



دانشگاه گواران و منابع طبیعی

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و دوم، شماره سوم، ۱۳۹۴

<http://jwsc.gau.ac.ir>

تعیین ضریب دبی سرریزهای جانبی لبه‌تیز مرکب مثلثی - مستطیلی

*مجتبی عامری^۱، احمد احمدی^۲ و امیراحمد دهقانی^۳

^۱دانشجوی دکتری گروه مهندسی عمران، دانشگاه شاهرود، دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه شاهرود،

^۲دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم و منابع طبیعی گرگان

تاریخ دریافت: ۹۳/۸/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۹۴/۱/۱۹

چکیده

سابقه و هدف: سرریزهای جانبی لبه‌تیز به‌عنوان یکی از متداول‌ترین سازه‌های هیدرولیکی جهت انحراف و کنترل جریان در کانال‌های کشاورزی، شبکه‌های زهکشی، سیستم‌های تصفیه آب و فاضلاب مورد استفاده قرار می‌گیرند. سرریزهای جانبی ساده، عموماً دارای محدودیت تخلیه و اندازه‌گیری دبی در مواجهه با جریان‌های نسبتاً زیاد کانال اصلی هستند. یکی از روش‌های حل این مشکل، به‌کارگیری سرریزهای مرکب است. به‌دلیل پژوهش‌های اندک در مورد سرریزهای مرکب، در این پژوهش، سرریز جانبی لبه‌تیز مرکب مثلثی - مستطیلی به‌صورت آزمایشگاهی و در شرایط جریان زیربحرانی بررسی شد.

مواد و روش‌ها: آزمایش‌های این پژوهش در فلوم تحقیقاتی دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود انجام شد. مقاطع سرریز مرکب به‌گونه‌ای طراحی شدند که دربرگیرنده تمام شرایط هندسی باشد و در مجموع حدود ۵۲۰ آزمایش انجام شد. به‌منظور برآورد دبی عبوری از این نوع سرریز دو روش مورد مطالعه قرار گرفت. در روش نخست سرریز مرکب به سه سرریز ساده تجزیه‌شده سپس با استفاده از روابط ضریب دبی سایر پژوهشگران که برای سرریزهای ساده لبه‌تیز جانبی مثلثی و مستطیلی پیشنهاد شده دبی جزء محاسبه و از مجموع آن دبی کل عبوری از سرریز به‌دست آمد. اما در روش دوم به‌دلیل عدم کارایی روش اول، با استفاده از پارامتر ارتفاع وزنی تاج (\bar{W}) روابطی برای تعیین ضریب دبی متوسط کل سرریزهای مثلثی - مستطیلی با زوایای رأس ۶۰ و ۹۰ درجه پیشنهاد شد. بررسی انواع آماره‌های خطا شامل درصد میانگین مطلق خطا (MAPE)، متوسط خطا (ME)، حداکثر خطای نسبی (MRE)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) حداکثر نسبت دبی واقعی به محاسباتی (σ) و ضریب همبستگی برای روابط پیشنهادی تعیین گردید.

یافته‌ها: در این پژوهش مشخص گردید روش نخست نمی‌تواند مقادیر دبی عبوری از سرریز مرکب را با دقت مناسب برآورد نماید. اما در روش دوم که در آن سرریز مرکب با یک سرریز مستطیلی لبه‌تیز ساده به ارتفاع تاج (\bar{W}) به‌نحوی معادل می‌شود که مساحت یکسانی را داشته باشند می‌تواند مفید و مؤثر باشد.

* مسئول مکاتبه: m49_ameri@yahoo.com

نتیجه‌گیری: با به‌کارگیری تحلیل ابعادی، مشخص شد که ضریب دبی متوسط سرریزهای لبه‌تیز جانبی مرکب مثلثی-مستطیلی، تابعی از عدد فرود جریان در مقطع بالادست سرریز (Fr_1)، نسبت ارتفاع وزنی تاج سرریز به عمق آب بالادست ($\frac{\bar{W}}{y_1}$) و نسبت طول سرریز به عمق آب بالادست ($\frac{L}{y_1}$) است و رابطه‌ای برای تخمین آن پیشنهاد شد. مقایسه نتایج حاصل از به‌کارگیری رابطه نام‌برده با داده‌های آزمایشگاهی نشان‌دهنده دقت بالای ($RMSE = 0/00131$) و ($R^2 = 0/991$) آن در تخمین دبی عبوری از سرریز جانبی مرکب است.

واژه‌های کلیدی: ارتفاع وزنی تاج، تحلیل ابعادی، ترکیب خطی، سرریز جانبی، جریان زیربحرانی

مقدمه

پژوهش‌های گذشته عموماً سرریزهای مرکب لبه‌تیز نرمال را که در جهت عمود بر جریان اصلی کانال نصب می‌شوند شامل می‌گردد. دیمارچی (1934) با صرف‌نظر نمودن از افت انرژی در طول سرریز، حل تحلیلی معادلات حاکم بر جریان در محدوده سرریزهای جانبی را به‌دست آورد. وی با فرض ثابت بودن انرژی، معادله حاکم بر جریان را ارائه نمود و برای محاسبه دبی خروجی از سرریزهای جانبی ضریب شدت جریان را که به نام ضریب دیمارچی نیز شناخته شده است معرفی کرد (10).

سابرامانیا و آواستی (1972)، رانگ‌راجو و همکاران (1979)، هاگر (1987)، چونگ (1991)، سینگ و همکاران (1994)، سوامی و همکاران (1994)، قدسیان (1997)، برقی و همکاران (2003)، امیراگلو و همکاران (2011) سرریز جانبی لبه‌تیز مستطیلی در یک کانال مستقیم را مورد مطالعه قرار دادند و روابطی را جهت محاسبه ضریب دبی ارائه دادند. کومار و پاتاک (1987) به همراه قدسیان (2004) نیز مطالعاتی را بر روی سرریزهای جانبی لبه‌تیز مثلثی انجام دادند و روابطی را جهت تعیین ضریب دبی عبوری پیشنهاد دادند. اما در خصوص سرریزهای مرکب لبه‌تیز، اولین بار سازمان احیای اراضی آمریکا (1963) از یک سرریز لبه‌تیز مثلثی-مستطیلی نرمال برای اندازه‌گیری دبی جریان استفاده نمود. مارتینز و همکاران (2005) با

اندازه‌گیری دقیق میزان جریان در کانال‌های باز برای بسیاری از پروژه‌های مهندسی دارای اهمیت است. انواع مختلفی از سازه‌های اندازه‌گیری جریان همچون سرریز، روزنه، فلوم و دریچه‌ها وجود دارد. سازه مورد استفاده جهت تعیین مقدار دبی باید دارای دقت کافی و اقتصادی بوده و همچنین نصب، عملکرد و نگهداری آن به سهولت امکان‌پذیر باشد. در بین سرریزهای مختلف، سرریزهای لبه‌تیز بیش‌ترین کاربرد در اندازه‌گیری جریان در کانال‌های باز را دارند. این سازه‌ها که معمولاً به‌صورت نرمال و جانبی مورد استفاده قرار می‌گیرند بیش‌تر به شکل‌های مستطیلی، مثلثی و دوزنقه‌ای ساده هستند. نتایج پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهند که سرریز مثلثی با زاویه رأس کوچک دارای بیش‌ترین دقت در اندازه‌گیری دبی بوده اما به‌رغم این امتیاز فقط برای دبی‌های کوچک قابل کاربرد است. همچنین اثرات برگشتی آب در حین اندازه‌گیری دبی‌های با مقادیر زیاد توسط سرریزهای لبه‌تیز ساده می‌تواند بر روی سازه‌های نصب‌شده در بالادست آنان مؤثر باشد. در شرایطی که اندازه‌گیری با دقت مناسب و در محدوده وسیعی از تغییرات دبی موردنظر باشد، استفاده از سرریز مرکب یک‌راه حل منطقی خواهد بود.

روش در سرریزهای نرمال با دقت مناسب قابل کاربرد است.

ظهیری و همکاران (2013) همچنین عامری و همکاران (2013) سرریزهای جانبی لبه‌تیز مرکب مستطیلی-مستطیلی را مورد مطالعه قرار دادند و با تعریف ارتفاع وزنی تاج روابطی را برای تخمین ضریب دبی ارائه نمودند. سوابق پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که مطالعات چندانی در خصوص ضریب دبی سرریزهای مرکب جانبی انجام نشده است و مطالعات محدودی که نیز انجام گرفته سرریزهای مرکب مستطیل-مستطیل را شامل می‌گردد. از آنجایی که سرریز مثلثی در اندازه‌گیری دبی جریان‌های کم دارای دقت بالایی است، بنابراین در این پژوهش به تعیین ضریب دبی سرریز جانبی لبه‌تیز مرکب مثلثی-مستطیلی پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

آنالیز ابعادی: به‌طور کلی ضریب دبی (C_d) در سرریزهای مثلثی لبه‌تیز جانبی به پارامترهای بی‌بعد زیر وابسته است:

$$C_{dt} = f_1 \left(Fr_1, \frac{L}{B}, \frac{L}{y_1}, \frac{w_2}{y_1}, \psi, S_0, We, \theta \right) \quad (1)$$

و در سرریزهای مستطیلی لبه‌تیز جانبی:

$$C_{dr} = f_1 \left(Fr_1, \frac{L}{B}, \frac{L}{y_1}, \frac{w_1}{y_1}, \psi_1, S_0, We \right) \quad (2)$$

که در آن، Fr_1 و V_1 به‌ترتیب عدد فرود و سرعت متوسط جریان در بالادست سرریز کانال اصلی، L : طول سرریز، B : عرض کانال اصلی، w_1 و w_2 به‌ترتیب ارتفاع تاج سرریز در بخش مستطیلی و مثلثی سرریز، ψ : زاویه انحراف جریان، S_0 : شیب طولی

بررسی آزمایشگاهی سرریز لبه‌تیز مرکب نرمال مثلثی-مثلثی، این نوع سرریز را برای استفاده در سدهای رسوب‌گیر حوضه‌های کوهستانی پیشنهاد دادند. انتخاب این نوع سرریز بیش‌تر به‌دلیل پیوستگی رابطه دبی-اشل در تمامی عمق‌های جریان روی سرریز و نیز دقت مناسب اندازه‌گیری دبی در محدوده وسیعی از شرایط جریان (کم‌آب تا سیلابی) بود. ایشان سرریز مرکب را به چند سرریز مثلثی با زوایای رأس و مشخصات هندسی متفاوت تقسیم و سپس با جمع جبری دبی‌های محاسباتی از هر قسمت، رابطه‌ای را برای تعیین ضریب دبی کل مقطع پیشنهاد دادند. پیراتیپان و همکاران (2006) نیز با بررسی آزمایشگاهی همین نوع سرریز مرکب با زوایای رأس متنوع‌تر، دبی عبوری از آن را به چهار روش محاسبه نمودند. این روش‌ها براساس چگونگی تقسیم مقطع مرکب به مقاطع جزء و به‌کارگیری ضرایب دبی آن ارائه شدند. سپس با تحلیل نتایج آزمایش‌ها، دقیق‌ترین روش را برای تعیین دبی عبوری از سرریز پیشنهاد دادند.

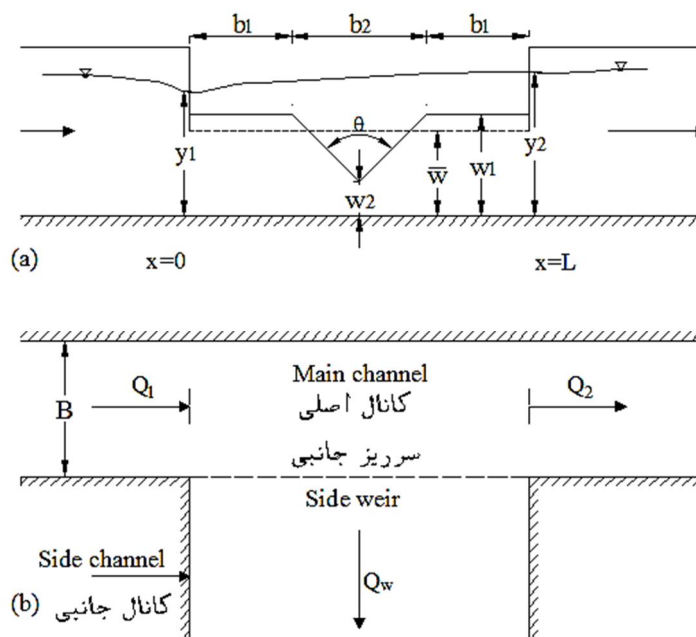
جان و همکاران (2006) نیز با الگو گرفتن از پژوهش‌های مارتینز و با انجام یک سری آزمایش‌های محدود، دبی جریان برای چهار نوع سرریز لبه‌تیز مرکب نرمال را مطالعه کردند. در این آزمایش‌ها، از ترکیب سرریزهای نرمال مستطیلی-مستطیلی، مستطیلی-دوزنقه‌ای، مثلثی-مستطیلی و مثلثی-دوزنقه‌ای استفاده شده است. ایشان با تقسیم مقاطع مرکب به چند مقطع منظم و سپس محاسبه ضریب دبی مربوط به آن‌که قبلاً توسط فرنچ (1986) برای مقطع مستطیلی و باس (1976) برای مقطع مثلثی ارائه شده بود توانستند مقدار دبی عبوری را با دقت نسبتاً قابل‌قبولی محاسبه نمایند. به‌عبارتی با جمع خطی دبی‌های جزء به‌دست آمده از روابط ضریب دبی مقاطع ساده و محاسبه دبی کل عبوری نشان دادند که این

بر اساس رابطه فوق، ψ در هر بخش سیال و با تغییر عدد فرود در طول سرریز به دلیل پرتاب جریان دارای مقادیر مختلفی خواهد بود. با کاهش عدد فرود جریان در کانال اصلی به سمت پایین دست، زاویه انحراف نسبت به راستای جریان افزایش می‌یابد. الخشاب (1975) نشان داد که پارامتر بی بعد (L/B) سرریز، شامل اثرات زاویه انحراف در ضریب دبی نیز است. بر این اساس ψ از روابط ۱ و ۲ این پژوهش حذف گردید. از طرفی برقی و همکاران (1999) گزارش دادند که می‌توان از اثر شیب کانال در شرایط زیر بحرانی جریان صرف نظر کرد. همچنین با علم به این موضوع که حداقل ارتفاع آب روی سرریز هنگام برداشت داده‌ها همواره تأمین شده است ($y_0 > 5 \text{ mm}$)، مقدار σ نیز بی اثر خواهد بود (11).

کانال، We : عدد وبر، ρ : جرم حجمی آب، σ : کشش سطحی آب و θ : زاویه رأس سرریز مثلثی است. مشخصات سرریز لبه تیز جانبی مرکب مثلثی-مستطیلی که از این پس به طور خلاصه سرریز مرکب گفته می‌شود در شکل ۱ نمایش داده شده است. زاویه انحراف جریان ψ که به صورت میزان انحراف لایه عبوری آب از روی سرریز نسبت به امتداد سرریز جانبی تعریف می‌شود را می‌توان مطابق رابطه ۳ ارائه نمود:

$$\sin \psi = \sqrt{1 - \left(\frac{V_1}{V_s}\right)^2} \quad (3)$$

که در آن، V_s : سرعت متناظر جریان dQ بر روی لبه است.



شکل ۱- مشخصات مدل سرریز جانبی لبه تیز مرکب مثلثی-مستطیلی.

Figure 1. Experimental compound triangular-rectangular sharp-crested side weirs.

فلوم نصب گردید. این دریچه توسط یک فرمان قابل تنظیم بود.

در آزمایش‌هایی که ارتفاع تاج سرریز زیاد بود جهت تأمین تراز جریان و افزایش سطح آب تا بالای تاج سرریز از این دریچه متحرک استفاده شد. بدین صورت که با پایین آوردن دریچه، تراز سطح آب افزایش یافته و امکان قرائت و برداشت داده‌ها فراهم گردید. سرریز مرکب در فاصله ۵ متری از ابتدای کانال نصب شد. شکل ۲ نمای شماتیک فلوم آزمایشگاهی به همراه تجهیزات آن را نشان می‌دهد.

جنس سرریزهای جانبی از ورق فلزی با ضخامت ۲ میلی‌متر انتخاب شد. همچنین برای فراهم شدن شرایط یک سرریز لبه‌تیز، لبه آن‌ها به سمت خارج کانال اصلی با زاویه ۶۰ درجه پخ‌دار شد.

در مجموع ۲۶ مقطع سرریز با مشخصات هندسی مختلف طراحی و ساخته شد. که محدوده این پارامترهای هندسی و هیدرولیکی آزمایش‌ها برای هر دو تیپ مقطع با زوایای رأس ۶۰ و ۹۰ درجه در جدول ۱ ارائه گردیده است.

بنابراین پارامترهای بی‌بعد مؤثر بر ضریب دبی سرریز مثلثی و مستطیلی به ترتیب عبارت می‌شوند از:

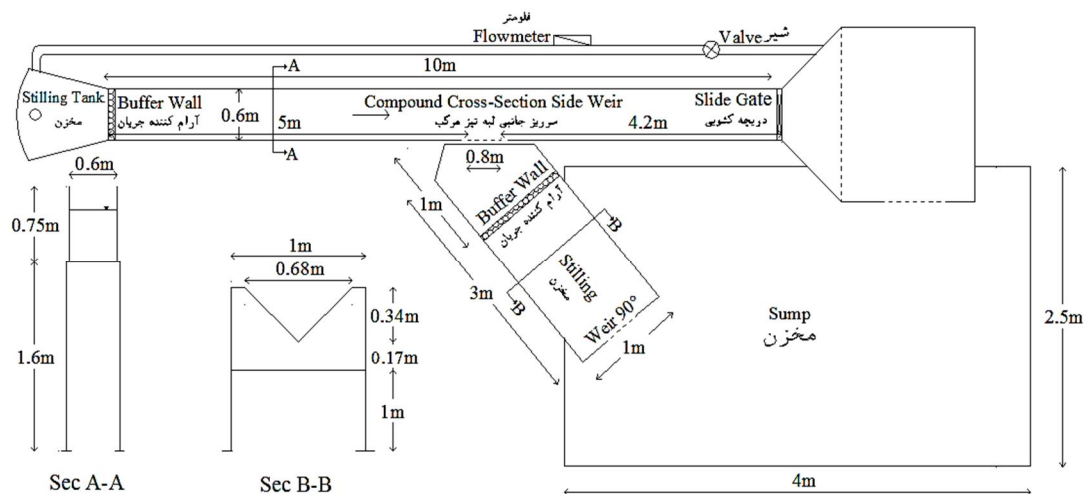
$$C_{dt} = f_1 \left(Fr_1, \frac{L}{B}, \frac{L}{y_1}, \frac{w_2}{y_1}, \theta \right) \quad (4)$$

$$C_{dr} = f_1 \left(Fr_1, \frac{L}{B}, \frac{L}{y_1}, \frac{w_1}{y_1} \right) \quad (5)$$

آزمایش‌های این پژوهش در فلوم آزمایشگاهی دانشگاه شاهرود به طول ۱۰ متر، عرض ۶۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۷۵ سانتی‌متر انجام شد.

دبی ورودی توسط یک دبی‌سنج آلتراسونیک با دقت ۰/۰۱ اندازه‌گیری گردید. جهت تعیین دبی خروجی سرریز جانبی مرکب، از سرریز مثلثی ۹۰ درجه کالیبره شده در انتهای یک مخزن فلزی جانبی به طول ۳ متر و عمق ۵۰ سانتی‌متر استفاده شد.

همچنین از یک عمق‌سنج دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر نیز برای اندازه‌گیری عمق آب داخل فلوم و در محدوده سرریز جانبی به‌کار گرفته شد. به‌منظور کنترل سطح آب داخل کانال، یک دریچه متحرک فولادی با ضخامت ۴ میلی‌متر در قسمت انتهایی



شکل ۲- نمای شماتیک فلوم آزمایشگاهی.

Figure 2. Experimental setup.

جدول ۱- محدوده آزمایش‌های سرریز جانبی لبه تیز مرکب.

Table 1. Characteristics of compound side weir.

مقاطع (Sections)		متغیرها (Variables)
$\theta = 90^\circ$	$\theta = 60^\circ$	
0.6	0.6	width (m) Channel
50-110	50-110	Discharge (L/s)
0.4-0.7	0.4-0.7	Weir length (m)
0.16-0.66	0.16-0.7	Froude number
0.49-8	0.49-1.7	b_2/b_1
0.14-0.51	0.15-0.51	w_2/w_1
0.36-0.79	0.42-1.8	\bar{w}/y_1 ratio
0.28-0.5	0.15-0.5	y_1/B
260	260	Number of runs

مشخص گردیده است، محاسبه شد. سپس مقدار دبی عبوری از سرریز جانبی مرکب در هر یک از مقاطع مثلث و مستطیل به صورت جداگانه محاسبه و سپس مطابق رابطه زیر با هم جمع شدند.

$$Q_w = \frac{8}{15} C_{dt} \sqrt{2g} \tan \frac{\theta}{2} (y_1 - w_2)^{2.5} + \frac{2}{3} C_{dr} \sqrt{2g} L (y_1 - w_1)^{1.5} \quad (6)$$

که در آن، C_{dr} ، C_{dt} به ترتیب ضرایب دبی سرریزهای جانبی مثلثی و مستطیلی ساده و Q_w دبی انحراف است.

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 که البته با بررسی نتایج، این فرض تأیید شد.

پس از اتمام آزمایش‌ها، با داشتن اطلاعات مورد نیاز، ابتدا مقادیر C_d با استفاده از معادلات عمومی سرریزهای جانبی به روشی که در ادامه به آن پرداخته می‌شود محاسبه، سپس با به‌کارگیری پارامترهای بی‌بعد روابط ۴ تا ۵ و انجام رگرسیون غیرخطی، روابطی برای تخمین ضریب دبی سرریز جانبی لبه‌تیز مرکب برای هر یک از مقاطع با زوایای رأس ۶۰ و ۹۰ درجه ارائه می‌گردد و در نهایت نیز یک رابطه کلی که برای هر دو سرریز نام‌برده قابل کاربرد است، پیشنهاد می‌شود.

استخراج روابط: در روش اول این پژوهش براساس روش جان و همکاران (2006)، مقدار دبی عبوری از سرریز با استفاده از روابط ضریب دبی ارائه‌شده توسط تعدادی از پژوهشگران که در جدول‌های ۲ و ۳

جدول ۲- روابط پیشنهادشده برای محاسبه ضریب تخلیه سرریز جانبی مثلثی.

Table 2. Proposed relation to calculate the discharge coefficient.

مقطع Section	رابطه پیشنهادی Proposed relation	محقق Author	ردیف (no.)
$\theta = 60$	$C_{dt} = 0.668 - 0.381Fr_1$	Kumar (1987)	1
$\theta = 90$	$C_{dt} = 0.619 - 0.203Fr_1$	Kumar (1987)	2
$\theta = 60$	$C_{dt} = 0.5707 - 0.2932Fr_1 + 0.1426 (w/y_1)$	Ghodsian (2004)	3
$\theta = 90$	$C_{dt} = 0.5607 - 0.2511Fr_1 + 0.1661 (w/y_1)$	Ghodsian (2004)	4

جدول ۳- روابط پیشنهادشده برای محاسبه ضریب تخلیه سرریز جانبی مستطیلی.

Table 3. Proposed relation to calculate the discharge coefficient of rectangular side weir.

شرایط Conditions	رابطه پیشنهادی Proposed relation	محقق Author	ردیف (no.)
زیربحرانی Subcritical $0 \leq w \leq 0.6$	$C_{dr} = 0.611 \sqrt{1 - \frac{3Fr_1^2}{2 + Fr_1^2}}$	Subramanya and Awasthy (1972)	1
	$C_{dr} = 0.485 \sqrt{\frac{2 + Fr_1^2}{3 + Fr_1^2}}$	Hager (1987)	2
	$C_{dr} = 0.33 - 0.18Fr_1 + 0.49(w/y_1)$	Singh (1994)	3
	$C_{dr} = 0.82 - 0.3Fr_1 - 0.22(w/y_1) + 0.08(L/B)$	Borghei (2003)	4
زیربحرانی Subcritical	$C_{dr} = \left[0.836 + (-0.035 + 0.39 \left(\frac{w}{y_1}\right)^{12.69} + 0.158 \left(\frac{L}{B}\right)^{0.59} + 0.49 \left(\frac{L}{y_1}\right)^{0.42} + 0.244Fr_1^{2.125} \right]^{3.018} \cdot 5.36$	Emiroglu (2011)	5

به عبارتی مقطع مرکب با یک مقطع مستطیلی ساده با ارتفاع تاج (\bar{W}) معادل می‌شود. این پارامتر در سرریز مرکب مثلثی- مستطیلی حاضر به صورت رابطه ۷ به دست می‌آید که در آن w_1 و w_2 به ترتیب ارتفاع تاج در قسمت‌های مستطیلی و مثلثی مقطع مرکب هستند (شکل ۱).

$$\bar{W} = \frac{2w_1b_1 + w_2b_2 + 0.5(w_1 - w_2)b_2}{L} \quad (7)$$

$$L = 2b_1 + b_2 \quad (8)$$

در روش دوم پژوهش با استفاده از روابط ارائه شده یک ضریب دبی متوسط برای کل مقطع طوری تعیین می‌شود که کمترین مقدار خطا را ایجاد نماید. اما متفاوت بودن ارتفاع تاج سرریز در قسمت‌های بالایی و زیرین، سبب اشکال در به کارگیری روابط می‌گردد. برای رفع این معضل، راه‌حلی که مورد نظر قرار گرفت استفاده از پارامتر ارتفاع وزنی تاج (\bar{W}) است که اولین بار توسط ظهیری و همکاران (2012) برای محاسبه ضریب دبی مقطع مرکب مستطیلی به کار گرفته شد.

نتایج و بحث

در روش اول پس از محاسبه دبی کل عبوری از سرریز به‌ازای ضرایب دبی مختلف، مقادیر به‌دست آمده با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه گردید که نمودارهای آن در شکل‌های ۳ و ۴ نمایش داده شده است. همچنین مقادیر MAPE بر اساس روش اول پژوهش برای تمام حالت‌های ترکیب روابط محاسبه گردید که در جدول ۴ ارائه گردیده است. با بررسی نمودارهای شکل‌های ۳ و ۴، همچنین مقادیر جدول ۴ ملاحظه می‌شود که در این روش مقادیر دبی محاسباتی برای هر دو مقطع سرریز به‌طور قابل ملاحظه‌ای کم‌تر از مقادیر آزمایشگاهی برآورد شده‌اند. به‌طوری‌که حداقل درصد خطای مطلق متوسط (MAPE) در ترکیب معادلات کومار و سینگ حدود ۱۹/۸ و ۲۰/۴ به‌ترتیب برای مقاطع مرکب با زوایای رأس مثلث ۶۰ و ۹۰ درجه می‌باشد و ترکیب روابط قدسیان و برقی حداکثر درصد خطای ۴۲/۲ و ۳۹/۵ برای مقاطع نام‌برده را به خود اختصاص داده است. از این نتایج استنباط می‌شود اگرچه به‌کارگیری روابط ضریب دبی پژوهشگران نام‌برده در برآورد دبی عبوری از سرریزهای ساده مثلثی و مستطیلی به‌تنهایی می‌تواند مفید باشد اما برای سرریزهای مرکب مورد پژوهش ایجاد خطای قابل‌توجهی نموده و لازم است مطابق روش دوم یک ضریب دبی متوسط برای کل مقطع سرریز مرکب معرفی شود. اما در روش دوم پژوهش که سرریز مرکب با یک سرریز مستطیلی به ارتفاع تاج (\bar{w}) معادل گردید، پس از انجام رگرسیون و بررسی همه پارامترهای مؤثر، روابط زیر برای محاسبه ضریب دبی در سرریز با زوایای رأس ۶۰ و ۹۰ درجه پیشنهاد می‌شوند:

$$C_{de} = 0.3356 - 0.051Fr_1^{0.583} \quad (15)$$

$$+ 0.3682 \left(\frac{\bar{w}}{y_1}\right)^{1.103} + 0.1245 \left(\frac{L}{y_1}\right)^{0.53}$$

پس از تعیین پارامتر \bar{w} به کمک رابطه زیر مقادیر ضریب دبی عبوری سرریز مرکب محاسبه می‌شود:

$$C_{de} = Q_w / \frac{2}{3} \sqrt{2g} L (y_1 - \bar{w})^{1.5} \quad (9)$$

که در آن، C_{de} : ضریب دبی متوسط کل مقطع مرکب سرریز جانبی است. در این روش مقادیر C_{de} با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی شامل عمق جریان بالادست سرریز (y_1) و دبی عبوری از سرریز براساس رابطه ۹ محاسبه می‌گردد. با یافتن پارامترهای مؤثر بر ضریب دبی به کمک آنالیز ابعادی که در رابطه ۵ نشان داده شده است (با تغییر \bar{w} به جای w_1)، رابطه‌ای که شامل تمام این پارامترها باشد برای آن تعریف می‌شود. سپس ضرایب مجهول آن از طریق رگرسیون غیرخطی به گونه‌ای محاسبه می‌شوند که کم‌ترین خطا را نسبت به مقادیر واقعی داشته باشند. به‌منظور ارزیابی نتایج در این پژوهش از درصد میانگین مطلق خطا (MAPE)، متوسط خطا (ME)، ماکزیمم خطای نسبی (MRE)، نسبت میانگین مقادیر مشاهداتی به محاسباتی دبی عبوری از سرریز (σ) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) مطابق روابط زیر به‌کار گرفته شد:

$$MAPE = E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Q_c - Q_o}{Q_o} \right| \quad (10)$$

$$ME = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n |Q_c - Q_o| \quad (11)$$

$$MRE = \max \left(\frac{Q_c - Q_o}{Q_o} \right) * 100 \quad (12)$$

$$\sigma = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{Q_{oi}}{Q_{ci}} \quad (13)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n |Q_c - Q_o|^2} \quad (14)$$

که در آن‌ها، Q_c و Q_o به‌ترتیب مقادیر دبی عبوری از سرریز مشاهداتی و محاسباتی است.

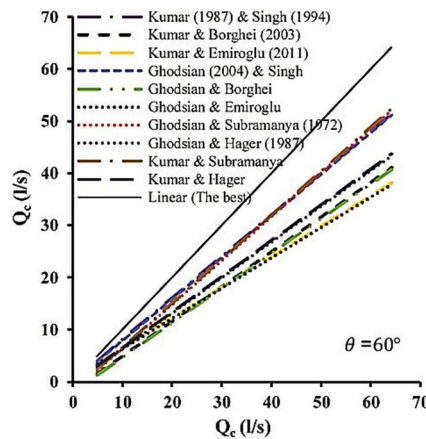
اما رابطه کلی ۱۷ که برای هر دو تیپ مقطع با زوایای رأس ۶۰ و ۹۰ درجه قابل کاربرد است با تجمیع داده‌های آزمایشگاهی و انجام محاسبات، به صورت زیر ارائه می‌گردد:

$$C_{de} = 0.3777 + 0.0366Fr_1^{1.292} + 0.3863\left(\frac{\bar{w}}{y_1}\right)^{1.17} + 0.0692\left(\frac{L}{y_1}\right)^{0.525} \quad (17)$$

$$C_{de} = 0.4243 + 0.0327Fr_1^{1.299} \quad (16)$$

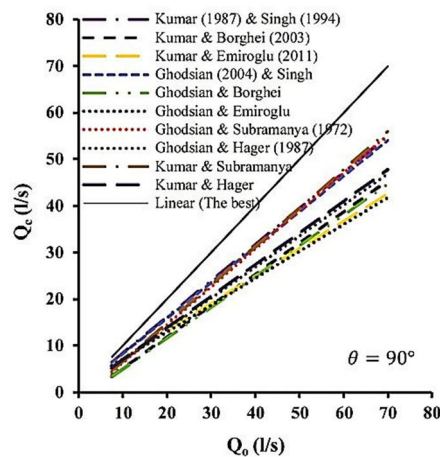
$$+ 0.3762\left(\frac{\bar{w}}{y_1}\right)^{1.18} + 0.0454\left(\frac{L}{y_1}\right)^{0.479}$$

لازم به توضیح است که بررسی نتایج نشان داد که استفاده از پارامتر (L/B) تأثیر زیادی در کاهش خطا ندارد و در نتیجه از روابط فوق حذف گردید. نمودارهای شکل ۵ و ۶ مقایسه مقادیر ضرایب دبی و دبی به دست آمده از روابط اخیر با نتایج آزمایشگاهی برای هر یک از مقاطع سرریز مرکب را نشان می‌دهد.



شکل ۳- تغییرات دبی مشاهداتی در مقابل محاسباتی به روش جمع خطی با استفاده از روابط پژوهشگران ($\theta = 60^\circ$).

Figure 3. Comparison of observed and computed discharge in the computational linear procedure using researchers relations ($\theta = 60^\circ$).



شکل ۴- تغییرات دبی مشاهداتی در مقابل محاسباتی به روش جمع خطی با استفاده از روابط پژوهشگران ($\theta = 90^\circ$).

Figure 4. Comparison of observed and computed discharge in the computational linear procedure using researchers relations ($\theta = 90^\circ$).

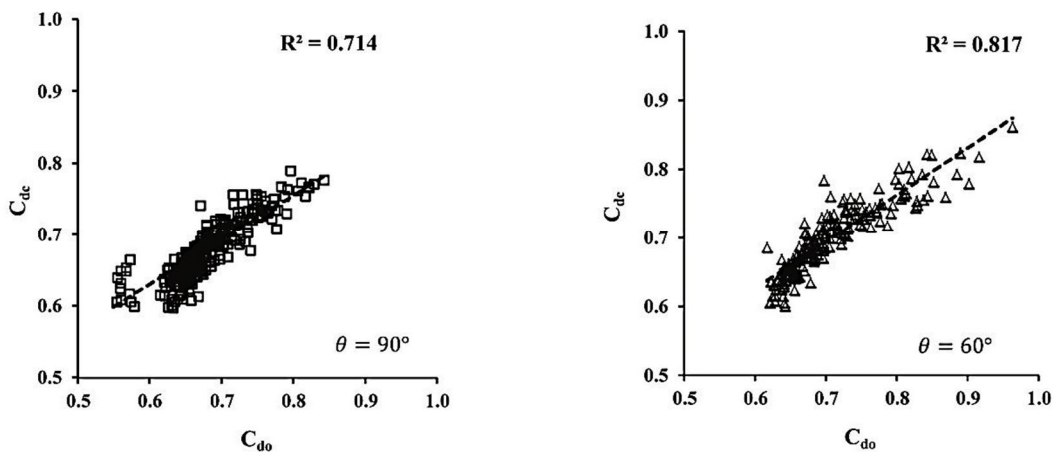
جدول ۴- مقادیر درصد میانگین مطلق خطا (MAPE) بر اساس روش اول پژوهش.

Table 4. Mean absolute percentage error based on the first method research.

		اسامی محققین به همراه خطاهای نسبی براساس روش اول (برحسب درصد) (percentage in) approach first on based errors relative with Authors										سرریز مرکب
سرریز مرکب	اسامی محققین	34.1	25.2	39.15	42.2	20.9	32.9	24.11	38.04	41.08	19.8	60°
سرریز 90°	Ghodsian & Hager	32.75	24.85	37.4	39.5	21.7	31.5	23.6	36.1	38	20.4	90°
سرریز 60°	Ghodsian & Hager	34.1	25.2	39.15	42.2	20.9	32.9	24.11	38.04	41.08	19.8	60°
	Ghodsian & Subramanya											
	Ghodsian & Emiroglu											
	Ghodsian & Borghei											
	Ghodsian & Singh											
	Kumar & Hager											
	Kumar & Subramanya											
	Kumar & Emiroglu											
	Kumar & Borghei											
	Kumar & Singh											
	Kumar & Singh											
	Compound Weir											

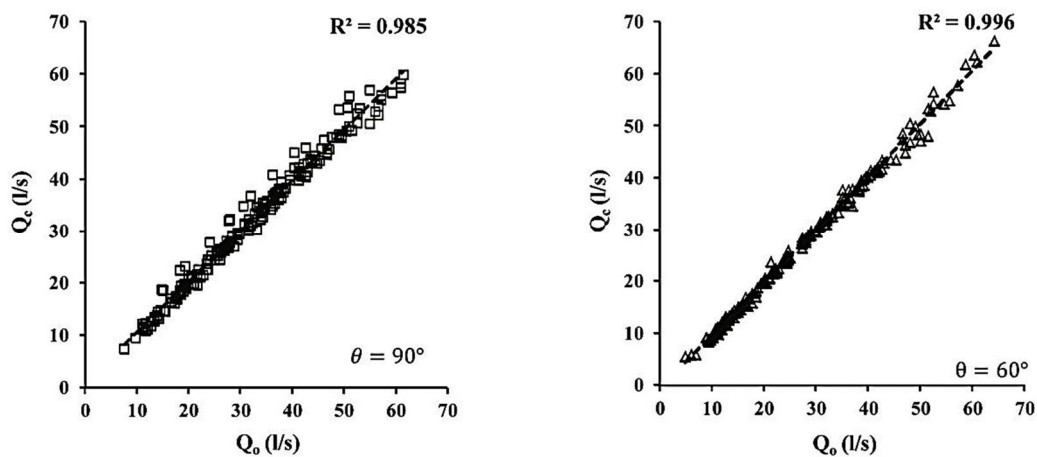
میزان تأثیر پارامترهای Fr_1 ، $\frac{L}{y_1}$ و $\frac{\bar{w}}{y_1}$ بر ضریب دبی که برای هر دو مقطع سرریز مورد مطالعه ارائه گردیده، نمودارهای شکل ۸ ترسیم شدند. همان‌گونه که در این نمودارها ملاحظه می‌شود ضریب دبی تابعی از هر سه پارامتر مذکور است.

نمودارهای شکل ۷ مقایسه مقادیر ضرایب دبی و دبی به‌دست آمده از روابط اخیر با نتایج آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. بررسی‌ها بیانگر آن است که استفاده از این رابطه کلی مقادیر خطا را برای مقطع مرکب با زاویه رأس ۶۰ درجه کمی افزایش و در دیگر مقطع کاهش داده است. به‌منظور بررسی



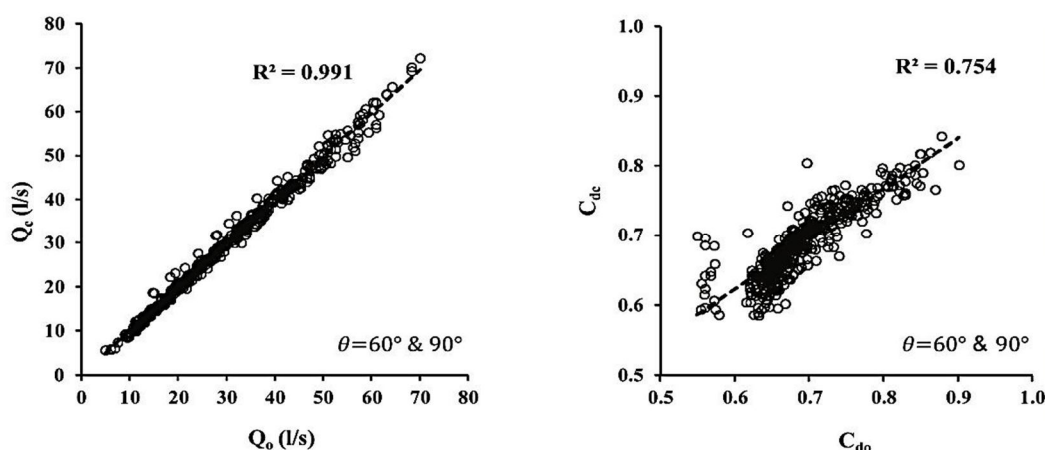
شکل ۵- مقایسه ضریب دبی محاسباتی و مشاهداتی برای دو تیپ مقطع.

Figure 5. Comparison of observed and computed coefficient discharge for two sections.



شکل ۶- مقایسه دبی محاسباتی و مشاهداتی برای دو تیپ مقطع.

Figure 6. Comparison of observed and computed discharge for two sections.



شکل ۷- مقایسه ضریب دبی و دبی براساس رابطه ۱۷ با مقادیر مشاهداتی.

Figure 7. Comparison of observed and computed coefficient discharge and discharge based on (17).

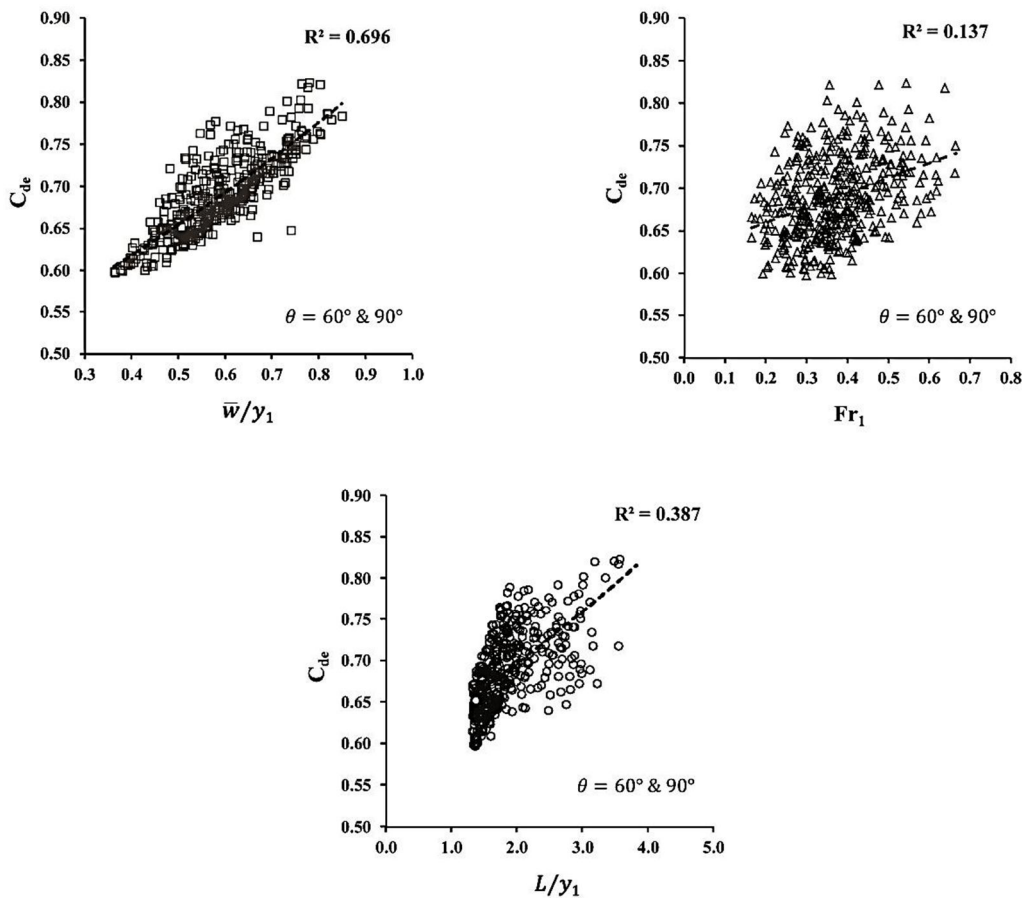
چشمگیر درصد خطای متوسط شده و می‌تواند در تخمین مقدار دبی عبوری از این نوع سرریز مفید باشد. از طرفی با توجه به بررسی مقادیر انواع آماره‌های خطای رابطه ۱۷ که برای هر دو سرریز مرکب با زوایای رأس مثلث ۶۰ و ۹۰ درجه پیشنهاد شده است، ملاحظه می‌شود پارامترهای نام‌برده نسبت به روابط ۱۵ و ۱۶ تغییر چندانی نداشته و با دقت مناسب جهت محاسبه دبی عبوری از سرریز قابل کاربرد است.

در جدول ۵ مقادیر انواع خطاها برای روابط پیشنهادی تعیین ضریب دبی سرریزهای جانبی لبه‌تیز مرکب مثلثی- مستطیلی با زوایای ۶۰ و ۹۰ درجه براساس روش دوم پژوهش به‌منظور ارزیابی بیش‌تر ارائه شده است. با بررسی دقیق پارامترهای آماری جدول ۵ ملاحظه می‌شود هر سه رابطه مقادیر دبی عبوری از سرریز را با دقت قابل‌قبولی برآورد نموده و همبستگی مناسبی نیز بین مقادیر محاسباتی و مشاهداتی وجود دارد. به‌عبارتی به‌کارگیری روش دوم سبب کاهش

جدول ۵- مقادیر انواع آماره‌های خطای دبی محاسباتی سرریز جانبی مرکب.

Table 5. Computational error statistics for compound side weir discharge.

روابط پیشنهادی Proposed relations			خطاها Errors
(17)	(16)	(15)	
3.16	3.34	2.88	MAPE (%)
-5.03	5.16	4.38	ME (%)
11.2	10.3	6.9	MRE (%)
0.00131	0.00149	0.00094	RMSE
0.991	0.985	0.996	R ²
0.999	1.003	0.996	$\sigma = (Q_o/Q_c)_{\text{mean}}$



شکل ۸- نمودارهای ضریب دبی در مقابل پارامترهای Fr_1 ، $\frac{L}{y_1}$ و $\frac{\bar{w}}{y_1}$ براساس روش دوم تحقیق.

Figure. 8. Charts discharge coefficient in the parameters Fr_1 , $\frac{L}{y_1}$ and $\frac{\bar{w}}{y_1}$ based on the second method research.

نتیجه گیری

گردید. در روش نخست سرریز مرکب به دو مقطع مثلثی و مستطیلی تقسیم شده و پس از محاسبه دبی عبوری از هر کدام از مقاطع با استفاده از ضرایب دبی سرریزهای ساده که توسط پژوهشگران در گذشته ارائه گردیده دبی کل تعیین شد. نتایج این روش نشان داد که به کارگیری روابط موجود برآورد ضریب دبی سرریزهای جانبی لبه تیز ساده، در سرریزهای مرکب کارایی لازم را نداشته و مقدار دبی جریان عبوری از سرریز جانبی مرکب را کم تر از مقادیر واقعی برآورد می کنند. اما در روش دوم پژوهش، مقطع سرریز مرکب با یک سرریز مستطیلی به ارتفاع (\bar{w}) معادل و یک ضریب دبی متوسط برای کل مقطع مرکب

در این مطالعه، ۲۶ مقطع سرریز جانبی لبه تیز مرکب متشکل از دو مقطع مثلثی در پایین و مستطیلی در بالا و با مشخصات هندسی مختلف طراحی و مورد بررسی قرار گرفت. بر پایه تحلیل ابعادی، روابطی ساده و با دقت مناسب جهت محاسبه ضریب دبی در سرریز جانبی لبه تیز مرکب با زوایای رأس ۶۰ و ۹۰ درجه ارائه شد. مقدار دبی عبوری از سرریز مرکب به دو روش استفاده از روابط ضریب دبی مقاطع سرریز جانبی لبه تیز ساده پژوهشگران و همچنین به کارگیری یک ضریب دبی متوسط برای کل مقطع محاسبه و با داده های آزمایشگاهی مقایسه

داد ضریب دبی در سرریزهای جانبی لبه‌تیز مرکب مثلثی - مستطیلی در روش به‌کار گرفته‌شده، تابعی از سه پارامتر بدون بعد عدد فرود جریان در بالادست سرریز (F_{r1})، نسبت ارتفاع وزنی تاج سرریز به عمق جریان در بالادست سرریز ($\frac{\bar{w}}{y_1}$) و نسبت طول سرریز به عمق جریان در بالادست سرریز ($\frac{L}{y_1}$) است.

پیشنهاد شد. بررسی انواع آماره‌های خطا شامل درصد میانگین مطلق خطا (MAPE) متوسط خطا (ME)، حداکثر خطای نسبی (MRE)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) حداکثر نسبت دبی واقعی به محاسباتی (σ) و ضریب همبستگی برای روابط پیشنهادی تعیین و نشان داد همپوشانی مناسبی را با نتایج آزمایشگاهی دارند. همچنین بررسی نتایج نشان

منابع

1. Ameri, M., Ahmadi, A., and Dehghani, A.A. 2013. Discharge coefficient for compound rectangular sharp crested side weirs in subcritical flow. 1th Int. Conf. on Irrigation and water structures, Gorgan. (In Persian)
2. Borghei, S.M., Jalili, M.R., and Ghodsian, M. 1999. Discharge coefficient for sharp crested side weirs in subcritical flow. J. Hydraul. Eng. ASCE. 125: 10. 1051-1056.
3. Borghei, S.M., Jalili, M.R., and Ghodsian, M. 2003. Discharge coefficient for sharp-crested side weirs in subcritical flow. Water Marit. Eng. 156: 2. 185-191.
4. Bos, M.G., ed. (1989). Discharge measurement structures. International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI) Publication 20, Wageningen, the Netherlands.
5. Cheong, H. 1991. Discharge coefficient of lateral diversion from trapezoidal channel. J. Irr. Drain. Eng. ASCE. 117: 4. 461-475.
6. De Marchi, G. 1934. Essay on the performance of lateral weirs. L Energia Electrica Milano. 11: 11. 849-860.
7. El-Khashab, A.M.M. 1975. Hydraulics of flow over side weirs. Ph.D. thesis, England, University of Southampton.
8. Emiroglu, M.E., Agaccioglu, H., and Kaya, N. 2011. Discharging capacity of rectangular side weirs in straight open channels. Flow Meas. Instrum. 22: 319-330.
9. French, R.H. 1986. Open channel hydraulics, McGraw-Hill, New York.
10. Ghodsian, M. 1997. Elementary discharge coefficient for rectangular side weir. Proceeding of 4th Int. Conf. on Civil Engineering, Tehran, Pp: 36-42.
11. Ghodsian, M. 2004. Flow over Triangular Side Weir. Scientia Iranica, 11: 1. 114-120.
12. Hager, W.H. 1987. Lateral outflow of side weirs. J. Hydraul. Eng. ASCE. 113: 4. 491-504.
13. Henderson, F.M. 1966. Open Channel Flow. Macmillan, New York, N.Y., USA.
14. Jan, C.D., Chang, C.D., and Lee, M.H. 2006. Discussion Design and calibration of a compound sharp-crested weir. J. Hydraul. Eng. ASCE. 132: 8. 868-872.
15. Kumar, C.P., and Pathak, S.K. 1987. Triangular side weirs. J. Irrig. Drain. Eng. ASCE. 113: 1. 98-105.
16. Martinez, J., Recca, J., Morillas, M.T., and Lopez, J.G. 2005. Design and calibration of a compound sharp-crested weir. J. Hydraul. Eng. ASCE. 131: 2. 112-116.
17. Piratheepan, M., Winston, N.E.F., and Pathirana, K.P.P. 2006. Discharge measurements in open channels using compound sharp-crested weirs. J. Ins. Eng. Sri Lanka. No. 03, 31p.
18. RangaRaju, K.G., Parasad, B., and Gupta, S.K. 1979. Side weir in rectangular channel. J. Hydraul. Eng. ASCE. 105: 5. 547-554.
19. Singh, R., Manivannan, D., and Satyanarayana, T. 1994. Discharge coefficient of rectangular side weirs. J. Irr. Drain. Eng. ASCE. 120: 4. 814-819.
20. Subramanya, K., and Awasthy, S.C. 1972. Spatially varied flow over side weirs. J. Hydraul. Eng. ASCE. 98: 1. 1-10.

21. Swamee, P.K., Pathak, S.K., Mohan, M., Agrawal, S.K., and Ali, M.S. 1994. Subcritical flow over rectangular side weir. *J. Irr. Drain. Eng. ASCE*. 120: 1. 212-217.
22. United States Bureau of Reclamation (USBR). 1963. Compound weir study, Hydraulic Laboratory Report No. Hyd. 505: 34.
23. Zahiri, A., Azamathulla, H.Md., and Bagheri, S.M. 2013. Discharge coefficient for compound sharp crested side weirs in subcritical flow conditions. *J. Hydrol.* 480: 162.



Determination of discharge coefficient of compound triangular - rectangular sharp crested side weirs

***M. Ameri¹, A. Ahmadi² and A.A. Dehghani³**

¹Ph.D. Student, Dept. of Civil Engineering, University of Shahrood, ²Associate Prof., Dept. of Civil Engineering, University of Shahrood, ³Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Received: 11/05/2014; Accepted: 04/08/2015

Abstract

Background and Objectives: Sharp crested side weirs are one of the most common hydraulic structures used for flow diversion and control in irrigation, drainage networks and waste-water channels. Simple side weirs generally have some limitations in flow escape and measurement face with relatively heavy flows from the main channel. The use of combined side weir is one way to solve this problem. Few studies have conducted flow hydraulics in combined side weirs. For this reason, in this study, compound rectangular-triangular sharp crested side weirs were studied experimentally in subcritical flow conditions.

Materials and Methods: Experiments were carried out in the Hydraulic Laboratory of Islamic Azad University Shahrood Branch, Shahrood, Iran. The compound side weir sections were designed to include all geometric conditions. In this study, two different theoretical approaches have been used for estimating the discharge coefficient of compound sharp-crested side weirs. The first approach is dividing the compound sharp-crested weir section in three area including two rectangular sections and one triangular section. The total outflow discharge is established by linearly combining discharge relations of three parts. In this approach the discharge coefficient for each parts of the side weir is calculated using different formulas of De Marchi discharge coefficient for simple triangular and rectangular side weirs. The second approach for computing discharge over the compound sharp-crested weir is based on the definition of equivalent rectangular weir with a crest weighted height (\bar{w}). To have a numerical measure for the best fit equations and its ability in terms of representing the agreement between actual and computed values of discharge coefficient, The mean absolute percentage errors (MAPE), the mean overall errors (ME), the maximum relative errors (MRE), Root mean square error (RMSE) and the mean value of measured to estimated overflow discharge ratios (σ) were used.

Results: It is found that the existing formulae for discharge coefficient in simple rectangular sharp-crested side weirs had large uncertainties and considerably under-predicted the discharge coefficients. Using a nonlinear regression model, a dimensionless relationship has been presented for prediction of the discharge coefficient in rectangular compound sharp-crested side weirs in subcritical flow. The second way in which the crest of compound weir was replaced with the crest weighted height (\bar{w}) could be useful to estimate overflow.

Conclusion: Finally, using dimensional analysis, parameters affecting the discharge coefficient of a compound side weir are a function of the upstream Froude number (Fr_1), the ratio of weighted crest height of the weir to upstream water depth (\bar{w}/y_1) and the ratio of weir length to upstream water depth (L/y_1) and a relationship for estimating the discharge coefficient was proposed. Comparison of results by using proposed equation with experimental results, shows high accuracy (RMSE=0.00131 and $R^2=0.991$) in estimation of diverted discharge through compound side weir.

Keywords: The crest weighted height, Dimensional analysis, Linear combination, Side weir, Subcritical flow

* Corresponding Author; Email: m49_ameri@yahoo.com