



## محاسبه بده سرریز جانبی ذوزنقه‌ای در رژیم جریان زیر بحرانی با استفاده از تئوری سرریز معمولی

صالح ریاحی<sup>۱</sup> - علیرضا وطن‌خواه<sup>۲\*</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۶/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۰/۱۵

### چکیده

سرریز جانبی به عنوان یک سازه کنترل و اندازه‌گیری جریان به صورت گسترده در زمینه‌هایی نظیر مهندسی هیدرولیک، آبیاری و محیط زیست مورد استفاده قرار می‌گیرد. جریان روی سرریز جانبی به عنوان یکی از مسائل جریان متغیر مکانی با کاهش بده شناخته شده و با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی، مدل‌سازی عددی و تحلیل نظری بررسی می‌گردد. تحقیق حاضر به بررسی خصوصیات جریان روی سرریز جانبی ذوزنقه‌ای واقع در یک کانال اصلی با مقطع مستطیلی و در شرایط رژیم جریان زیر بحرانی می‌پردازد. پروفیل جریان بر روی سرریز جانبی و ضریب بده جریان با استفاده از نتایج آزمایشگاهی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. با توجه به نتایج این تحقیق و توصیه محققین پیشین، بهترین مقطع برای اندازه‌گیری پروفیل جریان در امتداد محور مرکزی کانال معرفی شده است. مشخص گردید که ضریب بده سرریز جانبی ذوزنقه‌ای به عدد فرود جریان بالادست، نسبت ارتفاع سرریز به عمق جریان، نسبت ارتفاع روگذری به عمق جریان و شیب جداره سرریز بستگی دارد. در این تحقیق برای ارزیابی ضریب بده و ارائه معادله بده برای سرریز جانبی، از تئوری سرریز معمولی استفاده شده است. برای این منظور از سه عمق مشخصه به عنوان هد سرریز استفاده شد و بر اساس هر یک از این اعماق رابطه‌ای برای ضریب بده ارائه گردید. مقایسه نتایج با داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که عمق متوسط جریان بهترین جواب را برای ارزیابی ضریب بده ارائه می‌کند. متوسط خطای برآورد ضریب بده با استفاده از عمق متوسط جریان برابر با ۲/۶ درصد می‌باشد. لذا می‌توان این روش را برای مقاصد عملی پیشنهاد نمود.

**واژه‌های کلیدی:** سرریز جانبی ذوزنقه‌ای، پروفیل سطح آب، ضریب بده، سرریز معمولی، جریان متغیر مکانی، سازه کنترل

### مقدمه

قابل توجهی می‌نماید. برآورد دقیق بده باعث تحویل و توزیع عادلانه آب در شبکه‌ها می‌گردد. برعکس برآورد کم دقت و طراحی هیدرولیکی نامناسب سازه، باعث ایجاد خسارت در پایین دست سازه شده و یا این که توانایی سازه در انتقال جریان مازاد کانال اصلی را کاهش می‌دهد.

با توجه به مقاطع گوناگون سرریز جانبی و کانال اصلی، مطالعات گسترده‌ای در زمینه سرریزهای جانبی صورت گرفته است. بیشتر مطالعات انجام شده توسط محققین بر روی سرریز جانبی با مقطع مستطیلی بوده است. از جمله این تحقیق‌ها می‌توان به مطالعات یوتج (۲۷)، سابرمانیا و اوستی (۲۲)، رانگاراچو و همکاران (۱۸)، هگر (۱۲)، یوماز و اسمیت (۲۳)، سوامی و همکاران (۲۱)، ساین و همکاران (۱۹)، آغاسی اقلو و یاکسل (۱)، موسلاو (۱۵، ۱۶)، ونتولی (۲۶)، امیراقلو و همکاران (۹)، کاسترو-ارگاز و هگر (۴)، برقی همکاران (۲)، قدسیان (۱۰)، هنر و کشاورزی (۱۳) و وطن‌خواه (۲۵) اشاره نمود. دمارچی (۷)

در شبکه‌های انتقال و توزیع آب و در مجاری روباز، از سازه‌های گوناگون برای کنترل سطح آب و انتقال جریان‌های مازاد استفاده می‌گردد. یکی از سازه‌هایی که به طور گسترده برای کنترل جریان استفاده می‌شود سرریز جانبی می‌باشد. سرریز جانبی معمولاً شامل یک سرریز اصلی و یک کانال هدایت‌کننده می‌باشد که در طول کانال اصلی و به موازات آن احداث می‌گردد. در صورتی که ضریب بده سرریزهای جانبی با دقت قابل قبولی برآورد شود به طراحی ابعاد سرریز جانبی از جمله طول سرریز، ارتفاع و شیب جداره آن کمک

۱ - دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس  
۲ - دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران  
\* - نویسنده مسئول  
(Email: arvatan@ut.ac.ir)

انجام گردیده است. آزمایش‌ها در فلومی به طول ۱۲ متر، عرض ۲۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر که روی یک شاسی به ارتفاع ۱/۶ متر قرار گرفته است انجام شده است. جنس فلوم از فولاد و پلکسی گلاس بوده است. کانال جانبی از جنس پلکسی‌گلاس بوده و دارای طول ۶ متر، عرض ۰/۲۵ و ارتفاع ۱ متر بوده است که به موازات کانال اصلی نصب شده است. شمای کلی از فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق در شکل ۱ نشان داده شده است. سرریزهای جانبی مورد آزمایش در فاصله ۶ متری از ابتدای کانال قرار گرفته و به گونه‌ای نصب گردید که امکان جابجایی راحت سرریز را به خوبی فراهم نماید. به منظور تامین عمق آب مورد نیاز در کانال از یک دریچه انتهایی<sup>۱</sup> به عرض ۲۵ سانتی‌متر استفاده شد که قابلیت نگهداشت سطح جریان در رقوم دلخواه را به راحتی فراهم می‌نمود. پروفیل جریان روی سرریز جانبی در سه مقطع طولی از کانال اصلی (نزدیک سرریز، وسط کانال و چسبیده به دیواره بیرونی کانال) شبکه‌بندی شده و با استفاده از یک عمق سنج با دقت  $\pm 0/1$  میلی‌متر اندازه‌گیری شد. بده عبوری از سرریز جانبی و کانال اصلی به ترتیب توسط یک سرریز مثلی و یک سرریز مستطیلی که توسط یک فلومتر مغناطیسی با دقت  $\pm 0/5$  درصد دبی کالیبره شده‌اند، اندازه‌گیری شد.

برای انجام آزمایش‌ها، سرریز جانبی دوزنقه‌ای با عرض کف ۲۰ سانتی‌متر و با سه شیب جانبی ۱، ۶۷/۰ و ۵/۰ (یک قائم به z افقی)، با سه ارتفاع ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر از کف کانال نصب گردیده و مورد آزمایش قرار گرفت. در مجموع ۱۲۱ آزمایش بر روی سرریز جانبی دوزنقه‌ای انجام شد. مشخصات و محدوده پارامترهای هیدرولیکی این آزمایشات در جدول ۱ ارائه شده است.

### معادلات حاکم

#### اصول نظری استفاده از سرریز دوزنقه‌ای لبه‌تیز معمولی

در شکل ۲ مقطع یک سرریز دوزنقه‌ای نشان داده شده است. سرریز دوزنقه‌ای را می‌توان ترکیبی از یک سرریز مستطیلی و یک سرریز مثلی دانست. رابطه بده-اشل برای سرریز مستطیلی و مثلی به ترتیب مطابق رابطه ۳ و ۴ می‌باشد.

$$Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2gb} h_1^{\frac{3}{2}} \quad (3)$$

$$Q = \frac{8}{15} C_d \sqrt{2g} \tan \frac{\theta}{2} h_1^{\frac{5}{2}} \quad (4)$$

در این رابطه  $h_1$  معادل هد مشخصه جریان (هد-عمق مشخصه منهای ارتفاع سرریز) و  $\tan(\theta/2)$  برابر شیب جانبی دیوار یعنی z می‌باشد.

فرض نمود که بده واحد طول سرریز جانبی برابر است با:

$$q = -\frac{dQ}{ds} = -\frac{dQ_s}{ds} = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} (y-p)^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

در این رابطه Q بده در کانال اصلی، s فاصله از ابتدای سرریز جانبی، q بده جانبی در طول سرریز، g شتاب ثقل، p ارتفاع نصب سرریز نسبت به کف کانال، y عمق جریان در فاصله s از ابتدای سرریز و  $C_d$  ضریب بده سرریز جانبی مستطیلی است. الخشاب و اسمیت (۸) با استفاده از تحلیل ابعادی ضریب  $C_d$  را تابعی از پارامترهای بی‌بعد زیر بیان نمود.

$$C_d = f\left(Fr_1, \frac{L}{B}, \frac{L}{h_1}, \frac{P}{h_1}\right) \quad (2)$$

در این رابطه  $Fr_1$  عدد فرود در مقطع بالادست سرریز جانبی، L طول سرریز جانبی، B عرض کانال اصلی و  $h_1$  عمق جریان در ابتدای سرریز جانبی و در محور مرکزی کانال است.

سوامی و همکاران (۲۰)، کومار و پاتاک (۱۴)، قدسیان (۱۱) و کوثر و اغاسی اقلو (۶) به بررسی ضریب بده و پروفیل جریان در سرریز جانبی مثلی پرداختند. چونگ (۵) به بررسی ضریب بده سرریز جانبی در کانال دوزنقه‌ای پرداخت، هم‌چنین وطن‌خواه (۲۴) به بررسی حل تحلیلی پروفیل سطح آب روی سرریز جانبی در کانال‌های دوزنقه‌ای و برای شرایط جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی پرداخت.

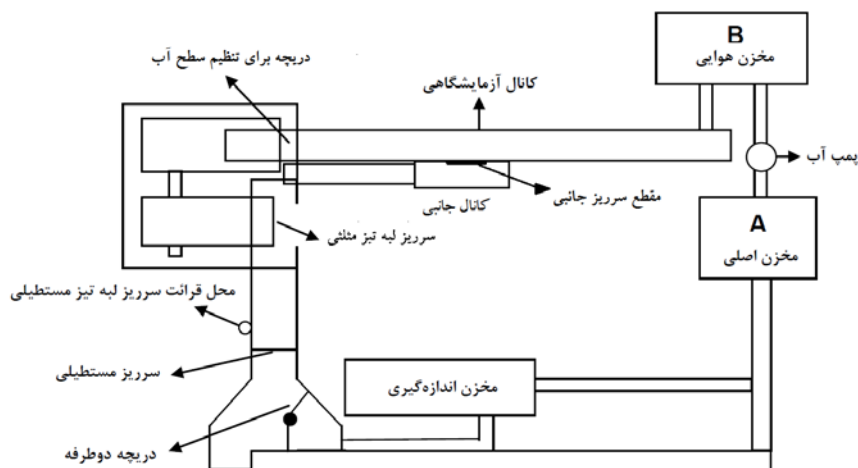
به نظر می‌رسد تنها تحقیق انجام شده در مورد سرریز جانبی با مقطع دوزنقه‌ای توسط رحیم‌پور و همکاران (۱۷) انجام شده باشد. در این تحقیق با بررسی جریان روی سرریزهای جانبی دوزنقه‌ای لبه‌تیز و خصوصیات هیدرولیکی این سرریزها معادله دیفرانسیل پروفیل سطح آب و ضریب دماچی مورد مطالعه قرار گرفته است.

در تحقیق حاضر با استفاده از روش تئوری سرریز معمولی و مطالعات آزمایشگاهی بهترین تخمین برای ضریب بده جریان در شرایط رژیم جریان زیربحرانی برای سرریز جانبی دوزنقه‌ای لبه‌تیز واقع در یک کانال مستطیلی به دست آمده است. برای این منظور از سه عمق مشخصه به عنوان عمق مبنای محاسبات (هد سرریز) استفاده شده است که بر اساس هر یک از این اعماق رابطه‌ای برای ضریب بده ارائه شده است. هم‌چنین خصوصیات جریان مانند تغییرات پروفیل طولی و عرضی سطح آب در مجاورت این نوع سرریزها و اثر پارامترهای مختلف، بوسیله ساخت مدل هیدرولیکی در آزمایشگاه مورد ارزیابی قرار گرفته است.

### مواد و روش‌ها

#### تجهیزات آزمایشگاهی

تحقیق حاضر در آزمایشگاه مرکزی هیدرولیک دانشگاه تهران



شکل ۱- شمایی از مجموعه آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق  
Figure 1- Definition sketch of laboratory setup used in this research

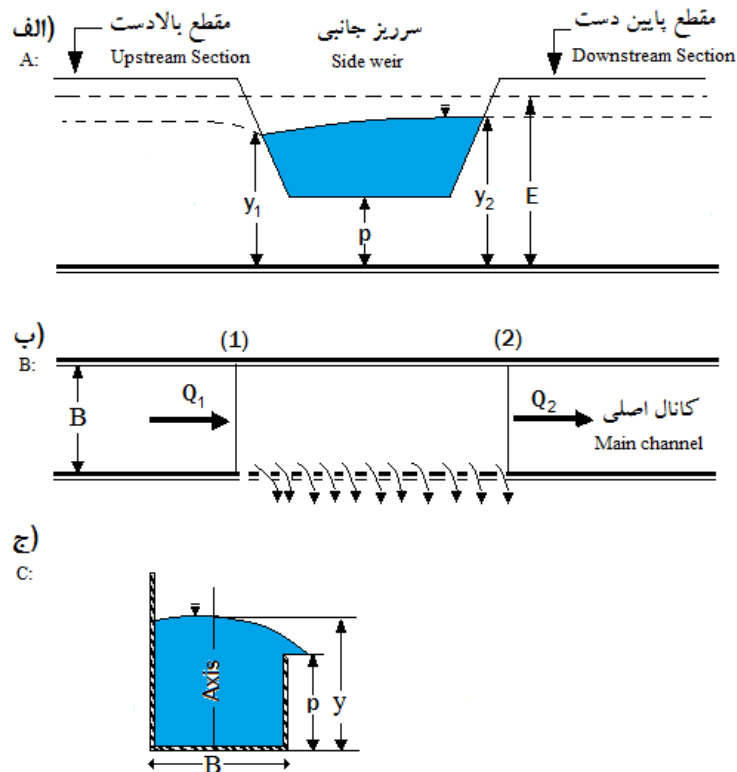
جدول ۱- خلاصه ای از مشخصات هیدرولیکی و آزمایشگاهی  
Table 1- Summary of hydraulic and experimental characteristics

محدوده تغییرات			خصوصیات هیدرولیکی و آزمایشگاهی
Range of variations			(Hydraulic characteristics)
1:0.5	1:0.67	1:1	شیب جانبی سرریز (Side slope)
33	27	61	تعداد آزمایشات (Number of experiments)
0.18-0.94	0.16-0.9	0.13-0.91	$Fr_1$
0.014-0.039	0.010-0.041	0.005-0.037	$Q_1$ (m <sup>3</sup> /s)
0.002-0.021	0.004-0.019	0.008-0.017	$Q_s$ (m <sup>3</sup> /s)
15-51	22-50	7-60	$Q_s/Q_1$ (%)
8.6-24.4	9.85-27.2	6.9-24.4	$y_1$ (cm)
9.7-25.3	11.1-28.8	7.43-24.86	$y_2$ (cm)
0.48-0.62	0.43-0.59	0.39-0.53	$C_d$

بهترین نتیجه انتخاب گردد. در این تحقیق، برای به دست آوردن ضریب بده سرریز جانبی از رابطه سرریز معمولی برای مقطع دوزنقه‌ای استفاده شده و کارائی و دقت استفاده از این روش مورد ارزیابی قرار گرفته است.

برای انجام محاسبات و ارائه اعماق مشخصه مورد استفاده در فرمول ۵، سه حالت برای عمق آب مرجع یعنی عمق ابتدای ورودی به سرریز  $y_1$  (Entrance)، عمق متوسط ابتدا و انتها  $(y_1+y_2)/2$  و عمق وسط سرریز  $y_{center}$  در نظر گرفته شده است و ضرایب بده متناظر با هر روش به دست آورده شده‌اند.

مبنای نظری استفاده از سرریز معمولی برای به دست آوردن ضریب بده سرریز جانبی بر این اساس است که از انحناى پروفیل سطح آب بر روی سرریز جانبی صرف‌نظر شده است. محققین مختلفی مانند کوثر و آغاسی‌اقلو (۶) و امیراقلو و همکاران (۹) از تئوری سرریز معمولی برای محاسبه بده جریان در سرریز جانبی استفاده نموده‌اند. نکته مهم در استفاده از معادله‌ی سرریز معمولی برای سرریز جانبی انتخاب هد آب مرجع می‌باشد. بدین منظور لازم است در این معادله روابط مختلفی برای هد آب (هد = عمق آب منهای ارتفاع سرریز) قرار داده شود و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه و



شکل ۲- الگوی جریان در سرریز جانبی دوزنقه‌ای در شرایط زیربحرانی: الف- مقطع طولی، ب- پلان و ج- برش عرضی

Figure 2- Flow pattern in trapezoidal side weir in subcritical flow condition. A: longitudinal section, B: plan, C: cross section.

روی سرریز جانبی از ۳ سانتی‌متر بیشتر است می‌توان از اثر کشش سطحی صرف‌نظر نمود (۳). همچنین با توجه به وجود جریان آزاد غیرقابل تراکم و ضخامت ناچیز لایه مرزی که ناشی از عدد رینولدز بالا (۱۸۲۴۸-۶۷۵۲۱) است، می‌توان از اثرات لزجت صرف‌نظر کرد. همچنین با توجه به ثابت بودن عرض و شیب طولی کانال از اثر پارامتر  $B$  و  $S_0$  صرف‌نظر شده است. در نهایت می‌توان گروه‌های بی‌بعد زیر را به عنوان پارامترهای موثر بر ضریب شدت جریان سرریز جانبی دوزنقه‌ای در نظر گرفت.

$$C_d = f \left\{ Fr_1, \frac{P}{y_1}, \frac{b}{T}, z \right\} \quad (7)$$

#### ارزیابی پروفیل‌های طولی و عرضی سطح آب

از آنجایی که آگاهی از اثرات سرریز جانبی بر عمق و پروفیل جریان می‌تواند در طراحی هیدرولیکی این سازه و کانال جانبی تاثیر زیادی داشته باشد به بررسی و تفسیر پروفیل‌های طولی و عرضی سطح آب در سرریز جانبی دوزنقه‌ای پرداخته می‌شود. بسته به عدد فرود جریان بالادست، اختلاف ارتفاع سطح آب در ابتدا و انتهای سرریز تغییر می‌نماید.

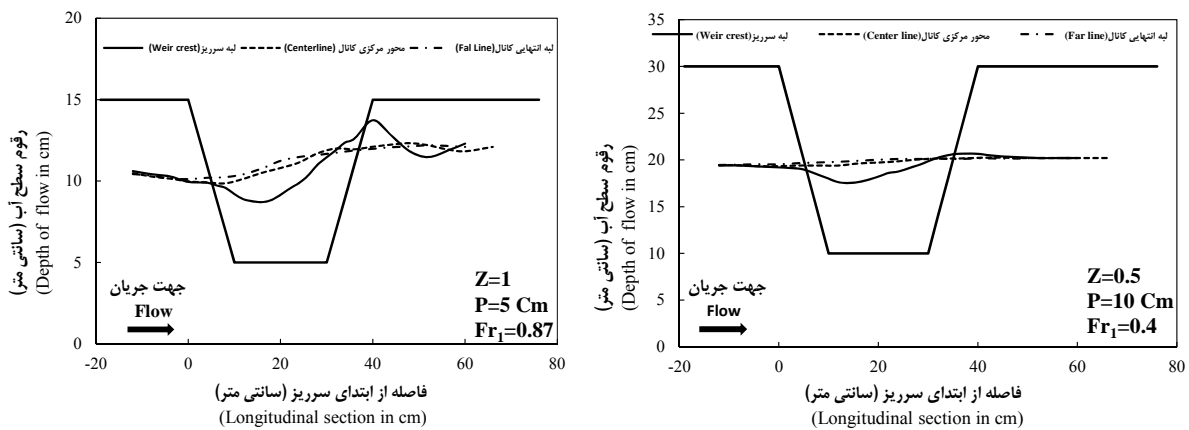
در نهایت بهترین عمق مرجع به منظور تخمین و پیش‌بینی بده در سرریزهای جانبی دوزنقه‌ای معرفی شده است.

#### نتایج و بحث

برای سرریز جانبی دوزنقه‌ای با شناسایی پارامترهای موثر بر جریان و با استفاده از تئوری تحلیل ابعادی باکینگهام اقدام به شناسایی پارامترهای بی‌بعد موثر بر ضریب بده شد. این پارامترها در رابطه ۶ ارائه شده است.

$$C_d = f \left( Fr_1, Re, We, \frac{y_2}{y_1}, \frac{P}{y_1}, \frac{B}{y_1}, \frac{b}{T}, \frac{V_2}{V_1}, S_0, z \right) \quad (6)$$

در این رابطه  $Fr_1$  عدد فرود در ابتدای سرریز،  $Re$  عدد رینولدز،  $We$  عدد وبر،  $P$  ارتفاع سرریز،  $T$  طول روگذری جریان که در سرریز دوزنقه‌ای برابر  $T=b+2zy$  است،  $b$  عرض سرریز،  $B$  عرض کانال اصلی،  $S_0$  شیب کف کانال،  $V_1$  و  $V_2$  به ترتیب سرعت در مقطع پایین‌دست و بالادست سرریز و  $z$  شیب جداره سرریز جانبی دوزنقه‌ای می‌باشد که در شکل ۲ نیز نشان داده شده‌اند. عدد رینولدز در این رابطه معرف اثر لزجت و عدد وبر معرف اثر کشش سطحی است. با توجه به این که در آزمایشات انجام شده حداقل عمق جریان



شکل ۳- تغییرات پروفیل طولی جریان در سه محور کانال

Figure 3- Changes in longitudinal profile in three axes of the channel

با افزایش عدد فرود شیب منحنی‌های عرضی افزایش پیدا می‌کند. در اعداد فرود پایین با توجه به این که نوسانات و تغییرات ناچیز است می‌توان از تغییرات صرف نظر کرد. به طور کلی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که پروفیل سطح آب در اطراف سرریز به میزان قابل توجهی به عدد فرود بستگی دارد.

#### تحلیل جریان بر اساس عمق $y_1$ (Entrance)

با جایگذاری هد سرریز  $y_1-P$  و سایر پارامترها در معادله ۵ میزان ضریب بده آزمایشگاهی به دست خواهد آمد. نتایج تغییرات  $C_d$  در مقابل  $Fr_1$  به ازای تغییرات  $P$  برای مقادیر ثابت  $Z$  در شکل ۵ ارائه شده است.

برای هر یک از مقادیر شیب جانبی  $Z$ ، با استفاده از رابطه سرریز معمولی ذوزنقه‌ای مقادیر ضریب بده محاسبه شده، و رابطه‌ای بر حسب پارامترهای موثر بی‌بعد بر آن‌ها برازش داده شده است. ابتدا رابطه‌های محاسبه شده برای هر شیب و سپس رابطه کلی ارائه شده است.

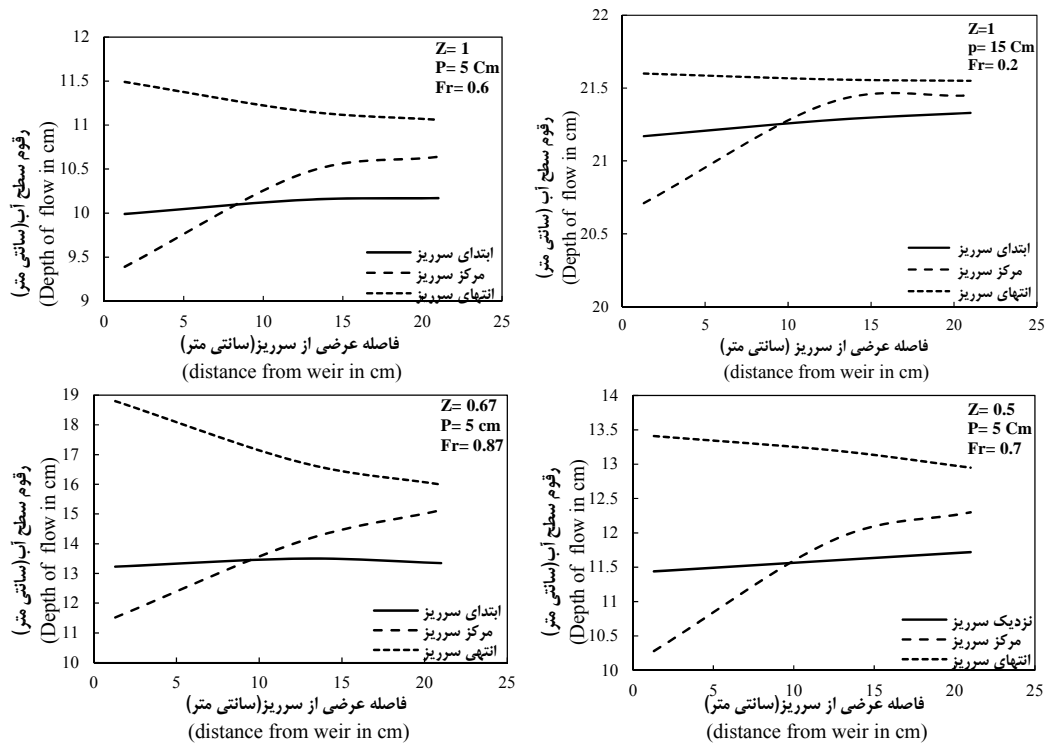
$$C_d = -0.002Fr_1^{0.38} - 0.11\left(\frac{b}{T}\right)^{0.7} + 0.23\left(\frac{P}{y_1}\right)^{-0.045} + 0.44 \quad Z = 1 \quad (8)$$

$$C_d = 0.029Fr_1^{1.48} + 0.22\left(\frac{b}{T}\right)^{0.67} - 0.05\left(\frac{P}{y_1}\right)^{1.41} + 0.6 \quad Z = 0.5 \quad (9)$$

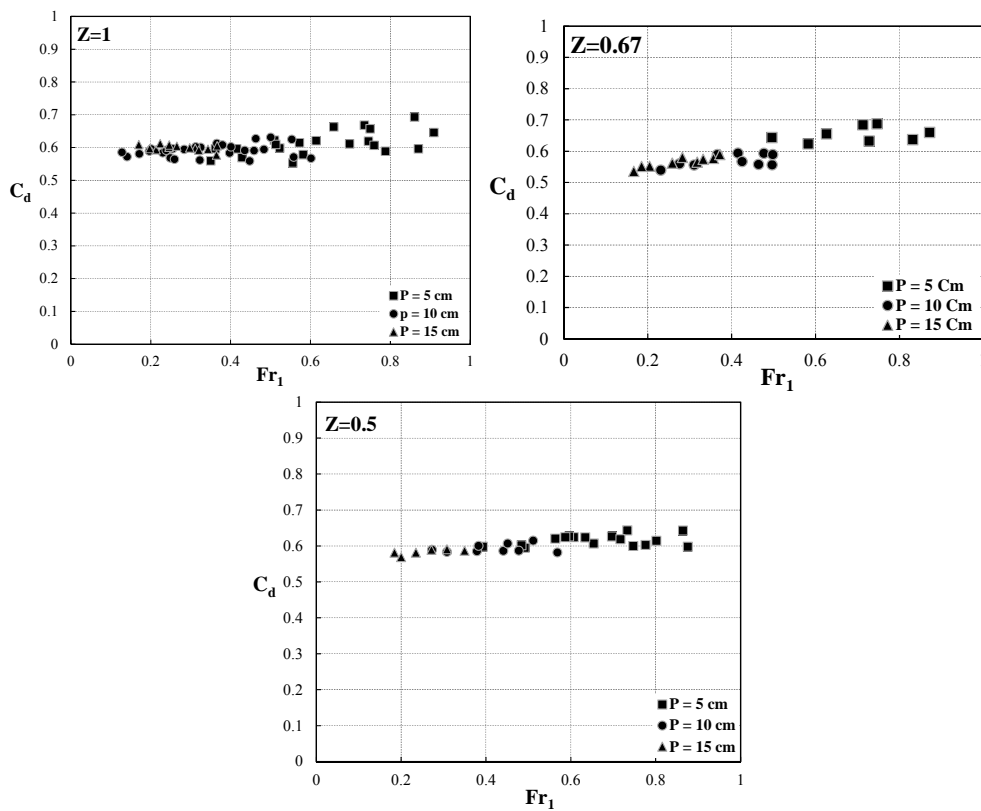
$$C_d = 0.106Fr_1^{1.8} + 0.04\left(\frac{b}{T}\right)^{-0.036} - 0.215\left(\frac{P}{y_1}\right)^{0.49} + 0.67 \quad Z = 0.67 \quad (10)$$

در اعداد فرود پایین این اختلاف کم و با افزایش عدد فرود جریان این مقدار نیز افزایش می‌یابد. در شکل ۳ دو سری از پروفیل‌های اندازه‌گیری شده جریان با عدد فرود متفاوت نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، در محور نزدیک سرریز سطح آب در ابتدا با یک افت روبرو شده که این افت ناشی از جدایی جریان در اثر ورود به سرریز می‌باشد، و پس از آن به تدریج شروع به افزایش می‌نماید. نتایج به دست آمده در تحقیق حاضر با نتایج ارائه شده توسط الخشاب (۸) و امیرالقلو و همکاران (۹) که در مورد سرریزهای جانبی لبه تیز مستطیلی انجام گرفته است، مطابقت دارد. با افزایش فاصله از سرریز از میزان تغییرات سطح آب کاسته می‌شود و پروفیل سطح آب انحنای ملایم‌تری پیدا می‌کند. این روند در تمامی سرریزهای دیگر نیز مشابه بوده و علت آن جریان‌های ثانویه ناشی از جریان‌های عرضی سرریز شونده می‌باشد. با توجه به شکل، نیمرخ سطح آب در نزدیکی ابتدای سرریز دارای انحنای زیادی بوده و در دورترین محور برداشت شده از سرریز دارای انحنای بسیار اندک بوده به گونه‌ای که در برخی آزمایشات به صورت افقی به دست آمده است. اما در محور کانال اندازه‌گیری‌ها قابل اعتماد بوده و اثر افت ناگهانی سطح آب بر آن ناچیز بوده است.

در شکل ۴ روند تغییرات نیمرخ عرضی جریان بر روی سرریز جانبی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود روند تغییرات پروفیل سطح آب در سه محور ابتدایی، مرکز و انتهایی سرریز در تمامی آزمایشات مشابه یکدیگر بوده است و تنها در شیب پروفیل سطح آب تشکیل شده متفاوت می‌باشند. در مقطع ابتدای سرریز، شیب جانبی کمی به دلیل اثرات ورودی سرریز، به سمت سرریز ایجاد شده و هر چه به سمت مرکز حرکت می‌کند شیب منحنی بیش‌تر شده به گونه‌ای که شیب در مقطع وسط بسیار بیش‌تر از ابتدای سرریز بوده است. در مقطع انتهایی شیب پروفیل معکوس شده و به سمت سرریز، پروفیل جریان با افزایش سطح مواجه خواهد شد.



شکل ۴- نیمرخ عرضی جریان در محدوده سرریز جانبی  
Figure 4- Cross water surface profile near the side weir



شکل ۵- تغییرات  $C_d$  در مقابل  $Fr_1$  به ازای تغییرات شیب جداره و ارتفاع سرریز  
Figure 5-  $C_d$  variations versus  $Fr_1$  in terms of side slope and weir height variations

میزان خطا نسبت به روابطی که برای هر شیب به صورت مجزا ارائه شده بود، افزایش می‌یابد.

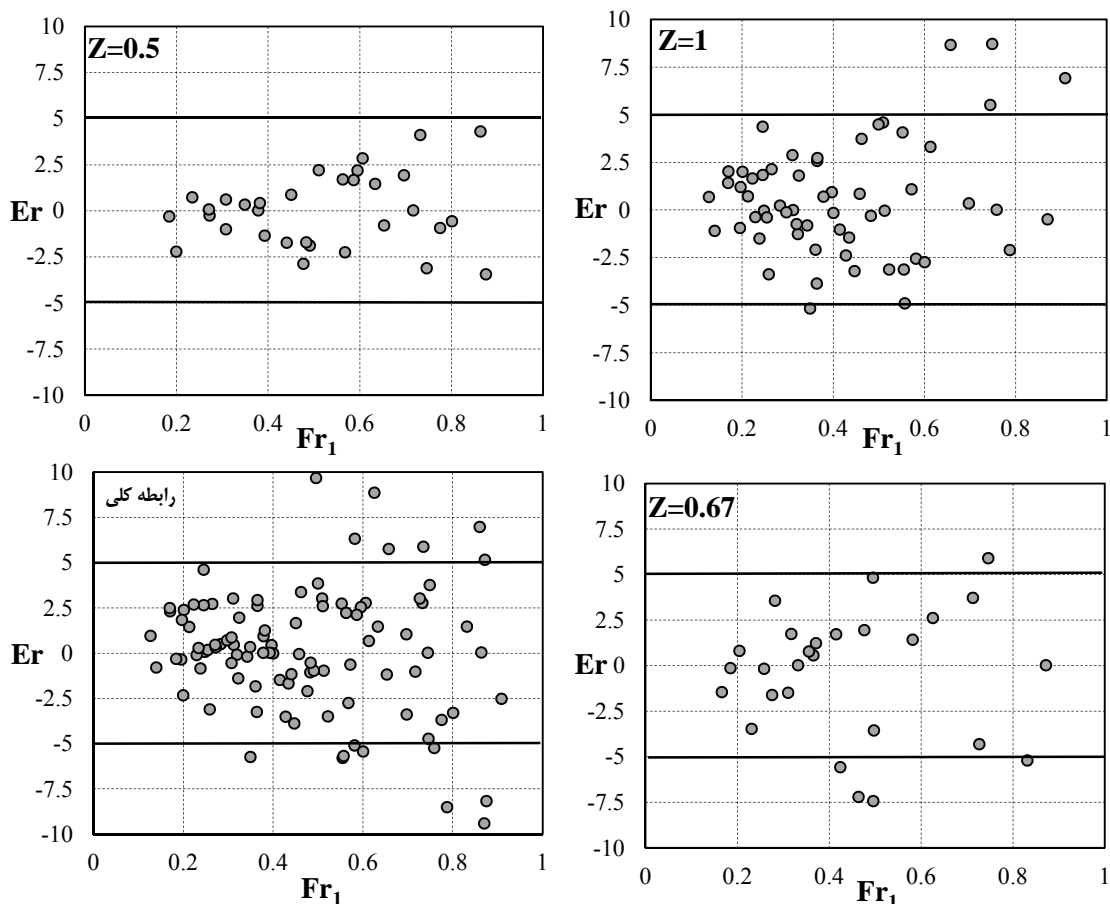
با توجه به این شکل می‌توان نتیجه‌گیری نمود که با افزایش عدد فرود جریان، میزان خطای معادلات افزایش یافته است، علت آن را می‌توان این گونه بیان نمود که با افزایش عدد فرود بر شدت تغییرات پروفیل سطح آب افزوده شده و در این حالت استفاده از فرض سرریز معمولی برای به دست آوردن ضریب بده، توام با افزایش خطا خواهد بود.

به طور مشابه برای اعماق مشخصه‌ی دیگر نظیر  $(y_1+y_2)/2$  و  $y_{center}$ ، محاسبات انجام گرفته و نتایج در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به جدول ۲ ملاحظه می‌شود که ضریب بده‌ای که بر اساس عمق متوسط جریان  $(y_1+y_2)/2$  به دست می‌آید دارای دقت بالاتری نسبت به سایر روابط می‌باشد.

برای شیب جانبی  $Z=1$  معادله دارای خطای متوسط ۲/۶ درصد و حداکثر خطای ۸/۷ درصد نسبت به داده‌های آزمایشگاهی بوده، همچنین برای  $Z=0.5$  خطای متوسط ۱/۶ درصد و حداکثر خطا ۴/۱ درصد و برای  $Z=0.67$  متوسط خطا ۲/۶ درصد و حداکثر آن ۵/۶ درصد است. رابطه کلی که می‌توان بر اساس شیب‌های جدار متفاوت و ارتفاع‌های متفاوت سرریز ارائه نمود، به صورت رابطه ۱۱ است. متوسط خطای این رابطه برابر ۲/۶ درصد بوده و دارای حداکثر خطایی معادل ۱۱/۵ درصد می‌باشد.

$$C_d = 0.085Fr_1^{3.16} - 0.053\left(\frac{b}{T}\right)^{1.4} - 0.032\left(\frac{P}{y_1}\right)^{1.04} + 0.18\left(\frac{Z}{1+Z}\right)^{1.09} + 0.55 \quad (11)$$

مقادیر خطای محاسباتی توسط معادلات ۸ تا ۱۱ در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود برای رابطه کلی



شکل ۶- مقادیر خطای معادلات ۸ تا ۱۱  
Figure 6- Error values of equations 8 - 11

جدول ۲- معادلات ارائه شده برای اعماق مشخصه متفاوت  
Table 2- Presented equations for different reference depths

عمق مشخصه Reference depth	شیب جداره Side slope	معادله Equation	متوسط خطا Average error	حداکثر خطا Maximum error
$y_1$	Z=1	$C_d = -0.002 F_r^{0.38} - 0.11 \left(\frac{b}{T}\right)^{0.7} + 0.23 \left(\frac{P}{y_1}\right)^{-0.045} + 0.44$	۲/۵۶	۸/۷
	Z=0.67	$C_d = 0.029 F_r^{1.48} + 0.22 \left(\frac{b}{T}\right)^{0.67} - 0.05 \left(\frac{P}{y_1}\right)^{1.41} + 0.6$	۲/۶	۵/۶
	Z=0.5	$C_d = 0.106 F_r^{1.8} + 0.04 \left(\frac{b}{T}\right)^{-0.036} - 0.215 \left(\frac{P}{y_1}\right)^{0.49} + 0.67$	۱/۵۵	۴/۳
	رابطه کلی	$C_d = 0.085 F_r^{3.16} - 0.053 \left(\frac{b}{T}\right)^{1.4} - 0.032 \left(\frac{P}{y_1}\right)^{1.04} + 0.18 \left(\frac{Z}{1+Z}\right)^{1.09} + 0.55$	۲/۷	۱۱/۴۵
$(y_1+y_2)/2$	Z=1	$C_d = -0.15 F_r^{1.05} - 0.017 \left(\frac{b}{T}\right)^{0.58} - 0.059 \left(\frac{P}{y_1}\right)^{0.98} + 0.66$	۲/۱۴	۶
	Z=0.67	$C_d = -0.016 F_r^{1.34} + 0.07 \left(\frac{b}{T}\right)^{0.18} - 0.05 \left(\frac{P}{y_1}\right)^{0.21} + 0.51$	۲/۰۲	۵/۲
	Z=0.5	$C_d = -0.19 F_r^{2.96} + 12 \left(\frac{b}{T}\right)^{1.05} - 0.11 \left(\frac{P}{y_1}\right)^{0.89} + 0.56$	۱/۷۷	۴/۱
	رابطه کلی	$C_d = -0.15 F_r^{1.3} - 0.019 \left(\frac{b}{T}\right)^{1.6} - 1.59 \left(\frac{P}{y_1}\right)^{0.35} + 0.33 \left(\frac{Z}{1+Z}\right)^{3.75} + 0.71$	۲/۶	۱۰/۴۹
$y_{center}$	Z=1	$C_d = -0.1 F_r^{0.37} + 0.55 \left(\frac{b}{T}\right)^{-0.17} + 0.04 \left(\frac{P}{y_1}\right)^{1.85} + 0.015$	۲/۶	۱۴/۹
	Z=0.67	$C_d = -0.082 F_r^{1.36} + 0.2 \left(\frac{b}{T}\right)^{0.48} - 0.04 \left(\frac{P}{y_1}\right)^2 + 0.37$	۲/۲	۶/۵
	Z=0.5	$C_d = -0.004 F_r^{1.27} - 9.355 \left(\frac{b}{T}\right)^{1.36} + 0.003 \left(\frac{P}{y_1}\right)^{1.08} + 0.57$	۲/۲	۵/۳۸
	رابطه کلی	$C_d = -0.094 F_r^{0.35} - 0.03 \left(\frac{b}{T}\right)^{2.84} - 0.076 \left(\frac{P}{y_1}\right)^{0.35} + 0.017 \left(\frac{Z}{1+Z}\right)^{0.87} + 0.68$	۳	۱۸/۶

جانبی دوزنقه‌ای لبه تیز در رژیم جریان زیر بحرانی پرداخته شد. با توجه به شرایط پروفیل جریان در سه محور طولی کانال، بهترین مقطع برای برداشت پروفیل طولی سطح آب، محور مرکزی کانال در نظر گرفته شد. با توجه به این که حل معادله جریان متغیر مکانی دارای پیچیدگی‌های زیادی می‌باشد با استفاده از روش سرریز معمولی دوزنقه‌ای روشی کاربردی برای محاسبه و طراحی سرریز جانبی دوزنقه‌ای معرفی شد و با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، تئوری استفاده شده در این تحقیق مورد ارزیابی قرار گرفت. با در نظر گرفتن سه عمق شاخص شامل عمق ابتدایی، عمق متوسط ابتدا و انتها و عمق مرکزی سرریز جانبی به عنوان اعماق مورد استفاده در معادله بده سرریز معمولی، اقدام به محاسبه ضریب بده شد. نتایج نشان داد که عمق متوسط ابتدا و انتها دارای دقت بالاتری نسبت به سایر اعماق

با توجه به هر یک از روابط کلی ارائه شده در جدول ۲، ضریب بده به دست آمده و با توجه به آن میزان بده جریان قابل برآورد خواهد بود. نتایج مقایسه بده بدست آمده از روابط پیشنهادی و بده آزمایشگاهی به همراه محدوده‌ی خطای ۵ درصد در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل مشخص است برآورد بده با استفاده از عمق مشخصه متوسط جریان نسبت به بقیه اعماق مشخصه از دقت بهتری برخوردار بوده است و با دقت مناسبی در باند ۵ درصد میزان بده واقعی را برآورد نموده است.

### نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق به ارزیابی خصوصیات جریان روی سرریزهای

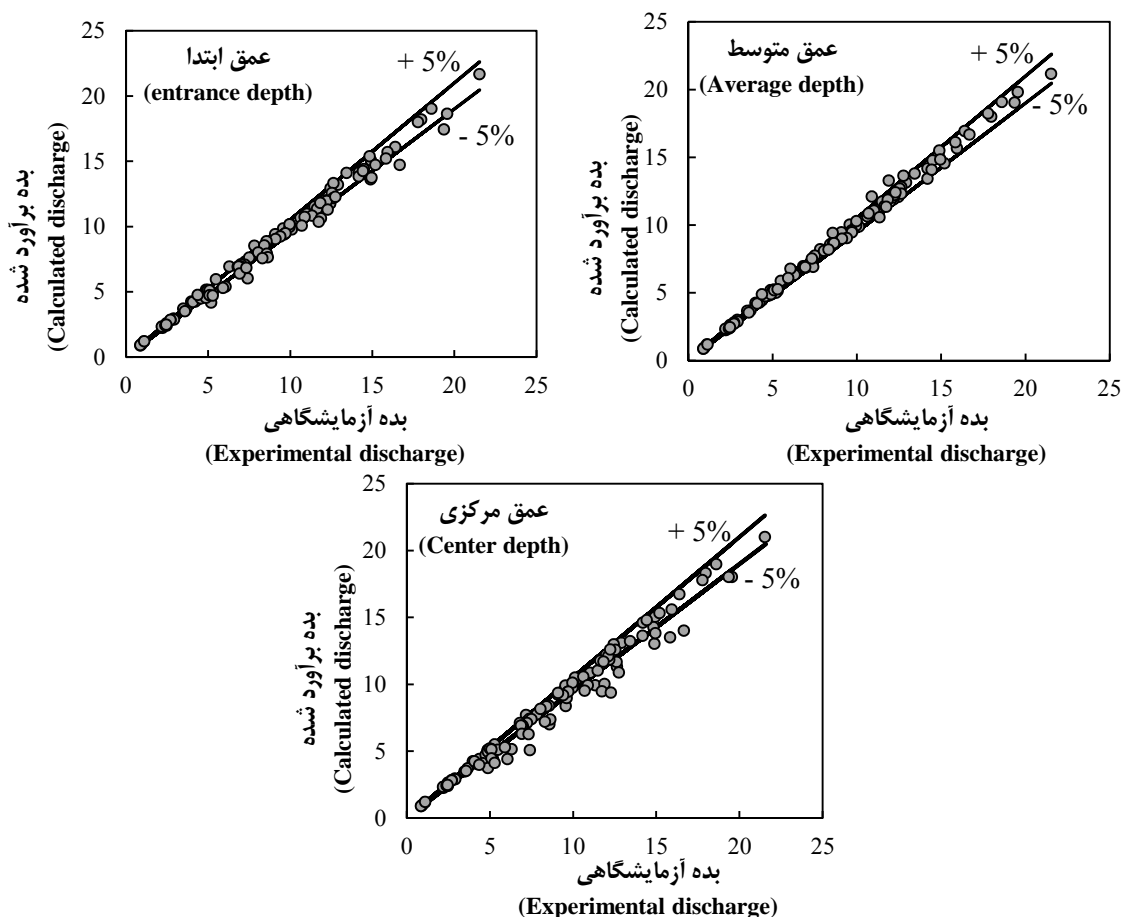


بوده و با همکاری قطب علمی ارزیابی و بهسازی شبکه‌های آبیاری و زهکشی انجام شده است. بدین وسیله از حمایت‌های این مرکز سپاسگزاری می‌گردد.

بوده و معادله ارائه شده برای ضریب بده دارای متوسط خطای ۲/۶ درصد بوده است. روابط پیشنهادی بسیار ساده و کاربردی بوده و به راحتی می‌تواند توسط مهندسان استفاده گردد.

## سپاسگزاری

تحقیق حاضر نتیجه کار پژوهشی انجام شده در دانشگاه تهران



شکل ۷- مقایسه بده آزمایشگاهی و بده محاسباتی توسط روابط پیشنهادی

Figure 7- Comparison of experimental discharge and discharge computed using the proposed equations

## منابع

- 1- Agaccioglu H., and Yuksel Y. 1998. Side weir flow in curved channels. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 124(3):163-175.
- 2- Borghei S.M., Jalili M.R., and Ghodsian M. 1999. Discharge coefficient for sharp-crested side weir in subcritical flow. Journal of Hydraulic Engineering, 125(10): 1051-1056.
- 3- Bos M.G. 1975. Discharge Measurement Structures. Oxford & IBH Publishing Co. New Delhi.
- 4- Castro-Orgaz O., and Hager W. 2012. Subcritical Side-Weir Flow at High Lateral Discharge. Journal of Hydraulic Engineering, 138(9): 777-787.
- 5- Cheong H.F. 1991. Discharge coefficient of lateral diversion from trapezoidal channel. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 117(4):461-475.
- 6- Cosar A., and Agaccioglu H. 2004. Discharge coefficient of a triangular side-weir located on a curved channel. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 130(5): 410-423.

- 7- De Marchi G. 1934. Saggio di teoria de funzionamenta degli stramazzi laterali, L'Energia Electricia, Rome, Italy, 11:849-860 (in Italian).
- 8- El-Khashab A., and Smith K.V.H. 1976. Experimental investigation of flow over side weirs. Journal of Hydraulics Division, 102(9): 1255-1268.
- 9- Emiroglu M.E., Agaccioglu H., and Kaya N. 2011. Discharge capacity of rectangular side weir in straight open channels. Flow measurement and instrumentation, 22(4): 319-330.
- 10- Ghodsian M. 2003. Supercritical flow over rectangular side weir. Journal of Civil Engineering, 30(3):596-600.
- 11- Ghodsian M. A. S. O. U. D. 2004. Flow over triangular side weir. Scientia Iranica, 11(1-2): 114-120.
- 12- Hager W.H. 1987. Lateral outflow over side weirs. Journal of Hydraulic Engineering, 4(3): 491-504.
- 13- Honar T., and Keshavarzi A. 2009. Effect of rounded-edge entrance on discharge coefficient of side weir in rectangular channels. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 58(4): 482-491.
- 14- Kumar C.P., and Pathak S.K. 1987. Triangular side weir. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 113(1): 98-105.
- 15- Muslu Y. 2001. Numerical analysis for lateral weir flow. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 127(4):246-53.
- 16- Muslu Y. 2002. Lateral weir flow model using a curve fitting analysis. Journal of Hydraulic Engineering, 128(7):712-715.
- 17- Rahimpour M., Keshavarz Z., and Ahmadi M.M. 2011. Flow over trapezoidal side weir. Flow Measurement and Instrumentation, 22(6): 507-510.
- 18- Ranga Raju K.G., Gupta S.K., and Prasad B. 1979. Side weir in rectangular channel. Journal of the Hydraulics Division, 105(5): 547-554.
- 19- Singh R., Manivannan D., and Satyanarayana T. 1994. Discharge coefficient of side weirs. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 120(4): 814 - 819.
- 20- Subramanya K., and Awasthy S.C. 1972. Spatially varied flow over side weirs. Journal of the Hydraulics Division, 98(1): 1-10.
- 21- Swamee P.K., Pathak S.K., and Ali M.S. 1994. Side weir analysis using elementary discharge coefficient. Journal of irrigation and drainage engineering, 120(4):742-755.
- 22- Swamee P.K., Pathak S.K., Mohan M., Agrawal S.K., and Ali M.S. 1994. Subcritical flow over rectangular side weir. Journal of irrigation and drainage engineering, 120(1): 212-217.
- 23- Uyumaz A., and Smith R.H. 1991. Design procedure for flow over side weirs. Journal of irrigation and drainage engineering, 117(1): 79-90.
- 24- Vatankhah A.R. 2012. Analytical solution for water surface profile along a side weir in a triangular channel. Flow Measurement and Instrumentation, 23(1), 76-79.
- 25- Vatankhah A.R. 2012. Water surface profile over side weir in a trapezoidal channel. Proceedings of the ICE-Water Management, 165(5): 247-252.
- 26- Ventutelli M.E. 2008. Method of solution non uniform flow with the presence of rectangular side weirs. Journal of irrigation and drainage engineering, 134(6):840-846.
- 27- Yu-Tech L. 1972. Discussion of spatially varied flow over side weir. Journal of the Hydraulics Division, 98(11):2046-2048.



## Discharge Computation of Trapezoidal Side Weir in Subcritical Flow Regime Using Conventional Weir Theory

S. Riahi<sup>1</sup> - A.R. Vatankhah<sup>2\*</sup>

Received: 24-08-2013

Accepted: 05-01-2015

**Introduction:** Side weir structures are extensively used in hydraulic engineering, irrigation and environmental engineering, and it usually consists of a main weir and a lateral channel. Side weirs are also used as an emergency structure. This structure is installed on one side or both sides of the main channel to divert the flow from the main channel to the side channel. Lateral outflow takes place when the water surface in the main channel rises above the weir sill. Flow over a side weir is a typical case of spatially varied flow with decreasing discharge. There have been extensive studies on side weir overflows. Most of the previous theoretical analysis and experimental research works are related to the flow over rectangular side weirs in rectangular main channels. In the current study, the flow conditions over a trapezoidal side weir located in a rectangular main channel in subcritical flow regime is considered.

**Materials and Methods:** The experiments were performed in a rectangular open channel having provisions for a side weir at one side of the channel. The main channel was horizontal with 12 m length, 0.25 m width, and 0.5 m height, and it was installed on a frame; lateral channel that has a length of 6 m, width of 0.25 m, and height of 1 m. It was set up parallel to the main channel; walls and its bed were made up of Plexiglas plates. The side weir was positioned at a distance of 6 m from the channel's entrance. A total of 121 experiments on trapezoidal side weirs were carried out.

**Results and Discussion:** For trapezoidal side weir, effective non-dimensional parameters were identified using dimensional analysis and Buckingham's Pi-Theorem. Finally, the following non-dimensional parameters were considered as the most effective ones on the discharge coefficient of the trapezoidal side weir flow.

$$C_d = f \left\{ Fr_1, \frac{P}{y_1}, \frac{T}{y_1}, z \right\}$$

in which  $Fr_1$  = upstream Froude number,  $P$  = height of the trapezoidal side weir,  $y_1$  = upstream water depth,  $z$  = side slope of the trapezoidal side weir and  $T$  = top flow width of the trapezoidal side weir. Water surface profiles were measured along the weir crest, the main channel centerline, and far from the weir section. Different elevations in water surface profile depend on the upstream Froude number in the main channel; depth differences in low Froude numbers are at minimum values, and in high Froude numbers are at maximum amounts. The water surface level along the crest drops at the entrance of the side weir to the first half of the side weir; and it has been attributed to the side weir entrance effect at the upstream. Afterwards, the water level rises towards the downstream of the weir. According to the experimental results, measurements of the water in the centerline of the main channel are reliable and water surface drop is negligible. According to the parameters affecting the discharge coefficient for each value of  $z$ , discharge coefficient equations were developed with acceptable accuracy such that the effects of this parameter were shown separately. Finally, the general equation was proposed. The general functional form for discharge coefficient is presented as follows where the effect of the side slope parameter,  $z$ , is also considered.

$$C_d = 0.085 Fr_1^{3.16} - 0.053 \left( \frac{b}{T} \right)^{1.4} - 0.032 \left( \frac{P}{y_1} \right)^{1.04} + 0.18 \left( \frac{z}{1+z} \right)^{1.09} + 0.55$$

The mean and maximum percentage errors of the discharge coefficient computed using the proposed equation are as 2.6% and 11.5% , respectively.

**Conclusion:** In this study, the characteristics of trapezoidal side weir overflows in subcritical flow regime were discussed. For this purpose, experimental data related to the water surface profile of the side weir and discharge coefficient were collected and analyzed. The results showed that the most efficient section for measuring water surface profile is located at the center line of the main channel. It was found that for trapezoidal side weir, the discharge coefficient depends on the Froude number, the ratio of crest height to initial depth, the

1- PhD Student of Water Structures, Department of Water Engineering, Tarbiat Modares University

2- Associate Professor Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran

(\*-Corresponding Author Email: arvatan@ut.ac.ir)

overflow length to initial depth, and the side slope of the weir. In this study, conventional trapezoidal weir theory has been used in order to evaluate the discharge coefficient and provide side weir discharge equation. For this purpose, three reference depths were considered for conventional weir, and for each depth an equation was developed for the discharge coefficient. Comparison between predicted values and experimental data showed that average flow depth results in accurate outcomes for assessing the discharge coefficient. The average value of error for discharge coefficient estimation by the proposed equation is 2.6%. Thus this equation is proposed for use in practice by water engineers.

**Keywords:** Control structure, Conventional weir, Discharge coefficient, Spatially varied flow, Trapezoidal side weir, Water surface profile