right) \quad (4)$$

$$\frac{Q}{B\sqrt{g}H^{1.5}} = f\left(\frac{H}{L_w}, \frac{H}{P}, Re, We, S_r = \left(\frac{y_1 - y_2}{H}\right)\right) \rightarrow C_{ds} = f\left(\frac{H}{L_w}, \frac{H}{P}, Re, We, S_r\right) \quad (5)$$

همچنین، با توجه به اینکه عدد رینولدز جریان در محدوده جریان آشفته است از این عدد نیز صرف‌نظر می‌شود. در نتیجه می‌توان رابطه‌های ۴ و ۵ را به صورت رابطه‌های ۶ و ۷ نوشت:

$$C_{df} = f\left(\frac{H}{L_w}, \frac{H}{P}\right) \quad (6)$$

$$C_{ds} = f\left(\frac{H}{L_w}, \frac{H}{P}, S_r\right) \quad (7)$$

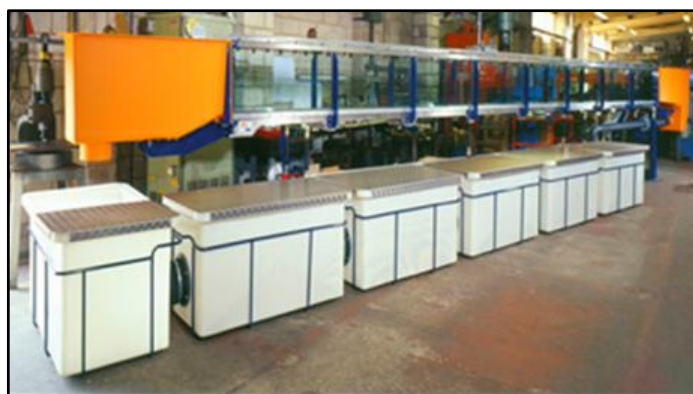
که در آنها، Re = عدد رینولدز؛ We = عدد وبر؛ S_r = نسبت استغراق؛ و C_{df} و C_{ds} = به ترتیب ضریب دبی جریان آزاد و ضریب دبی جریان مستغرق.

در آزمایش‌های این تحقیق، با توجه به اینکه حداقل عمق جریان روی سرریز بیشتر از ۶ سانتی-متر بود می‌توان از تأثیر کشش سطحی و در نتیجه عدد وبر صرف‌نظر کرد (Shafai-Bejestan, 2012).

مدل فیزیکی

یک دوربین عکاسی و نرم‌افزار دیجیتال استفاده شد. به این ترتیب که ابتدا با استفاده از دو اشل مدرج نصب شده در بالادست و پایین دست سرریز عمق آب در بالادست و پایین دست یادداشت و با استفاده از دوربین عکاسی از سرریز تصویربرداری می‌شود. با انتقال تصویرها به نرم‌افزار دیجیتال، پروفیل سطح آب با استفاده از تصویر برداشت می‌شود. شکل ۴ طرح‌های شماتیکی از مدل‌های ساخته شده را نشان می‌دهد. در جدول ۱، به مشخصات هندسی کامل مدل‌های ساخته شده اشاره شده است. آزمایش‌های این تحقیق در ۱۰ دبی و روی ۳ مدل ساخته شده دنبال شد. در مجموع ۶۰ آزمایش (۳۰ آزمایش در شرایط جریان آزاد و ۳۰ آزمایش در شرایط جریان مستغرق) روی سرریز شیب‌دار اجرا شد. به منظور مقایسه سرریز شیب‌دار با سرریز لبه پهن، یک مدل سرریز لبه پهن مستطیلی ساخته و ۱۰ آزمایش روی آن اجرا شد. ۵ مراحل تبدیل جریان آزاد به جریان مستغرق را در مدل سرریز با شیب ترکیبی بالادست و پایین دست SCW-UD-1 و جدول ۲ محدوده شرایط آزمایشگاهی را برای این تحقیق نشان می‌دهد.

آزمایش‌های این تحقیق در یک فلوم (شکل ۱) ساخت شرکت آرم فیلد انگلستان از جنس پلکسی‌گلاس با طول ۱۵ متر، عرض ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر اجرا شد. این فلوم مجهز به یک پمپ برای انتقال آب از مخزن‌ها به فلوم و یک شیر تنظیم دبی است که آب مورد نیاز آزمایش‌ها را تأمین می‌کند. شیب کف فلوم در جهت جریان صفر است و برای تأمین شرایط استغراق در پایین دست سرریز از دریچه انتهایی فلوم (شکل ۲) استفاده می‌شود. با استفاده از ورقه‌های پلکسی‌گلاس، هر یک از چهار نوع سرریز ساخته و در فاصله ۴ متری از بالادست فلوم نصب می‌شود. برای اندازه‌گیری دبی، از جریان‌سنج آلتراسونیک UF6000 محصول شرکت فراسنج استفاده شده است. این جریان‌سنج روی لوله متصل‌کننده پمپ به فلوم نصب شد. برای کالیبره کردن دستگاه فلومتر، از دستگاه مرجع شرکت فراسنج ابزار ساخت آمریکا استفاده شد (شکل ۳). برای اندازه‌گیری عمق‌های جریان در بالادست و پایین دست سرریز، از دو اشل مدرج به فاصله ۲۰۶ سانتی‌متر و برای برداشت پروفیل سطح آب نیز از



شکل ۱- فلوم استفاده شده در آزمایش‌ها ساخت شرکت آرم فیلد انگلستان

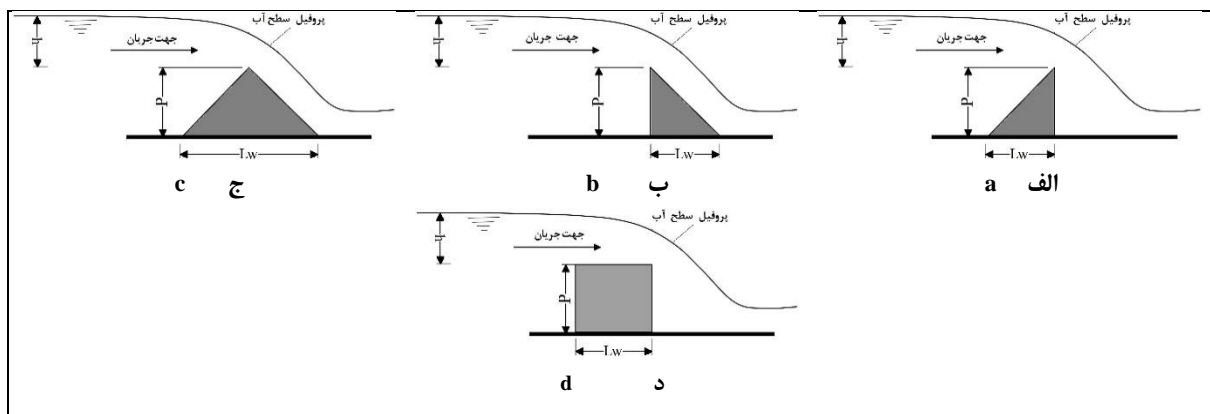
Fig. 1- The flume used in experiments made by the Armfield Company, UK



شکل ۲- دریچه انتهایی فلوم آزمایشگاهی برای تنظیم سطح آب پایین دست
Fig. 2- The tailgate of flume for adjustment water level



شکل ۳- الف) دبی سنج آلتراسونیک مدل UF6000 و ب) دبی سنج مرجع برای کالیبراسیون
Fig. 3- a) UF6000 Ultrasonic Flow Meter and b) Reference Flow Meter for Calibration



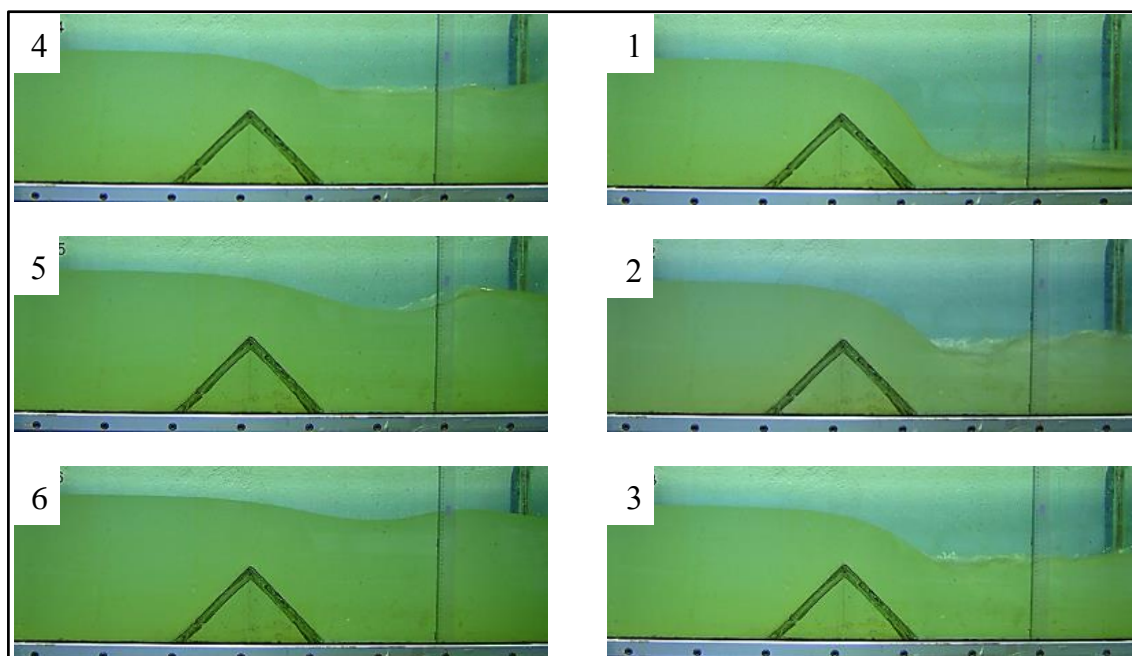
شکل ۴- طرح‌های شماتیک سرریز. الف: با شیب بالادست، ب: شیب پایین دست، ج: با ترکیب شیب‌های بالادست و پایین دست و د: لبه پهن مستطیلی

Fig. 4- Weir schematic schemes. a) Upstream slope, b) Downstream slope, c) Combined upstream and downstream slopes, d) Broad crested weir

جدول ۱- مشخصات هندسی مدل‌های ساخته شده

Table 1- Geometric properties of models made

شیب Slope	L_w (cm)	P (cm)	نام اختصاری Abreviation	نام مدل Model name
1:1, 1:1	31	15.5	SCW-UD-1	سرریز شیب ترکیبی بالادست و پایین دست
1:1	15.5	15.5	SCW-U-1	سرریز با شیب بالادست
1:1	15.5	15.5	SCW-D-1	سرریز با شیب پایین دست
-	20	16	Broad Crested Weir(BCW)	سرریز لبه پهن مستطیلی



شکل ۵- مراحل تبدیل جریان آزاد به جریان مستغرق در مدل SCW-UD-1

Fig. 5- The steps of converting free flow into submerged flow in model SCW-UD-1

جدول ۲- محدوده پارامترهای هیدرولیکی در این تحقیق

Table 2-The range of hydraulic parameters in this study

محدوده Range	مقدار Value	نشانه Sign	پارامتر Parameter
تا To	از From		
30	3	متغیر	دبی (لیتر بر ثانیه) Q
33	22	متغیر	عمق بالادست (سانتی‌متر) y_1
31	1.2	متغیر	عمق پایین دست (سانتی‌متر) y_2

برای سه دبی مختلف ۱۲، ۲۱ و ۳۰ لیتر در ثانیه در شرایط جریان آزاد نشان می‌دهد. شکل ۷ نیز تغییرات ضریب انتقال دبی (محاسبه شده از رابطه ۲) با نسبت $\frac{H}{L_w}$ برای هر چهار مدل

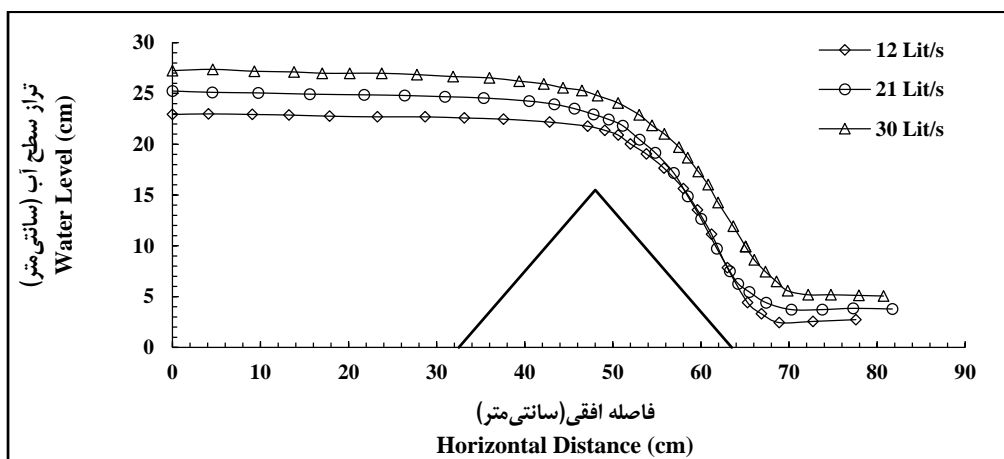
نتایج و بحث

جریان آزاد

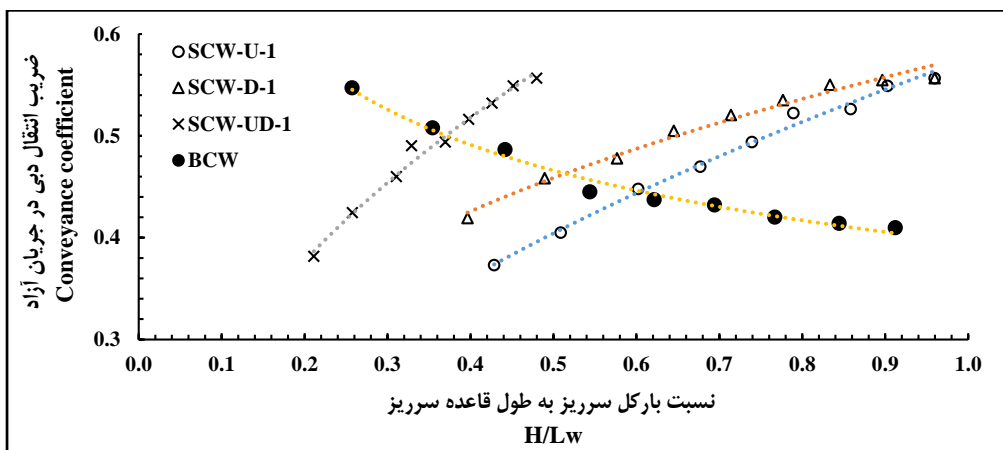
شکل ۶، تغییرات پروفیل سطح آب را در مدل سرریز با شیب ترکیبی بالادست و پایین دست

مقایسه سرریز شیب‌دار با سرریز لبه پهن نشان می‌دهد سرریز لبه پهن حساسیت کمتری به نسبت $\frac{H}{L_w}$ دارد به طوری که با افزایش نسبت $\frac{H}{L_w}$ از ۰/۲۱ به ۰/۹۱، ضریب انتقال دبی این سرریز ۰/۱۴ تغییر می‌کند. شکل ۸، تغییرات ضریب انتقال دبی (محاسبه شده از رابطه ۲) را در برابر نسبت بار کل روی سرریز به ارتفاع سرریز $\frac{H}{p}$ برای هر چهار مدل سرریز استفاده شده نشان می‌دهد. از شکل نیز مشخص است که افزایش نسبت $\frac{H}{p}$ ، ضریب انتقال دبی هر سه مدل شیب‌دار افزایش می‌یابد ولی در نسبت $\frac{H}{p}$ حدود ۰/۹۶، ضریب انتقال دبی هر سه مدل به هم نزدیک می‌شود. این موضوع مؤید آن است که با افزایش بار آبی روی سرریز، از نسبت $\frac{H}{p}$ با تراز حدود ۰/۹۶، مقدار ضریب انتقال دبی روند یکسانی خواهد داشت. همچنین با افزایش نسبت $\frac{H}{p}$ ، ضریب انتقال دبی سرریز لبه پهن برخلاف سرریزهای شیب‌دار، کاهش می‌یابد. منحنی دبی اشل هر چهار مدل سرریز استفاده شده در این تحقیق در شکل ۹ نشان داده شده است.

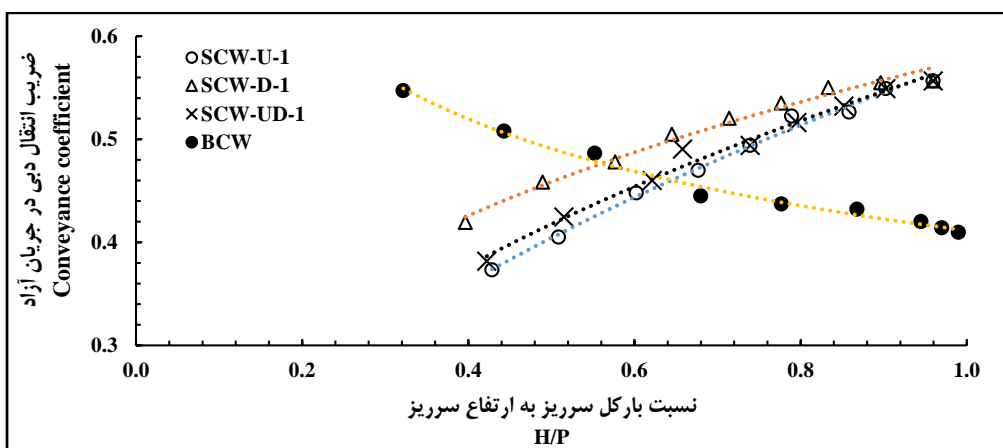
سرریز استفاده شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل مشخص است، با افزایش نسبت $\frac{H}{L_w}$ ضریب انتقال دبی هر سه سرریز شیب‌دار افزایش می‌یابد ولی ضریب انتقال دبی سرریز لبه پهن مستطیلی کاهش می‌یابد و به ازای یک نسبت ثابت $\frac{H}{L_w}$ بیشترین ضریب انتقال دبی مربوط به مدل سرریز با شیب ترکیبی بالادست و پایین‌دست (SCW-UD-1) و کمترین ضریب دبی مربوط به مدل سرریز با شیب بالادست (SCW-U-1) است. شکل ۷ نشان می‌دهد که بین سرریزهای شیب‌دار، سرریز با شیب ترکیبی بالادست و پایین‌دست بیشترین حساسیت را نسبت به تغییرات $\frac{H}{L_w}$ دارد به گونه‌ای که با افزایش این نسبت از ۰/۲۱ به ۰/۴۸ ضریب انتقال دبی از ۰/۳۸ به ۰/۵۶ می‌رسد در صورتی که در سرریز با شیب بالادست با افزایش نسبت $\frac{H}{L_w}$ از ۰/۴۳ به ۰/۹۶، ضریب انتقال دبی از ۰/۳۷ به ۰/۵۶ می‌رسد که حاکی از حساسیت کمتر این مدل در مقایسه با مدل سرریز با شیب ترکیبی بالادست و پایین‌دست با نسبت $\frac{H}{L_w}$ است. همچنین



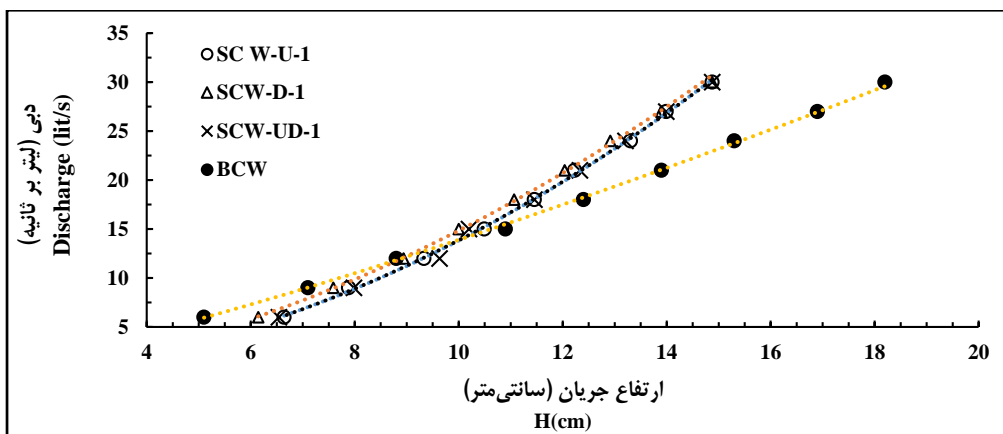
شکل ۶- پروفیل سطح آب در مدل SCW-UD-1 در شرایط جریان آزاد
 Fig. 6- Water level profiles in SCW-UD-1 model in free-flow conditions



شکل ۷- تغییرات ضریب انتقال دبی محاسبه شده در برابر نسبت H/L_w
 Fig. 7- Variations of discharge conveyance coefficient versus H/L_w



شکل ۸- تغییرات ضریب انتقال دبی محاسبه شده در برابر نسبت H/P
 Fig. 8- Variations of discharge conveyance coefficient versus H/P



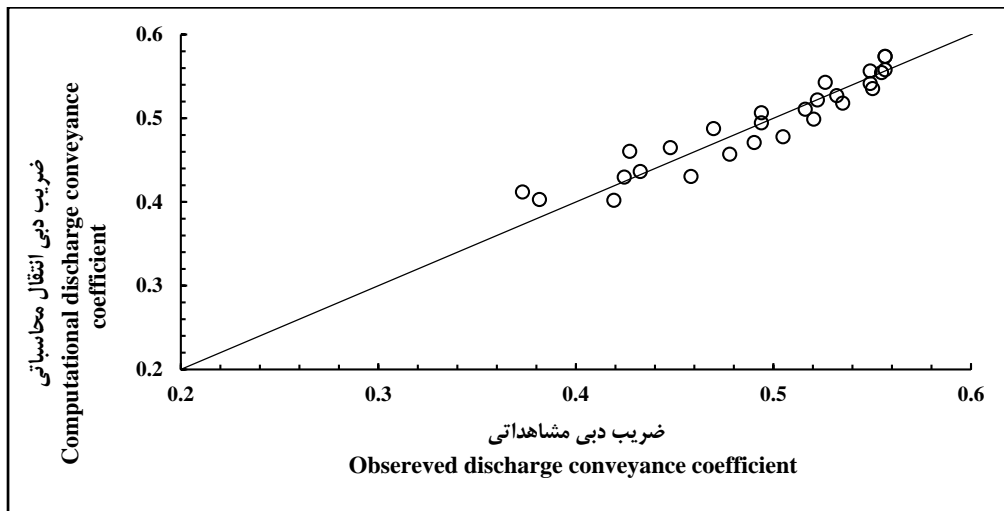
شکل ۹- منحنی دبی-اشل هر چهار مدل سرریز در شرایط جریان آزاد
 Fig. 9- The discharge-stage curve in four models weir in free-flow conditions

با توجه به تحلیل ابعادی برای شرایط جریان آزاد، به منظور بررسی اثر متقابل پارامترهای بی بعد، استخراج شده روی ضریب انتقال دبی و ارائه رابطه‌ای ریاضی برای پیش‌بینی این مقادیر، از

در شکل ۱۰، مقادیر ضریب انتقال دبی محاسبه شده از رابطه ۲ در محور افقی در برابر مقادیر ضریب انتقال دبی محاسبه شده از رابطه ۸ در محور عمودی رسم شده است. پراکندگی این نقاط نسبت به خط ۴۵ درجه نشان می‌دهد که ضریب همبستگی مقادیر آزمایشگاهی و محاسباتی در حدود ۰/۹۰ است.

رگرسیون چندگانه استفاده شد. رابطه ۸ برای محاسبه ضریب انتقال دبی در سرریزهای شیب‌دار در شرایط جریان آزاد استخراج شد.

$$C_f = 0.281 + 0.033\left(\frac{H}{L_w}\right) + 0.272\left(\frac{H}{P}\right) \quad (8)$$



شکل ۱۰- ضریب انتقال دبی محاسباتی و مشاهده‌ای در شرایط جریان آزاد

Fig. 10- Computational discharge conveyance coefficient and observations in free-flow conditions

به‌منظور بررسی اثر متقابل پارامترهای بی‌بعد استخراج شده بر ضریب انتقال دبی و ارائه رابطه‌ای ریاضی برای پیش‌بینی این مقادیر، از رگرسیون چندگانه استفاده شد. در نتیجه، رابطه ۹ برای محاسبه ضریب انتقال دبی در سرریزهای شیب‌دار در شرایط جریان مستغرق استخراج گردید.

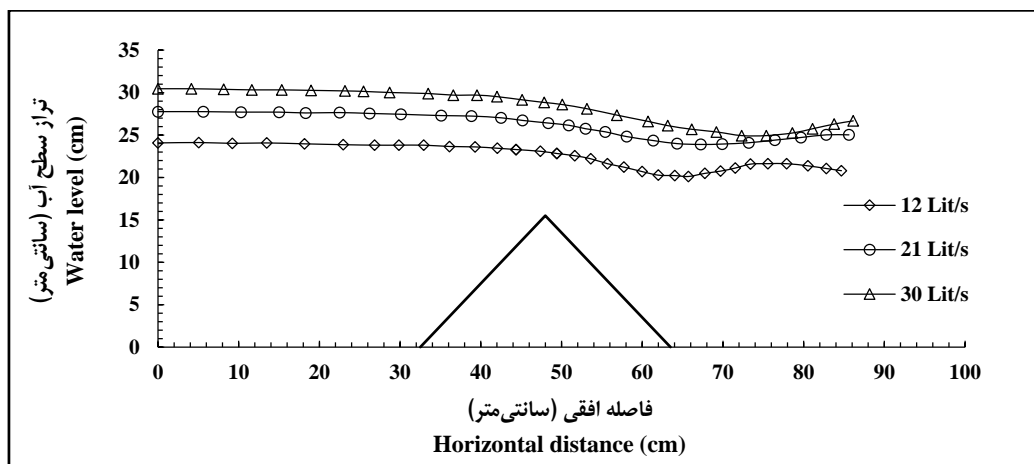
جریان مستغرق

شکل ۱۱، تغییرات پروفیل سطح آب را در مدل سرریز با شیب ترکیبی بالادست و پایین‌دست (SCW-UD-1) برای سه دبی مختلف ۱۲، ۲۱ و ۳۰ لیتر در ثانیه در شرایط جریان مستغرق نشان می‌دهد. با توجه به تحلیل ابعادی اجرا شده برای شرایط جریان مستغرق،

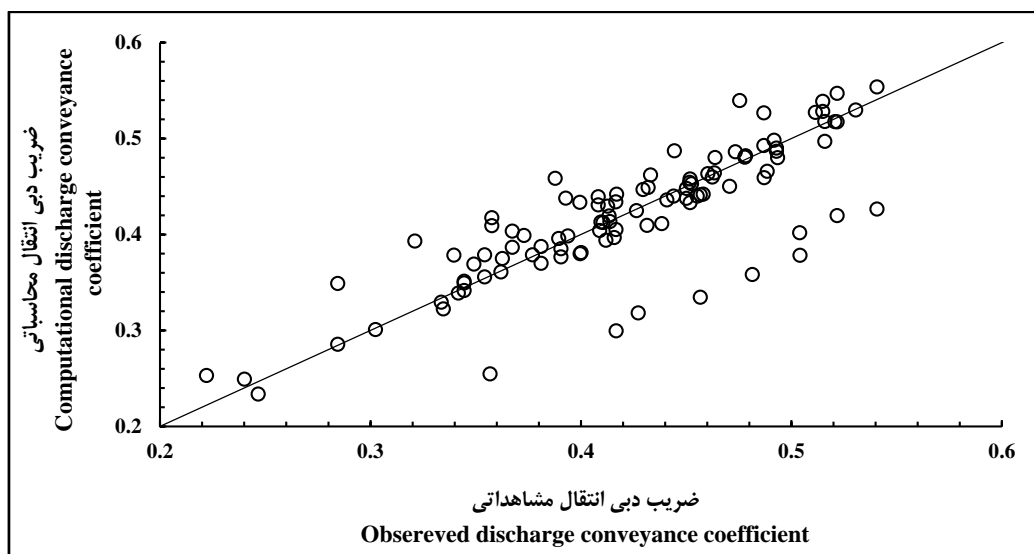
$$C_s = 0.138 + 0.034\left(\frac{H}{L_w}\right) + 0.191\left(\frac{H}{P}\right) + 0.288(S_r) \quad (9)$$

است. پراکندگی این نقاط نسبت به خط ۴۵ درجه نشان می‌دهد که ضریب همبستگی مقادیر آزمایشگاهی و محاسباتی ۰/۹۱ است.

در شکل ۱۲، مقدار ضریب انتقال دبی محاسبه شده از رابطه ۲ در محور افقی در برابر مقادیر ضریب انتقال دبی محاسبه شده از رابطه ۹ در محور عمودی رسم شده



شکل ۱۱- پروفیل سطح آب در مدل SCW-UD-1 در شرایط جریان مستغرق
 Fig. 11- Water level profiles in SCW-UD-1 model in submerged-flow conditions



شکل ۱۲- ضریب انتقال دبی محاسباتی و مشاهداتی در شرایط جریان مستغرق
 Fig. 12- Computational discharge conveyance coefficient and observations in submerged-flow conditions

در هر دو شرایط جریان آزاد و مستغرق (رابطه‌های ۸ و ۹) استفاده شده است. این پارامترها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$R^2 = \left(\frac{\sum xy}{\sqrt{\sum x^2 \sum y^2}} \right)^2 \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (X - Y)^2}{n}} \quad (11)$$

ضریب همبستگی به خوبی نشان‌دهنده میزان هماهنگی روند تغییرات مقادیر مشاهده شده نسبت به مقادیر محاسبه شده ضریب انتقال دبی است، اما گویای تطابق آنها نیست (Ghorbani-Dashtaki *et al.*, 2009). در این تحقیق، از پارامترهای آماری ضریب همبستگی (R^2)، جذر میانگین مجموع مربعات خطا ($RMSE$)، متوسط خطا (AE) و قدر مطلق انحراف (δ) به عنوان معیارهای ارزیابی رابطه‌های به دست آمده برای ضریب‌های انتقال دبی

ضریب‌های انتقال دبی به‌دست آمده (رابطه‌های ۸ و ۹) در جدول ۳ ارائه شده است. ارزیابی پارامترهای به‌دست آمده نشان می‌دهد ضریب همبستگی برای رابطه‌های ضریب انتقال دبی در هر دو جریان آزاد و مستغرق به ترتیب مقادیر بالای ۰/۹۷ و ۰/۹۶ و جذر میانگین مجموع مربعات خطا به ترتیب مقادیر ۰/۱۷ و ۰/۴۰ را دارد که حاکی از دقت خوب رابطه‌های به‌دست‌آمده برای محاسبه ضریب‌های انتقال دبی در هر دو جریان آزاد و مستغرق است.

$$AE = \frac{\sum \frac{X-Y}{X} \times 100}{n} \quad (12)$$

$$\delta = \frac{\sum |X-Y|}{\sum X} \times 100 \quad (13)$$

که در آنها،

$x = X - \bar{X}$ ، $y = Y - \bar{Y}$ = مقدار مشاهداتی؛ $Y =$ مقدار محاسباتی؛ \bar{X} = میانگین مقادیر مشاهداتی؛ \bar{Y} = میانگین مقادیر محاسباتی؛ و n = تعداد داده‌ها. پارامترهای آماری برای بررسی دقت روابط

جدول ۳- پارامترهای آماری مربوط به رابطه‌های به‌دست آمده

Table 2- Statistical parameters related to the obtained relationships

قدر مطلق انحراف δ	متوسط خطا (درصد) AE (%)	جذر میانگین مجموع مربعات خطا RMSE	ضریب همبستگی R^2	رابطه ضریب انتقال دبی/ پارامتر آماری statistical parameter/ discharge conveyance coefficient
2.952	-0.319	0.017	0.90	جریان آزاد - رابطه (۸)
1.081	0.246	0.040	0.91	جریان مستغرق - رابطه (۹)

بالادست و پایین‌دست بیشترین حساسیت را نسبت به تغییرات $\frac{H}{L_w}$ دارد. مقایسه سرریز شیب‌دار با سرریز لبه پهن نشان می‌دهد سرریز لبه پهن حساسیت کمتری به تغییرات نسبت $\frac{H}{L_w}$ دارد. نتایج بررسی‌ها همچنین نشان می‌دهد با افزایش نسبت $\frac{H}{p}$ ضریب انتقال دبی هر سه مدل سرریز شیب‌دار افزایش می‌یابد و در نسبت $\frac{H}{p}$ حدود ۰/۹۶، ضریب انتقال دبی هر سه مدل شیب‌دار به هم نزدیک می‌شود و این موضوع مؤید آن است که با افزایش بار آبی روی سرریز، از نسبت $\frac{H}{p}$ بالاتر از حدود ۰/۹۶ مقدار ضریب انتقال دبی روند یکسانی خواهد داشت. در این تحقیق دو رابطه برای محاسبه ضریب‌های انتقال دبی در شرایط جریان آزاد و مستغرق در سرریزهای شیب‌دار ارائه شده است.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی سرریزهای شیب‌دار در شرایط جریان آزاد و مستغرق پرداخته شد. سه مدل سرریز شیب‌دار و یک مدل سرریز لبه پهن مستطیلی در دامنه‌ای وسیع از دبی (۳ تا ۳۰ لیتر در ثانیه)، عمق بالادست و عمق پایین‌دست بررسی شد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد با افزایش نسبت $\frac{H}{L_w}$ ضریب انتقال دبی هر سه سرریز شیب‌دار افزایش ولی ضریب انتقال دبی سرریز لبه پهن مستطیلی کاهش می‌یابد و به‌ازای یک نسبت ثابت $\frac{H}{L_w}$ بیشترین ضریب انتقال دبی مربوط به مدل سرریز با شیب ترکیب بالادست و پایین‌دست (SCW-UD-1) و کمترین ضریب دبی مربوط به مدل سرریز با شیب بالادست (SCW-U-1) است. در بین سرریزهای شیب‌دار، سرریز با شیب ترکیبی

مراجع

- Abdollahpour, M., & Salmasi, F. (2013). *Analysis and investigation of the discharge coefficient in rectangular board-crested weirs. 7th National Congress on Civil Engineering (7,8 May)*. Zahedan, Iran. (in Persian)
- Abou-Seida, M. M., & Quraishi, A. A. (1976). *A flow equation for submerged rectangular weirs. Proceeding of ICE*, 61(4), 685-696.
- Babaei, E., Karami, H., & Farzin, S. (2019). Numerical investigation of flow characteristics horizontal sharp edge triangular weir with vertex at downstream. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 9(3), 49-65. (in Persian)
- Bazin, H., & Schwalt, K. (1898). Experiences nouvelles sur l'écoulement en deversoir. *Annual Ponts Chaussees*, 68(2), 151-265.
- Ghomshei, M., & Emamgholizadeh, S. (2008). *An Introductory Book to Fluid Mechanics & Hydraulic*. Shahid Chamran Uni of Ahvaz Publications. (in Persian)
- Ghorbani-Dashtaki, S., Homae, M., Mahdian, M. H., & Kouchakzadeh, M. (2009). Site-dependence performance of infiltration models. *Water Resources Management*, 23, 2777-2790. DOI 10.1007/s11269-009-9408-3.
- Hager, W. H., & Schwalt, M. (1994). Broad-crested weir. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 120(1), 13-26.
- Madadi, M., & Hoseinzadeh-Dalir, A., & Farsadizadeh, D. (2012). *Influence of longitudinal trapezoidal weirs upstream slope on discharge coefficient and stage- discharge curve. 14th Iranian Hydraulics Conference (6 Nov.)*. Orumieh, Iran. (in Persian)
- Meshkavati, J., Emadi, A., & Masoudian, M. (2017). Experimentally investigation of discharge coefficient at trapezoidal labyrinth weirs. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 11(5), 852-864. (in Persian)
- Mohamed, H. I. (2010). Flow over Gabion Weirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 136, 573-577.
- Sargison, J. E., & Percy, A. (2009). Hydraulics of board-crested weirs with varying side slopes. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 135(1), 115-118.
- Shafai-Bejestan, M. (2012). *Fundamentals and Applications of Hydraulic and Physical Models*. Shahid Chamran University Press(in Persian)
- Shariati, H., & Khodashenas, S. R. (2016). Experimental study of discharge coefficient of parabolic sharp-crested weirs. *Water and Soil Science Journal*. 26(3), 57-67. (in Persian)
- Shokri, N., Farhoudi J., & Goodarzi, E. (2008). The effect of downward and upward slope of the rectangular edge of the broad edge on the flow conditions. *Journal of Faculty of Engineering, University of Tabriz*, 37(3), 9-19. (in Persian)
- Smith, R. A. (1959). Calibration of a submerged board-crested weir. *Journal of Hydraulic Division*, 85(3), 1-16.
- Tracy, H. J. (1957). *Discharge Characteristic of Board Crest Weirs*. Circular 397. Geological Survey. U.S Department of Interior. Washington.
- Woodburn, J. G. (1932). Tests of Board-Crested Weirs. *Transaction of the ASCE*, 1797, 387-416.

Laboratory Study of Free and Submerged Flow in Inclines Weirs

M. Kheiraei, H. A. Yonesi*, M. Fathi-Moghadam, B. Shahinejad and H. Torabi-Podeh

* Corresponding Author: Assistant Professor, Department of water Engineering, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran. Email: yonesi.h@lu.ac.ir

Received: 28 July 2019, Accepted: 22 October 2019

Extended Abstract

Introduction

Any structure that is in the flow path and establishes a simple, specific and definite flow relationship and depth around it is called a flow controller. Weirs are structures that raise the water level behind them and create control sections and are simple means of measuring discharge. Bazin & Schwalt (1898) were the first to conduct experiments on rectangular broad crested weirs. Since then, many researchers have done a great deal of research on a variety of weirs. Among them we can mention: Woodburn (1932), Tracy(1957), Smith(1959), Abou-seida & Quraishi (1976), Hager&Schwalt (1994), Sargison & Percy (2009),....

Due to the importance of flow measurement in open channels, the purpose of this study was to investigate the hydraulic performance of inclined weir, to determine the discharge conveyance coefficient in this kind of structures in free and submerged flow condition, and to provide relationships to predict the discharge conveyance coefficient.

Methodology

Based on Equation 1, we can determine the weir discharge.

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

In this equation Q is the discharge (m³ / s), C_d is the discharge coefficient (no dimension), B is the weir length (m), g is the acceleration (m / s²), and H is the height of the water over the weir (m).Also rewrite from the equation 1 to form 2 by defining it $C = 2/3 C_d \sqrt{2}$ as the discharge conveyance coefficient (Mohamed, 2010):

$$Q = CB \sqrt{g} H^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

In this study, the equation 2 is based on the calculation of the discharge throughput on weirs.

The following two equations for free and submerged flow are presented using dimensional analysis.

$$C_{df} = f\left(\frac{H}{L_w}, \frac{H}{P}\right) \quad (3)$$

$$C_{ds} = f\left(\frac{H}{L_w}, \frac{H}{P}, S_r\right) \quad (4)$$

The experiments were conducted in a plexiglass flume (Fig. 1) made of the British ArmField Company with a length of 15 m, a width of 30 cm and a height of 50 cm. A total of 60 experiments (30 free-flow and 30 submerged-flow experiments) were performed on the inclined weir.

Results and Discussion

A) Free flow condition

In this series of experiments, with increasing H/L_w ratio, the discharge conveyance coefficient of all three sloping weirs increased, but the coefficient of conveyance discharge of rectangular broad crested weir decreased (Fig. 1).

This figure shows that among inclined weirs are most sensitive to H/L_w changes. Also comparison of the inclined weir with the rectangular broad crested weir indicates that the rectangular broad crested weir later is less sensitive to H/L_w . Equation 5 was derived to calculate the discharge conveyance coefficient (C_f) in inclined weirs under free-flow conditions.

$$C_f = 0.281 + 0.033\left(\frac{H}{L_w}\right) + 0.272\left(\frac{H}{P}\right) \quad (5)$$

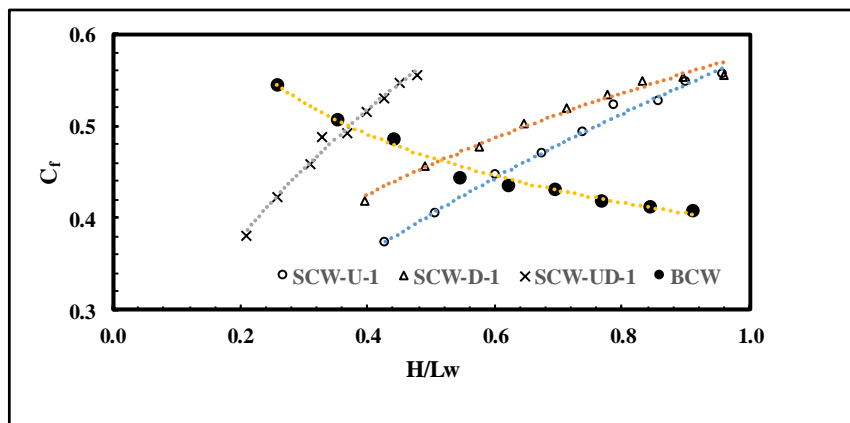


Fig. 1- Variations of discharge conveyance coefficient versus H/L_w

B) Submerged flow condition

Multiple regression was used to investigate the interaction of the extracted dimensionless parameters on the discharge conveyance coefficient and to provide a mathematical relation to

predict these values. Equation 6 was derived to calculate the C_s coefficient in inclined weirs under submerged flow conditions.

$$C_s = 0.138 + 0.034\left(\frac{H}{L_w}\right) + 0.191\left(\frac{H}{P}\right) + 0.288(S_r) \quad (6)$$

Figure 2 shows the computational and observational C_f , C_s in free and submerged flow conditions. The scattering of these points relative to the 45 ° line shows that the correlation coefficient of the experimental and computational values for free and submerged flow are equal to 0.9 and 0.91 respectively.

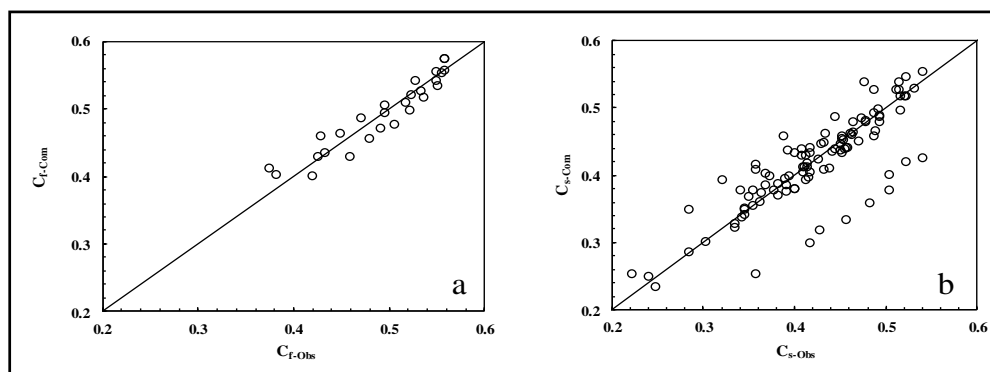


Fig. 2- Computational discharge conveyance coefficient observations in a: free -flow conditions b: submerged flow conditions

Conclusions

The results show that:

- Increasing in H/L_w ratio leads increases in discharge conveyance coefficient of all three sloping weirs and decreases in rectangular broad crested weir.
- For a constant value of the H/L_w ratio, the highest discharge coefficient is related to the upstream and downstream slope weir model (SCW-UD-1) and the lowest discharge coefficient is to the upstream slope weir model (SCW-U-1).
- The upstream and downstream slope weir are most sensitive to H/L_w changes and rectangular broad crested weir is less sensitive to changes in H/L_w ratio.
- As the H/P ratio increases, the discharge conveyance coefficient of all three sloping weir models increases.

Keywords: Discharge Conveyance Coefficient, Height to Width Weir Ratio, Water Surface Profile