



مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیستم، شماره اول، ۱۳۹۲

http://jwsc.gau.ac.ir

بررسی آزمایشگاهی ضریب دبی سرریزهای جانبی لبه‌تیز مرکب

سمیرا باقری^۱، *عبدالرضا ظهیری^۲، رسول قبادیان^۳، امیراحمد دهقانی^۴ و مهدی مفتاح‌هلقی^۴

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان،

^۲آستادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ^۳آستادیار گروه مهندسی آب،

دانشگاه رازی کرمانشاه، ^۴دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

تاریخ دریافت: ۹۱/۲/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۹۱/۷/۲۵

چکیده

سرریز جانبی یکی از معمول‌ترین سازه‌های کنترل و انحراف جریان در آزمایشگاه‌های هیدرولیک، شبکه‌های آبیاری و زه‌کشی، کانال‌های انتقال آب و فاضلاب است. سرریزها عموماً لبه‌تیز بوده و از نظر دقت اندازه‌گیری دبی و نیز تخلیه جریان، دارای محدودیت می‌باشند، به همین دلیل در این پژوهش برای اولین بار سرریزهای جانبی لبه‌تیز با مقطع مرکب (ترکیبی) پیشنهاد شده است. اندازه‌گیری دقیق‌تر جریان در محدوده وسیعی از دبی‌ها نسبت به سرریزهای جانبی ساده از جمله موارد برتری این گونه سرریزها می‌باشد. در این پژوهش برای برآورد ضریب دبی، آزمایش‌هایی بر روی یک سرریز جانبی مرکب مستطیلی-مستطیلی و با عرض و ارتفاع متغیر انجام شده است. تحلیل ابعادی پارامترهای مؤثر بر دبی جریان عبوری از سرریز مرکب نشان داد که ضریب دبی این سرریز تابعی از عدد فرود در بالادست جریان، نسبت میانگین وزنی ارتفاع تاج سرریز به عمق جریان در بالادست سرریز و عرض کانال به عمق جریان در بالادست سرریز است. ابتدا براساس نتایج آزمایشگاهی و نیز اصول بهینه‌سازی، رابطه‌ای بدون بعد برای محاسبه ضریب دبی سرریز استخراج شده و سپس رابطه جدیدی برای محاسبه دبی جریان عبوری از سرریزهای جانبی مرکب مستطیلی پیشنهاد شده است. با مقایسه آماری نتایج این رابطه با داده‌های آزمایشگاهی، ضریب تبیین معادله در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب ۰/۹۶ و ۰/۹۸ به دست آمد. همچنین متوسط خطای نسبی این رابطه حدود ۶/۴ درصد به دست آمده است.

واژه‌های کلیدی: اندازه‌گیری دبی، سرریز جانبی، سرریزهای مرکب، ضریب آب‌گذری

*مسئول مکاتبه: zahiri@yahoo.com

مقدمه

سرریز جانبی یکی از معمول‌ترین سازه‌های هیدرولیکی است که با هدف‌های متفاوتی در سیستم‌های انتقال آب به‌کار گرفته می‌شود. این نوع سرریزها به‌طور وسیعی برای انحراف جریان و کنترل سطح آب در شبکه‌های آبیاری و زه‌کشی، انحراف سیل در پروژه‌های مهندسی رودخانه و سیستم‌های زه‌کشی شهری مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین به‌عنوان سازه حفاظتی در بالادست سیفون‌های معکوس، زیرگذر جاده، نقاط خطرناک و سیل‌خیز رودخانه‌ها و نیز به‌عنوان سرریز انتهایی در انتهای کانال اصلی برای تخلیه آب مازاد ناشی از بهره‌برداری نادرست آب‌گیرهای بالادست به‌کار می‌روند. با توجه به کاربرد وسیع سرریزهای جانبی، این نوع سرریز باید دارای خصوصیتی باشد تا بتوان از آن به‌طور مناسبی در شبکه‌های انتقال آب و فاضلاب و نیز سیستم‌های انحراف در رودخانه‌ها استفاده نمود. از جمله این خصوصیات می‌توان به اندازه‌گیری دقیق دبی جریان عبوری برای آب‌گیری مناسب از کانال و توانایی آن در خروج میزان قابل‌توجهی از جریان در مکان‌هایی که به‌عنوان سازه حفاظتی به‌کار می‌رود، اشاره کرد. متأسفانه سرریزهای جانبی معمولی (ساده) این دو قابلیت را به‌صورت هم‌زمان دارا نمی‌باشند به‌طوری‌که اگر عرض سرریز کوچک باشد، فقط برای اندازه‌گیری جریان مناسب است و اگر عرض سرریز، بزرگ در نظر گرفته شود، فقط برای تخلیه سریع سیلاب مناسب بوده و دقت اندازه‌گیری دبی کاهش می‌یابد. به همین دلیل برای اولین بار در این پژوهش، سرریز جانبی لبه‌تیز مرکب پیشنهاد شده است. براساس بررسی‌های صورت‌گرفته، در زمینه این‌گونه سرریزها تاکنون مطالعه‌ای صورت نگرفته و فقط مطالعات آزمایشگاهی اندکی در خصوص سرریزهای لبه‌تیز مرکب نرمال (که در عرض کانال و عمود بر جهت جریان احداث می‌شوند) انجام شده است. از طرف دیگر سرریزهای جانبی ساده به‌صورت گسترده توسط محققان مختلف مورد مطالعه قرار گرفته‌اند که بیش‌تر برای برآورد ضریب تخلیه سرریز جانبی بوده است.

دیمارچی (۱۹۳۴) با صرف‌نظر نمودن از افت انرژی در طول سرریز، حل تحلیلی معادلات حاکم بر جریان در محدوده سرریزهای جانبی را به‌دست آورد. سابرامانیا و آواستی (۱۹۷۲) با حل معادله دیفرانسیل عمومی جریان متغیر مکانی با کاهش دبی در یک کانال مستطیلی افقی با سرریز جانبی و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی در شرایط جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی، رابطه‌هایی را برای محاسبه ضریب تخلیه سرریزهای جانبی لبه‌تیز ارائه نمودند. رانگاراچو و همکاران (۱۹۷۹) با انجام آزمایش‌هایی، درستی معادله دیمارچی در برآورد میزان تخلیه از سرریزهای لبه‌تیز و لبه‌پهن را تأیید نمود و رابطه‌هایی برای محاسبه ضریب تخلیه این سرریزها ارائه نمودند. در مطالعات سوامی و همکاران (۱۹۹۴)، مفهوم جدیدی به‌نام ضریب شدت جریان موضعی مورد توجه قرار گرفت و برای

محاسبه این ضریب در سرریزهای لبه تیز بدون دیواره در دو طرف کانال جانبی رابطه‌ای ارائه شد. سینگ و همکاران (۱۹۹۴) نشان دادند که ضریب شدت جریان علاوه بر عدد فرود بالادست به نسبت ارتفاع سرریز به عمق جریان بالادست سرریز نیز بستگی دارد. ایشان با استفاده از رگرسیون چندمتغیره، رابطه‌ای برای محاسبه ضریب تخلیه سرریزهای جانبی به دست آوردند. ایزدجو و شفاعةی بجمستان (۱۹۹۶) با ارائه مدل ریاضی محاسبه پروفیل سطح آب در طول سرریز جانبی، رابطه‌ای را برای محاسبه ضریب تخلیه جریان در سرریزهای مستطیلی لبه تیز پیشنهاد نمودند. قدسیان (۱۹۹۷) مفهوم جدید ضریب دبی تحت عنوان ضریب دبی المانی را به صورت تابعی از نسبت عمق جریان به ارتفاع سرریز ارائه نموده و روشی را برای محاسبه دبی سرریزهای جانبی معرفی کرد. برقی و صالحی (۲۰۰۳) با در نظر گرفتن عمق روی سرریز به عنوان عمق بحرانی، دبی عبوری از سرریز جانبی را محاسبه نموده و رابطه‌ای را برای محاسبه ضریب تخلیه ارائه دادند. خورچانی و بلانپاین (۲۰۰۵) با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، ضریب تخلیه سرریزهای جانبی را با دقت بالایی برآورد نموده و رابطه ساده‌ای نیز ارائه نمودند. رامامورتی و همکاران (۲۰۰۶) براساس پارامترهای بی بعد جریان و هندسه سرریز، ضریب دبی اصلاح شده‌ای را برای سرریزهای جانبی مستطیلی و دایره‌ای ارائه نمودند. در این پژوهش از روش حداقل مربعات جزئی^۱ چندمتغیره غیرخطی استفاده شد. قبادیان و شفاعةی بجمستان (۲۰۰۶) و نیز هنر و طرزکار (۲۰۰۷) با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، ضریب تخلیه سرریزهای جانبی را بهینه‌سازی نمودند. امیرقلو و همکاران (۲۰۱۰) سرریز زیگزاگی^۲ را به عنوان یک سرریز جانبی بررسی نمودند. آن‌ها تأثیر شرایط هیدرولیک جریان و هندسه این نوع سرریز و پارامترهای بی بعد مختلف را بر ضریب دبی، پروفیل سطح آب و سرعت در طول کانال اصلی مورد بررسی قرار دادند. قبادیان (۲۰۱۱) با استفاده از نتایج مدل آزمایشگاهی، مدل ریاضی پروفیل سطح آب در محدوده سرریز جانبی را واسنجی نمود. مقیسه و اسماعیلی (۲۰۱۱) با بررسی آزمایشگاهی سرریزهای جانبی با تراز تاج متغیر، ضریب دبی این گونه سرریزها را مورد مطالعه قرار داده و افزایش راندمان آن‌ها را نسبت به سرریزهای با تراز تاج ثابت نشان دادند. کشاورز و همکاران (۲۰۱۱) و اکبری و قدسیان (۲۰۱۱) به ترتیب ضریب آب‌گذری سرریزهای جانبی لبه تیز دوزنقه‌ای و مثلثی را مورد بررسی قرار دادند. در جدول ۱، مهم‌ترین روابط ضریب تخلیه دبی در سرریزهای جانبی لبه تیز ساده ارائه شده توسط محققان مختلف خلاصه شده است (قبادیان و شفاعةی بجمستان، ۲۰۰۶).

1- Partial Least Square (PLS)

2- Labyrinth Weir

جدول ۱- رابطه‌های پیشنهاد شده برای محاسبه ضریب تخلیه سرریز جانبی مستطیلی (قبادیان و شفاعی بجستان، ۲۰۰۶).

ردیف	نام محقق (سال تحقیق)	رابطه پیشنهادی	ملاحظات
۱	سابرامانیا و آواستی (۱۹۷۲)	$c_m = 0.611 \sqrt{1 - \frac{3FR_1^2}{2 + FR_1^2}}$	جریان زیربحرانی $0 \leq w \leq 0.6$
۲	یونگ (۱۹۷۲)	$c_m = 0.622 - 0.222FR_1^2$	$0 \leq w \leq 0.6$
۳	نادسامورتی و تامسون (۱۹۷۲)	$c_m = 0.432 \sqrt{\frac{2 - FR_1^2}{1 + 2FR_1^2}}$	$0 \leq w \leq 0.6$
۴	رانگاراچو و همکاران (۱۹۷۹)	$c_m = 0.81 - 0.6FR_1$	$0.2 \leq w \leq 0.5$
۵	هاگر (۱۹۸۷)	$c_m = 0.485 \sqrt{\frac{2 + FR_1^2}{2 + 3FR_1^2}}$	$w = 0$
۶	چیونگ (۱۹۹۱)	$c_m = 0.45 - 0.22FR_1^2$	$w = 0$
۷	سینگ و همکاران (۱۹۹۴)	$c_m = 0.33 - 0.18FR_1 + 0.49(w/y_1)$	
۸	سوامی و همکاران (۱۹۹۴)	$c_m = 0.485 \left(\left(\frac{44/7w}{49w + y_1} \right)^{7/6w} + \left(\frac{y_1 - w}{y_1} \right)^{7/6w} \right)^{-1/5}$	$0 \leq w \leq 0.6$
۹	ایزدجو و شفاعی بجستان (۱۹۹۶)	$c_m = -0.076FR_1^2 - 0.036 \frac{w}{y_1} - 0.019 \frac{L}{y_1} + 0.2$	
۱۰	جلیلی و برقی (۱۹۹۶)	$c_m = 0.71 - 0.4FR_1 - 0.22(w/y_1)$	
۱۱	پینهریو و سیلوا (۱۹۹۷)	$c_m = 0.33 - 0.147(y_1/w)$	جریان زیربحرانی
۱۲	قدسیان (۱۹۹۷)	$c_m = (1 - 0.63FR_1^{0.33}) \left[0.611 + 0.075 \frac{y_1 - w}{w} \right]$	$\frac{y_1 - w}{w} \leq 5$
۱۳	برقی و همکاران (۱۹۹۹)	$c_m = 0.55 - 0.47FR_1$	جریان زیربحرانی
۱۴	برقی و صالحی (۲۰۰۳)	$c_m = 0.82 - 0.38FR_1 - 0.22(w/y_1) + 0.08(L/B)$	

در این جدول، c_m : ضریب دبی دیمارچی، FR_1 و y_1 به ترتیب عدد فرود و عمق جریان در بالادست سرریز جانبی، L : طول سرریز جانبی، w : ارتفاع سرریز جانبی و B : عرض کانال اصلی است.

مطالعات اندکی در زمینه سرریزهای لبه‌تیز مرکب نرمال یا قائم انجام شده است. اولین بار سازمان احیای اراضی امریکا^۱ (۱۹۶۳) از یک سرریز لبه‌تیز مثلثی- مستطیلی برای اندازه‌گیری دبی جریان استفاده نمود. یاسی و عباسپور (۲۰۰۵) با بررسی جریان در سرریز لبه‌تیز مرکب مثلثی- مستطیلی با زاویه راس ۹۰ درجه به این نتیجه رسیدند که با افزایش ارتفاع سطح آب روی سرریز و در مرز تماس سرریزهای مثلثی و مستطیلی، ضریب دبی به‌صورت متناوب افزایش و کاهش می‌یابد. مارتینز و همکاران (۲۰۰۵) با بررسی آزمایشگاهی سرریز لبه‌تیز مرکب مثلثی- مثلثی، این نوع سرریز را برای استفاده در سدهای رسوب‌گیر در حوضه‌های کوهستانی پیشنهاد نمودند. انتخاب این نوع سرریز به‌دلیل پیوستگی رابطه دبی- اشل در تمامی عمق‌های جریان روی سرریز و نیز دقت مناسب اندازه‌گیری دبی در محدوده وسیعی از شرایط جریان (کم‌آبی تا سیلاب) است. پیراتیپان و همکاران (۲۰۰۶) نیز با بررسی آزمایشگاهی همین نوع سرریز مرکب با زوایای راس مختلف، رابطه دقیقی برای محاسبه دبی جریان سرریز مرکب مثلثی- مثلثی ارائه نمودند. جان و همکاران (۲۰۰۶) با انجام یک سری آزمایش، دبی جریان برای ۴ نوع سرریز لبه‌تیز مرکب را اندازه‌گیری نموده و روابط ساده‌ای را ارائه نمودند. ظهیری (۲۰۱۲) به‌عنوان ایده‌ای جدید با حل عددی مدل ریاضی شبه‌دوابعدی شیونو و نایت، دبی عبوری از سرریزهای لبه‌تیز مرکب را محاسبه نمود.

با بررسی پژوهش‌های گذشته مشخص شد که با وجود مطالعات فراوان در زمینه سرریزهای جانبی لبه‌تیز ساده، سرریزهای جانبی لبه‌تیز مرکب که توانایی اندازه‌گیری دقیق دبی عبوری و خروج میزان قابل‌توجهی از جریان در زمان رخداد سیلاب را دارد، تاکنون مورد توجه قرار نگرفته‌اند. در این مقاله، ضریب تخلیه دبی در سرریزهای جانبی لبه‌تیز مرکب مستطیلی- مستطیلی با استفاده از مدل فیزیکی و انجام آزمایش‌های لازم مورد بررسی قرار گرفته و براساس تحلیل ابعادی، رابطه بهینه‌ای ارائه شده است.

مواد و روش‌ها

تحلیل ابعادی: دیمارچی (۱۹۶۸) رابطه زیر را برای تخمین دبی عبوری از سرریز جانبی لبه‌تیز مستطیلی ارائه نمود:

$$Q = C\sqrt{2g}L(y_1 - w)^{3/2} \quad (1)$$

1- United States Bureau of Reclamation (USBR)

که در آن، Q : دبی عبوری از سرریز جانبی، C : ضریب دبی سرریز جانبی (معادل $\frac{2}{3}$ سانتی‌متر)، g : شتاب ثقل، L : طول سرریز، y_1 : عمق آب در بالادست سرریز جانبی و w : ارتفاع تاج سرریز جانبی است. در این رابطه، ضریب دبی به پارامترهای زیادی وابسته است که توسط محققان مختلف مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. به‌طورکلی، متغیرهای مهم و مؤثر بر ضریب شدت جریان در سرریزهای جانبی لبه‌تیز شامل جرم حجمی سیال (ρ)، لزجت دینامیکی سیال (μ)، ضریب کشش سطحی آب (σ)، شتاب ثقل، دبی جریان در کانال اصلی بالادست سرریز (Q_1)، عمق جریان در بالادست سرریز (y_1)، سرعت جریان در بالادست سرریز (V_1)، عرض کانال اصلی (B)، طول سرریز (L) و ارتفاع سرریز (w) می‌باشند.

با توجه به شکل خاص سرریزهای مرکب (شکل ۱)، ارتفاع تاج در طول سرریز متفاوت است به همین دلیل در این پژوهش از ارتفاع وزنی تاج سرریز (\bar{w}) که به‌صورت زیر تعریف می‌شود، استفاده شده است:

$$\bar{w} = \frac{2w_1b_1 + w_2b_2}{2b_1 + b_2} \quad (2)$$

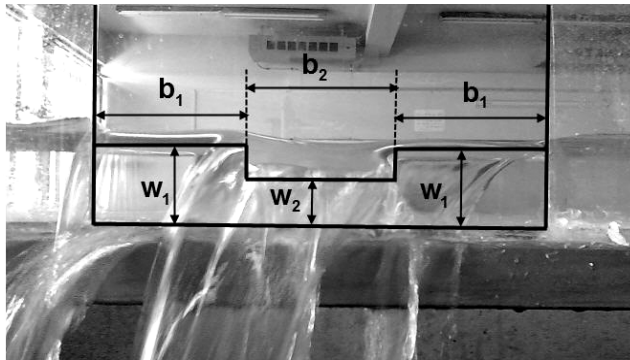
که در آن، b_1 و b_2 : به‌ترتیب طول تاج سرریزهای بالایی و پایینی و w_1 و w_2 : به‌ترتیب ارتفاع تاج سرریزهای بالایی و پایینی می‌باشد. بنابراین دبی جریان عبوری از سرریزهای لبه‌تیز جانبی مرکب به‌صورت زیر قابل محاسبه است:

$$Q = C\sqrt{2g}L(y_1 - \bar{w})^{3/2} \quad (3)$$

همچنین ضریب دبی در این‌گونه سرریزها با تابع زیر قابل بیان است:

$$C = f_1(\rho, \mu, g, Q_1, y_1, V_1, \bar{w}, B, \sigma) \quad (4)$$

لازم به ذکر است که طول سرریز جانبی در پارامتر \bar{w} در نظر گرفته شده و نیازی به دخالت آن در رابطه ۴ نیست.



شکل ۱- سرریز جانبی لبه تیز مرکب با مقطع مستطیلی - مستطیلی.

دبی جریان در بالادست سرریز تابعی از y_1 و B می باشد، بنابراین می توان متغیر Q_1 را از رابطه ۴ حذف نمود:

$$C = f_7(\rho, \mu, g, y_1, V_1, \bar{w}, B, \sigma) \quad (5)$$

با استفاده از تئوری باکینگهام، ضریب دبی سرریز تابعی از پارامترهای بی بعد زیر خواهد شد:

$$C = f_7(\text{Re}, Fr_1, y_1 / \bar{w}, y_1 / B, We) \quad (6)$$

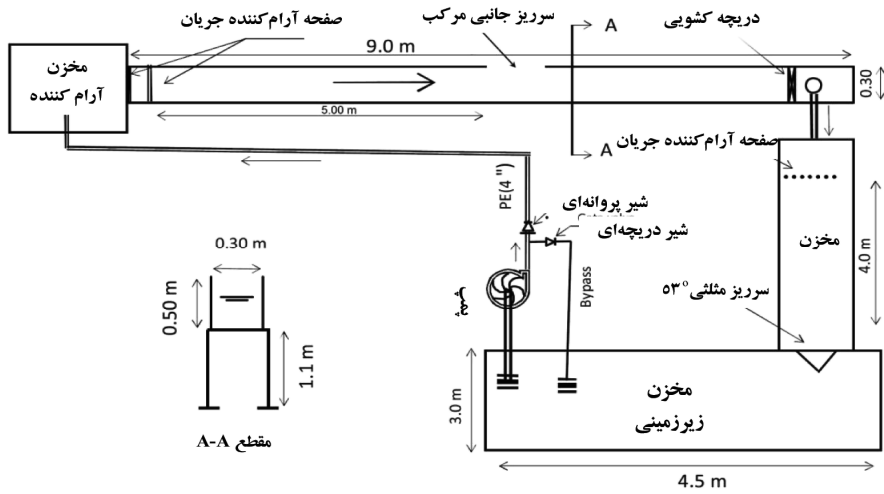
که در آن، $\text{Re} = \frac{\rho V_1 y_1}{\mu}$: عدد رینولدز، $Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g y_1}}$ عدد فرود در بالادست جریان و $We = \frac{\rho y_1 V_1^2}{\sigma}$ عدد وبر می باشد. با اطمینان از آشفته بودن جریان در طول سرریز جانبی می توان از اثر عدد رینولدز صرف نظر نمود. همچنین با توجه به این که همواره در طول آزمایش، حداقل ارتفاع آب روی سرریز از ۵ میلی متر بزرگتر است، اثر عدد وبر ناچیز است (قدسیان، ۱۹۹۸). بنابراین:

$$C = f_8(Fr_1, y_1 / \bar{w}, y_1 / B) \quad (7)$$

همان گونه که از رابطه ۷ مشخص است، ضریب تخلیه سرریز جانبی لبه تیز مرکب تابعی از عدد فرود جریان در بالادست سرریز (Fr_1)، نسبت عمق جریان در بالادست سرریز به ارتفاع وزنی تاج سرریز (y_1 / \bar{w}) و نسبت عمق جریان در بالادست سرریز به عرض کانال اصلی (y_1 / B) است. با انجام یک سری آزمایش در مدل فیزیکی سرریز جانبی لبه تیز مرکب، شکل رابطه ۷ قابل استخراج است.

مطالعات آزمایشگاهی: آزمایش‌های این پژوهش در یک فلوم آزمایشگاهی با شیب ناچیز (افقی) به طول ۹ متر، عرض ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر انجام شده است. جنس بدنه و کف فلوم از شیشه است که بر روی یک قاب فلزی که ارتفاع کف بستر آن از کف آزمایشگاه ۱۱۰ سانتی‌متر است قرار گرفته است. به‌منظور اندازه‌گیری دبی خروجی از سرریز جانبی از یک سرریز مثلثی ۵۳ درجه کالیبره شده و ساخته شده در بدنه یک مخزن فلزی استفاده شد. برای اندازه‌گیری تراز سطح آب در داخل فلوم به‌خصوص در محدوده سرریز جانبی از عمق‌سنج نقطه‌ای با دقت ± 0.1 میلی‌متر استفاده گردید. به‌منظور کنترل سطح آب پایین‌دست سرریز جانبی، از یک دریچه کشویی از جنس پلکسی‌گلاس با ضخامت ۶ میلی‌متر که درون یک قاب آلومینیومی تعبیه شده و در انتهای فلوم نصب گردیده بود، استفاده شد. این دریچه توسط یک فرمان قابل تنظیم می‌باشد. در بعضی از آزمایش‌ها که ارتفاع تاج سرریز زیاد است، برای تامین تراز آب مورد نیاز و افزایش سطح آب تا بالای تاج سرریز از دریچه استفاده شد. به این صورت که با پایین آوردن دریچه، تراز سطح آب افزایش یافته و امکان قرائت و برداشت داده‌ها فراهم شد. در انتهای کانال نیز یک سرریز مثلثی ۵۳ درجه برای اندازه‌گیری دبی جریان در پایین‌دست سرریز جانبی در نظر گرفته شده و به روش حجمی کالیبره شد. در شکل ۲ پلان کانال آزمایشگاهی به‌صورت شماتیک ارائه شده است. در شکل ۳ نیز فلوم آزمایشگاهی و اجزاء آن شامل سرریز جانبی، سرریز مثلثی ۵۳ درجه و عمق‌سنج نشان داده شده است.

سرریزهای جانبی مورد استفاده در این پژوهش از شیشه و به ضخامت ۶ میلی‌متر انتخاب شد. همچنین برای فراهم شدن شرایط یک سرریز لبه‌تیز، لبه آن‌ها به‌سمت خارج کانال اصلی شیب‌دار در نظر گرفته شد. ارتفاع تیغه جریان روی تاج سرریز توسط یک پیژومتر که در بدنه مخزن فلزی نصب شده بود، اندازه‌گیری شده است. همه آزمایش‌ها برای شرایط جریان زیربحرانی انجام شد. محدوده تغییرات پارامترهای هندسی و هیدرولیکی در این آزمایش‌ها در جدول ۲ خلاصه شده است. همچنین در جدول ۳، ابعاد هندسی سرریزهای جانبی لبه‌تیز مرکب مورد استفاده در آزمایش‌ها نشان داده شده است. در مجموع ۱۲ سرریز ساخته شد که آزمایش‌های سرریزهای ۹-۱۰ در ۱۰ دبی جریان مختلف و برای سرریزهای ۱۲-۱۰ در ۶ دبی جریان مختلف انجام شد. قابل ذکر است که با توجه به طول کم سرریز جانبی و افت انرژی ناچیز، فرض ثابت بودن انرژی مخصوص در طول سرریز جانبی قابل پذیرش است.



شکل ۲- نمای شماتیک کانال آزمایشگاهی.



شکل ۳- فلوم آزمایشگاهی، سرریز جانبی، سرریز مثلثی و عمق‌سنج.

جدول ۲- محدوده تغییرات پارامترهای هندسی و هیدرولیکی در آزمایش‌ها.

پارامتر	B (سانتی متر)	l_1 (سانتی متر)	Q (لیتر بر ثانیه)	Fr_1
حداقل	۳۰	۱/۸۶	۱/۶۹	۰/۴۲
حداکثر	۳۰	۱۰/۵	۱۶/۵	۰/۹۶

جدول ۳- ابعاد هندسی سرریزهای جانبی لبه‌تیز مرکب.

تعداد آزمایش‌ها	b_3 (سانتی‌متر)	b_2 (سانتی‌متر)	b_1 (سانتی‌متر)	W_3 (سانتی‌متر)	W_2 (سانتی‌متر)	W_1 (سانتی‌متر)	
۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۳	۰	۳	سرریز ۱
۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۵	۰	۵	سرریز ۲
۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۷	۰	۷	سرریز ۳
۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۵	۳	۵	سرریز ۴
۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۷	۳	۷	سرریز ۵
۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۷	۵	۷	سرریز ۶
۱۰	۷/۵	۱۵	۷/۵	۳	۰	۳	سرریز ۷
۱۰	۷/۵	۱۵	۷/۵	۱/۵	۰	۱/۵	سرریز ۸
۱۰	۷/۵	۱۵	۷/۵	۳	۱/۵	۳	سرریز ۹
۶	۷/۵	۱۵	۷/۵	۴/۵	۰	۴/۵	سرریز ۱۰
۶	۷/۵	۱۵	۷/۵	۴/۵	۱/۵	۴/۵	سرریز ۱۱
۶	۷/۵	۱۵	۷/۵	۴/۵	۳	۴/۵	سرریز ۱۲

نتایج و بحث

استخراج رابطه بهینه برای تعیین ضریب دبی سرریز جانبی مرکب: همان‌طور که قبلاً مورد اشاره قرار گرفت، هدف از این پژوهش استخراج یک رابطه کاربردی به صورت بدون بعد برای تخمین ضریب دبی سرریزهای جانبی لبه‌تیز مرکب است. با انجام تحلیل ابعادی و نیز مدل‌سازی فیزیکی، می‌توان این رابطه را استخراج نمود. به کمک رابطه ۷ و نیز شکل کلی روابطی که توسط محققان مختلف برای ضریب دبی سرریزهای جانبی لبه‌تیز مستطیلی ارایه شده است، رابطه‌ای به صورت کلی زیر برای تخمین ضریب دبی سرریزهای جانبی مرکب مستطیلی-مستطیلی پیشنهاد شده است:

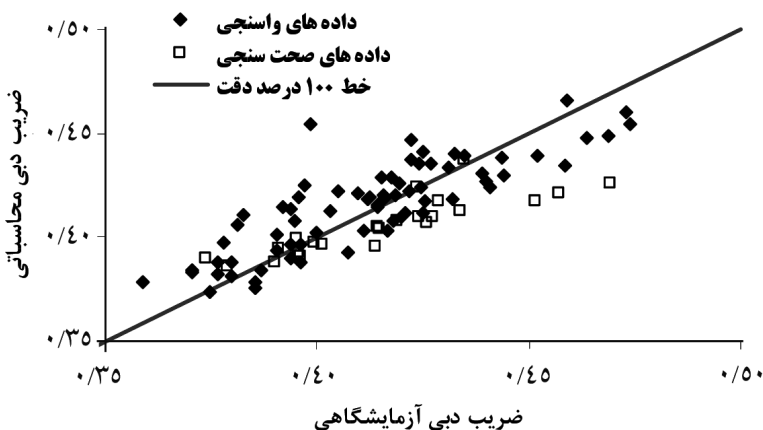
$$C = aFr_1^b + c(\bar{w}/y_1)^d + e(B/y_1)^f + h \quad (۸)$$

که در آن، ضرایب a ، b ، c ، d ، e ، f و h ضرایب ثابتی هستند که به کمک داده‌های آزمایشگاهی این پژوهش و با حداقل‌سازی مجموع مربعات خطا به دست می‌آیند. برای این کار ابتدا سری آزمایش‌ها به دو بخش واسنجی و صحت‌سنجی تفکیک شدند به طوری که داده‌های ۹ سرریز (سرریزهای ۱-۹) برای بخش واسنجی و داده‌های ۳ سرریز (سرریزهای ۱۰-۱۲) برای بخش صحت‌سنجی در نظر گرفته

شدند. سپس به کمک رابطه‌های ۲ و ۳ و با توجه به معلوم بودن دبی عبوری از سرریز جانبی و مشخصات هندسی سرریز، مقدار واقعی ضریب دبی سرریز جانبی لبه‌تیز مرکب محاسبه شد. حال به کمک رابطه ۸ و با توجه به معلوم بودن ضریب دبی و پارامترهای بدون‌بعد، ضرایب ثابت a, b, c, d, e, f و h طوری محاسبه شدند که ضریب دبی محاسباتی در مقایسه با ضریب دبی واقعی کم‌ترین اختلاف را داشته باشد. به این منظور از پارامتر آماری مجموع مربعات خطا به‌عنوان تابع هدف و از ضرایب مجهول a تا h به‌عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری استفاده شده و مراحل بهینه‌سازی ضرایب در محیط اکسل انجام شد. در نهایت رابطه زیر برای برآورد ضریب دبی سرریزهای جانبی لبه‌تیز مرکب در شرایط جریان زیربحرانی در مرحله واسنجی به‌دست آمد:

$$C = -0.0551Fr_1 + 0.1063(\bar{w}/y_1)^{2.1065} + 0.00168(B/y_1)^{1.1789} + 0.412 \quad (9)$$

به‌منظور ارزیابی دقت رابطه پیشنهادی و صحت‌سنجی آن، رابطه یاد شده برای داده‌های بخش صحت‌سنجی مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل ۴، نتایج ضریب دبی به‌دست آمده از رابطه ۹ برای هر دو بخش از داده‌های واسنجی و صحت‌سنجی در مقایسه با مقادیر واقعی ضریب دبی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که نتایج این رابطه برای هر دو بخش از داده‌های واسنجی و صحت‌سنجی قابل‌قبول است.



شکل ۴- مقایسه نتایج محاسباتی و آزمایشگاهی ضریب دبی سرریز جانبی مرکب برای داده‌های واسنجی و صحت‌سنجی.

ارزیابی آماری نتایج دبی جریان عبوری از سرریز جانبی مرکب: بعد از استخراج رابطه مناسب برای تخمین ضریب دبی، حال می‌توان با استفاده از رابطه ۲، دبی جریان عبوری از سرریزهای جانبی با مقطع مرکب^۱ را محاسبه نمود. این نتایج برای داده‌های بخش واسنجی و صحت‌سنجی در شکل ۵ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که مطابقت این نتایج با مقادیر واقعی به‌ویژه برای داده‌های واسنجی رضایت‌بخش است به طوری که تقریباً همه دبی‌های محاسباتی عبوری از سرریزهای بخش واسنجی و صحت‌سنجی در محدوده خطای $\pm 10\%$ درصد قرار گرفته‌اند. برای ارزیابی دقت نتایج محاسباتی رابطه پیشنهادی ۹ از پارامترهای آماری زیر استفاده شده است.

الف- خطای متوسط که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(Q_w - Q_c)] \quad (10)$$

که در آن، N : تعداد داده‌ها، Q_w : دبی آزمایشگاهی عبوری از سرریز جانبی و Q_c : دبی محاسباتی به دست آمده از رابطه‌های ۲ و ۸ می‌باشند.

ب- جذر میانگین مربعات خطا که با رابطه زیر تعریف می‌شود:

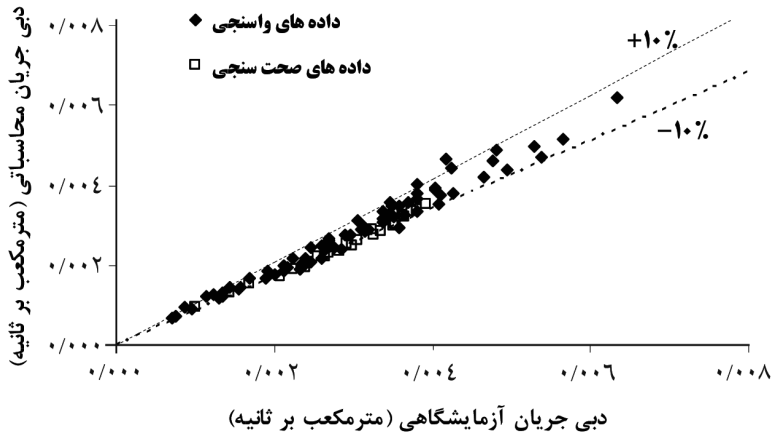
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [Q_w - Q_c]^2} \quad (11)$$

ج- پارامتر آماری α که نشان‌دهنده شیب خط رگرسیون است.

د- درصد میانگین مطلق خطا که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{e_i}{Q_w} \right| \times 100 \quad (12)$$

که در آن، e_i : اختلاف بین مقادیر دبی آزمایشگاهی و محاسباتی می‌باشد. پارامترهای آماری بالا برای داده‌های بخش واسنجی و صحت‌سنجی محاسبه شده و در جدول ۴ ارائه شده است.



شکل ۵- مقایسه نتایج محاسباتی و آزمایشگاهی دبی عبوری از سرریز جانبی مرکب برای داده‌های واسنجی و صحت‌سنجی.

جدول ۴- مقایسه پارامترهای آماری نتایج محاسباتی دبی عبوری از سرریزهای لبه‌تیز جانبی مرکب.

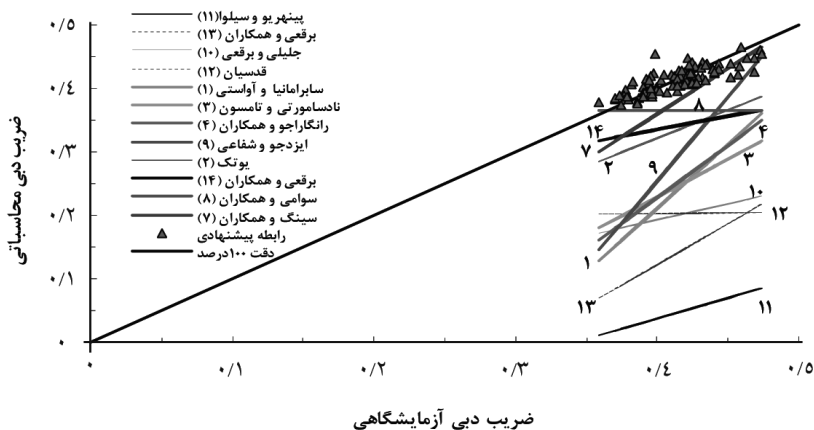
R^2	α	MAPE	RMSE	ME	
۰/۹۶	۰/۹۴	۸/۰۱	۰/۰۰۰۲۷	۰/۵۹۲	داده‌های واسنجی
۰/۹۸	۰/۹۰	۹/۸۸	۰/۰۰۰۳۸	۰/۱۳۳	داده‌های صحت‌سنجی

همان‌طور که در جدول بالا مشاهده می‌شود، به غیر از پارامتر MAPE که برای داده‌های صحت‌سنجی بیش‌تر از ۱۰ درصد است، بقیه پارامترها دارای وضعیت مناسبی می‌باشند. مقادیر پارامترهای ME و RMSE در هر دو بخش بسیار کم بوده و تقریباً نزدیک به صفر می‌باشند. نکته‌ای که لازم است در این‌جا مورد اشاره قرار گیرد این است که در سرریزهای بخش صحت‌سنجی، تعداد آزمایش‌های انجام شده کم‌تر از سرریزهای بخش واسنجی است. به همین دلیل مقدار خطای محاسبه‌ها بخش صحت‌سنجی بیش‌تر از بخش واسنجی شده است. به هر حال با توجه به نتایج آماری بالا، می‌توان روابط پیشنهادی این پژوهش برای برآورد دبی جریان عبوری از سرریزهای جانبی لبه‌تیز مرکب را با اطمینان قابل‌قبولی مورد استفاده قرار داد.

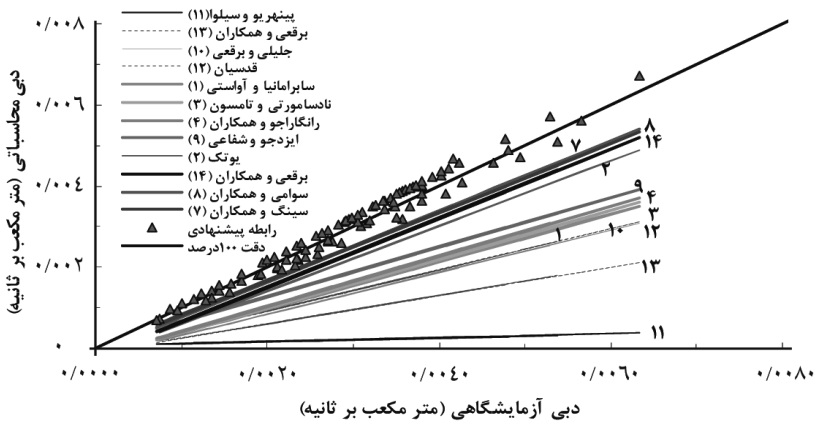
ارزیابی دقت روابط سرریزهای جانبی ساده برای سرریز جانبی مرکب: با توجه به این‌که تاکنون رابطه مشخصی برای تعیین ضریب دبی سرریزهای جانبی مرکب ارایه نشده است، در این مقاله برای مقایسه نتایج رابطه پیشنهادی این پژوهش با نتایج محققان قبلی، روابط ارایه شده توسط محققان مختلف برای سرریزهای جانبی مستطیلی ساده (رابطه‌های جدول ۱) مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نتایج ضریب دبی این روابط در نمودار شکل ۶ نشان داده شده است. قابل ذکر است که برای استفاده از این

رابطه‌ها در سرریز جانبی مرکب که دارای ۳ مقدار برای متغیر w (ارتفاع تاج سرریز) است، از متغیر جدید \bar{w} (متوسط وزنی) استفاده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود همه روابط سرریز جانبی ساده، ضریب دبی سرریز جانبی مرکب را بسیار کم‌تر از مقدار آزمایشگاهی برآورد کرده و بنابراین قابل اعتماد نیستند. از میان این رابطه‌ها، رابطه ۱۱ (پینهریو و سیلوا، ۱۹۹۷) و رابطه ۷ (سینگ و همکاران، ۱۹۹۴) به ترتیب با میانگین خطای نسبی ۹۱/۶ و ۹/۹۴ درصد، بیش‌ترین و کم‌ترین خطا را دارند. در این شکل، نتایج رابطه پیشنهادی این پژوهش (رابطه ۹) نیز ارائه شده است. مطابقت قابل قبول این رابطه با مقادیر آزمایشگاهی نسبت به رابطه‌های محققان مختلف در این نمودار مشخص است به طوری که رابطه پیشنهادی با متوسط خطای حدود ۲/۸ درصد، به عنوان مناسب‌ترین رابطه قابل معرفی است. قابل ذکر است که در این نمودار، نتایج رابطه‌های ۵ و ۶ (هاگر، ۱۹۸۶؛ چیونگ، ۱۹۹۱) به دلیل در نظر گرفتن ارتفاع تاج صفر و مغایرت با شرایط آزمایشگاهی این پژوهش قابل ارائه نیستند. اعداد نشان داده شده در این نمودار، بیانگر شماره هر رابطه در جدول ۱ است.

در نمودار شکل ۷ نتایج دبی جریان عبوری از سرریز جانبی مرکب به دست آمده از رابطه‌های سرریزهای ساده ارائه شده است. در این شکل نیز مشخص است که همه رابطه‌های محققان، مقدار دبی جریان را کم‌تر از واقع برآورد می‌کنند. براساس محاسبه‌های صورت گرفته، رابطه‌های ۱۱ (پینهریو و سیلوا، ۱۹۹۷) و ۷ (سینگ و همکاران، ۱۹۹۴) به ترتیب با میانگین خطای نسبی ۹۲/۴ و ۱۶/۵ درصد، بیش‌ترین و کم‌ترین خطا را نسبت به مقادیر دبی آزمایشگاهی دارند. خطای رابطه پیشنهادی برای محاسبه دبی عبوری از سرریز جانبی مرکب حدود ۶/۴ درصد است.



شکل ۶- نمودار مقایسه نتایج ضریب دبی به دست آمده از رابطه‌های سرریزهای جانبی ساده با مقادیر آزمایشگاهی.



شکل ۷- نمودار مقایسه نتایج دبی جریان به دست آمده از رابطه‌های سرریزهای جانبی ساده با مقادیر آزمایشگاهی.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش ابتدا براساس هندسه سرریزهای لبه‌تیز جانبی مرکب، معادله دیمارچی برای محاسبه دبی عبوری از این گونه سرریزها اصلاح شد و سپس با انجام حدود ۱۱۰ آزمایش و براساس تحلیل ابعادی، رابطه ساده و با دقت مناسبی برای تخمین ضریب دبی سرریزهای جانبی لبه‌تیز مرکب مستطیلی- مستطیلی ارایه شد. یافته‌های مهم این پژوهش عبارتند از:

۱- ضریب دبی در سرریزهای جانبی لبه‌تیز مرکب نیز مشابه سرریزهای لبه‌تیز ساده به صورت تابعی از ۳ پارامتر بدون بعد عدد فرود جریان در بالادست سرریز، نسبت ارتفاع وزنی تاج سرریز به عمق جریان در بالادست سرریز و نسبت عرض کانال به عمق جریان در بالادست سرریز می‌باشد.

۲- رابطه‌ای برای برآورد دبی عبوری از سرریزهای جانبی لبه‌تیز مرکب پیشنهاد شد. با محاسبه پارامترهای آماری برای داده‌های بخش واسنجی (۹ سرریز)، مقادیر ضریب تبیین، خطای متوسط، ریشه دوم میانگین مربعات خطا، شیب خط رگرسیون و درصد میانگین مطلق خطا به ترتیب ۰/۰۰۲۷، ۰/۹۴، ۸/۰۱ و ۰/۰۱ درصد به دست آمده‌اند. همچنین برای بخش صحت‌سنجی (۳ سرریز) این مقادیر به ترتیب ۰/۹۸، ۹/۴، ۰/۰۰۳۸، ۰/۹۰ و ۹/۸۸ درصد به دست آمده‌اند.

۳- با بررسی رابطه‌های موجود تخمین ضریب دبی سرریزهای جانبی لبه‌تیز ساده، مشخص شد که هیچ‌یک از این روابط کارایی مناسبی برای سرریزهای جانبی مرکب ندارند به طوری که ضریب تخلیه و دبی جریان عبوری از سرریز جانبی مرکب را بسیار کم‌تر از واقع برآورد می‌کنند. رابطه‌های پینهریو و

سیلوا (۱۹۹۷) و سینگ و همکاران (۱۹۹۴) به ترتیب با میانگین خطای نسبی $۹۲/۴$ و $۱۶/۵$ درصد، بیش‌ترین و کم‌ترین خطا را نسبت به مقادیر دبی آزمایشگاهی دارند در حالی که رابطه پیشنهادی این پژوهش با خطای متوسط $۶/۴$ درصد، عملکرد و دقت بسیار بهتری دارد.

منابع

1. Akbari, R., and Ghodsian, M. 2011. Determination of discharge coefficient in triangular side weirs. In: 10th Iranian Hydraulic Conference, Gilan University, Rasht. (In Persian)
2. Borghei, S.M., Jalili, M.R., and Ghodsian, M. 2003. Discharge coefficient for sharp-crested side weirs in subcritical flow. *Water and Maritime Engineering*, 156: 2. 185-191.
3. Borghei, S.M., Jalili, M.R., and Ghodsian, M. 1999. Discharge coefficient for sharp crested side weirs in subcritical flow. *J. Hydr. Eng.* 125: 10. 1051-1056.
4. Borghei, S.M., and Salehi, H. 2003. Investigation of discharge coefficient in side weirs using physical model. In: 6th Int. Conf. on Civil Engineering, Esfahan. (In Persian)
5. Cheong, H. 1991. Discharge coefficient of lateral diversion from trapezoidal channel. *J. Irrig. and Drain. Eng.* 117: 4. 461-475.
6. De Marchi, G. 1934. Essay on the performance of lateral weirs. *L Energia Electrica Milano, Italy*, 11: 11. 849-860.
7. Emiroglu, M.E., Kaya, N., and Agaccioglu, H. 2010. Discharge Capacity of Labyrinth Side Weir Located on a Straight Channel. *J. Irrig. and Drain. Eng.* 136: 1. 37-46.
8. Ghobadian, R. 2011. Experimental and numerical simulation of flow in side weirs with hydraulic jump. Scientific Study Report No. 302, Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, 88p. (In Persian)
9. Ghobadian, R., and Shafai Bajestan, M. 2006. Optimization of discharge coefficient of side weirs in irrigation canals using artificial neural network. In: 1st National Conf. on Management of Irrigation and Drainage Networks, Shahid Chamran University, Ahwaz. (In Persian)
10. Ghodsian, M. 1998. Viscosity and surface tension effects on rectangular weir flow. *Int. J. Eng. Sci.* 9: 4. 111-117.
11. Ghodsian, M. 1997. Elementary discharge coefficient for rectangular side weir, P 36-42. In: 4th Int. Conf. on Civil Engineering, Tehran.
12. Hager, W.H. 1987. Lateral outflow of side weirs. *J. Hydr. Eng.* 113: 4. 491-504.
13. Honar, T., and Tarazkar, M.H. 2008. Estimation of side weir discharge coefficient by artificial neural network. *J. Agric. Sci. Natur. Resour.* 14: 6. 195-203.
14. Izadjoo, F., and Shafai Bajestan, M. 1996. Experimental investigation of discharge coefficient in side weirs, P 29-44. In: 4th River Engineering Conference, Ahwaz. (In Persian)

15. Jalili, M.R., and Borghei, S.M. 1996. Discussion of "Discharge coefficient of rectangular side weir", by Singh R., Manivannan, D. and Satyanarayana, T., J. of Irrig. and Drain. Eng. 122: 2. 132.
16. Jan, C.D., Chang, C.D., and Lee, M.H. 2006. Discussion of "Design and calibration of a compound sharp-crested weir", by Martinez, J., Recca, J., Morillas, M. T. and Lopez, J. G. J. Hydr. Eng. 132: 8. 868-872.
17. Keshavarz, Z., Rahimpour, M., and Ahmadi, M.M. 2011. Study of hydraulic characteristics of trapezoidal sharp crested side weirs. In: 6th National Congress on Civil Engineering, Semnan University, Semnan. (In Persian)
18. Khorchani, M., and Blanpain, O. 2005. Development of a discharge equation for side weirs using artificial neural networks. J. Hydr. Info. IWA Publishing, 7: 1. 31-39.
19. Martinez, J., Recca, J., Morillas, M.T., and Lopez, J.G. 2005. Design and calibration of a compound sharp-crested weir. J. Hydr. Eng. 131: 2. 112-116.
20. Moghiseh, K., and Esmaili, K. 2011. Studying effects of hydraulic characteristics on discharge coefficient of side weirs with variable crest elevation. In: 6th National Congress on Civil Engineering, Semnan University, Semnan. (In Persian)
21. Piratheepan, M., Winston, N.E.F., and Pathirana, K.P.P. 2006. Discharge measurements in open channels using compound sharp-crested weirs. J. Inst. Eng. Sri Lanka, 3: 31-38.
22. Ramamurthy, A.S., Qu, J., and Vo, D. 2006. Nonlinear PLS method for side weir flows. J. Irrig. and Drain. Eng. 132: 5. 486-489.
23. Ranga Raju, K.G., Parasad, B., and Gupta, S.K. 1979. Side weir in rectangular channel. J. Hydr. Eng. 105: 5. 547-554.
24. Singh, R., Manivannan, D., and Satyanarayana, T. 1994. Discharge coefficient of rectangular side weirs. J. Irrig. and Drain. Eng. 120: 4. 814-819.
25. Subramanya, K., and Awasthy, S.C. 1972. Spatially varied flow over side weirs. J. Hydr. Eng. 98: 1. 1-10.
26. Swamee, P.K., Pathak, S.K., Mohan, M., Agrawal, S.K., and Ali, M.S. 1994. Subcritical flow over rectangular side weir. J. Irrig. and Drain. Eng. 120: 1. 212-217.
27. United States Bureau of Reclamation (USBR). 1963. Compound weir study, Hydraulic Laboratory Report No. Hyd. 505, 34p.
28. Yasi, M., and Abbaspour, A. 2005. Flow over sharp-crested, truncated-triangular weirs. Sci. J. Agric. 28: 2. 165-181. (In Persian)
29. Yu-Tech, L. 1972. Discussion of "Spatially varied flow over side weirs" by Subramanya, K. and Awasthy, S. C., J. Hydr. Div. 98: 1. 2046-2048.
30. Zahiri, A. 2012. Quasi-two dimensional mathematical model for prediction of flow discharge over compound sharp-crested weirs. J. Water and Soil Conservation. (In Persian, In Press)



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 20(1), 2013
<http://jwsc.gau.ac.ir>

Experimental investigation of discharge coefficient for compound sharp crested side weirs

**S. Bagheri¹, *A.R. Zahiri², R. Ghobadian³, A.A. Dehghani²
and M. Meftah Halaghi⁴**

¹M.Sc. Student, Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, ²Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, ³Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, Razi University, Kermanshah, ⁴Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources
Received: 05/07/2012; Accepted: 10/16/2012

Abstract

Side weir is one of the most common structures for flow control and diversion in hydraulic laboratories, irrigation and drainage networks and water and waste water channels. Side weirs are generally sharp crested and have limitations in measuring discharge, hence in this study, the compound sharp crested side weirs have been suggested, for the first time. Accurate flow measurement in wide range of discharges in comparison with simple side weirs, is one of the main characteristics of these weirs. Some experiments have been carried out in a rectangular-rectangular compound side weir with variable heights and widths. Dimensional analysis of effective parameters on flow discharge of a compound weir illustrates that its discharge coefficient is a function of upstream Froude number, ratio of weighted height of weir crest to upstream water depth and ratio of channel width to upstream water depth. Based on the experimental data and optimization technique, a dimensionless equation has been developed for calculation of the discharge coefficient. Then, a new equation has been proposed for prediction of flow discharge in compound rectangular-rectangular sharp crested side weirs. Through comparison of results of this new equation and experimental data, the determination coefficients of training and testing data were calculated as 0.96 and 0.98, respectively. Also, mean average relative error was 6.4%.

Keywords: Flow discharge measurement, Side weir, Compound weirs, Discharge coefficient

* Corresponding Author; Email: zahiri@yahoo.com