

## Theoretical and Experimental Study of Circular-Crested Trapezoidal Side Weir in Subcritical Flow Regime

RAMIN ASKARI<sup>1</sup>, ALIREZA VATANKHAH<sup>2\*</sup>

1. M.Sc., Irrigation and Reclamation Eng. Dept., University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

2. Associate Professor, Irrigation and Reclamation Eng. Dept., University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

(Received: July. 24, 2018- Revised: Nov. 4, 2018- Accepted: Nov. 27, 2018)

### ABSTRACT

Side weir is one of the diversion structures, which widely used in irrigation and drainage networks, flood protection, urban sewage systems and water level control. The flow over the side weirs is a typical case of the spatially varied flow with decreasing flow discharge. In this study, the flow characteristics over the circular-crested trapezoidal side weir located in rectangular channels is experimentally investigated under subcritical flow conditions. In this research, the conventional weir theory with three different reference depths ( $y_1$ ,  $y_{avg}$  and  $y_{center}$ ) for computing the weir head was used to evaluate the proposed discharge coefficient and discharge equations. Based on the experimental results, the discharge coefficient is a function of upstream Froude number, the ratio of upstream flow depth to the crest diameter, and side slope of the weir. The comparison between the experimental data and computed results indicated that the conventional weir theory with the average flow depth as the reference depth with an average error of 3.6% is the best relationship for assessing the discharge coefficient. Thus, this method is suggested for practical purposes.

**Keywords:** Circular-crested trapezoidal side weir, spatially varied flow, discharge coefficient, subcritical flow, Free flow.

## مطالعه نظری و آزمایشگاهی سرریز جانبی دوزنقه‌ای لبه‌گرد در شرایط رژیم زیربحرانی

رامین عسکری<sup>۱</sup>، علیرضا خواه<sup>۲\*</sup>

۱. کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس

کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲. دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی،

دانشگاه تهران، کرج، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۵/۲ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۸/۱۳ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۹/۶)

### چکیده

سرریز جانبی یکی از انواع سازه‌های انحراف آب است که به طور گسترده در شبکه‌های آبیاری و زهکشی، کنترل سیلاب، سیستم فاضلاب شهری و کنترل سطح آب مورد استفاده قرار می‌گیرد. جریان عبوری از سرریز جانبی از نوع جریان متغیر مکانی با کاهش بده می‌باشد. در مطالعه حاضر با استفاده از مدل آزمایشگاهی و روش تحلیل ابعادی، به بررسی خصوصیات جریان عبوری از روی سرریز جانبی دوزنقه‌ای لبه‌گرد واقع در کانال مستطیلی در شرایط جریان زیر بحرانی پرداخته شده است. برای ارزیابی ضریب بده و ارائه معادله بده سرریز جانبی در شرایط جریان آزاد، از تئوری سرریز معمولی با سه عمق مشخصه (عمق ابتدای سرریز، میانگین عمق ابتدا و انتها و عمق مرکزی) برای محاسبه هد سرریز استفاده شد. نتایج آزمایش‌های تحقیق حاضر حاکی از آن است که ضریب بده سرریز جانبی دوزنقه‌ای لبه‌گرد به عدد فرود جریان بالادست، نسبت عمق جریان به قطر تاج سرریز و شیب جداره جانبی سرریز بستگی دارد. همچنین مقایسه نتایج با داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که روش عمق متوسط جریان با متوسط خطای برآورد برابر با ۳/۶ درصد بهترین جواب را برای تخمین ضریب بده ارائه می‌کند، لذا این روش برای مقاصد عملی پیشنهاد می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** سرریز جانبی دوزنقه‌ای لبه‌گرد، جریان متغیر مکانی، ضریب بده، جریان زیربحرانی، جریان آزاد.

### مقدمه

برای توزیع عادلانه آب در بین متقاضیان و به حداقل رسانیدن تلفات آب، اندازه‌گیری دقیق بده جریان ضروری است. در قرن گذشته پژوهشگران و مهندسان علوم آب تلاش کرده‌اند با ساخت و نصب سازه‌های اندازه‌گیری در کانال‌ها، بده جریان را با دقت مناسب اندازه‌گیری کنند. نتیجه این تلاش‌ها به طراحی سازه‌های متنوعی از قبیل سرریزها، دریچه‌ها و فلوم‌ها انجامیده است. 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 هدایت کننده می‌باشد که در طول کانال اصلی و به موازات آن نصب می‌گردد و هنگامی که جریان با سطح آزاد، بالاتر از تاج سرریز جانبی قرار گیرد از آن سرریز می‌شود (Ranga Raju et al., 1979). این عملکرد باعث تنظیم و کنترل سطح آب و بده در کانال اصلی خواهد شد. در معمول‌ترین نوع سرریزهای جانبی، سرریز به صورت موازی با جهت جریان در

دیواره کانال نصب می‌شود و ارتفاع آن کمتر از عمق کانال می‌باشد. کنترل و انحراف سیلاب در مخازن سدها، انحراف جریان و محافظت در برابر سیلاب‌ها در کانال‌ها و رودخانه‌ها، حفاظت سامانه‌های فاضلاب شهری، آبرسانی و آبیاری از دیگر موارد کاربرد سرریزهای جانبی می‌باشد. سرریزهای جانبی در شکل‌های مختلف نظیر مستطیلی، دوزنقه‌ای، مثلثی و مرکب ساخته شده و در کانال‌ها با مقاطع عرضی متفاوت استفاده می‌شوند، که هر کدام هیدرولیک خاص خود را دارند. با توجه به کاربرد وسیع سرریزهای جانبی، این نوع سرریزها باید دارای خصوصیات باشند که بتوان از آن‌ها به طور مناسب در شبکه‌های انتقال آب و فاضلاب و نیز سیستم‌های انحراف در رودخانه‌ها استفاده کرد. از جمله این خصوصیات می‌توان به اندازه‌گیری دقیق بده جریان عبوری برای آبیاری مناسب از کانال و توانایی آن در خروج میزان قابل توجهی از جریان در مکان‌هایی که به عنوان سازه حفاظتی به کار می‌رود، اشاره کرد. از سوی دیگر سرریزهای جانبی مستطیلی این دو قابلیت را به صورت هم‌زمان دارا نمی‌باشند به طوری که اگر طول

ریش) می‌باشد. وی با در نظر گرفتن سرریز جانبی به صورت یک سرریز معمولی، از رابطه زیر برای بیان شدت بده در طول سرریز استفاده کرد:

$$q = -\frac{dQ}{dx} = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} (y - p)^{1.5}$$

که در این رابطه،  $q$  بده جانبی در طول سرریز،  $C_d$  ضریب بده جریان (یا ضریب دی‌مارخی)،  $y$  عمق جریان در طول سرریز جانبی و  $p$  ارتفاع سرریز می‌باشد.

(Ranga Raju et al. (1979)، ضریب بده سرریزهای جانبی لبه‌تیز و لبه‌پهن مستطیلی در شرایط جریان زیربحرانی را مورد مطالعه قرار داده و نشان دادند که ضریب بده در سرریزهای لبه‌پهن علاوه بر عدد فرود، به نسبت ارتفاع آب بالادست به پهنای سرریز نیز بستگی دارد. (Hager (1987) سرریزهای جانبی را با سرریزهایی که در جهت عمود بر جریان قرار می‌گیرند (سرریزهای معمولی) مورد مقایسه قرار داد و مشاهده کرد که میزان انرژی مخصوص در سرریزهای جانبی بیشتر از سرریزهای معمولی است و عمق جریان در سرریزهای جانبی تقریباً برابر با میزان انرژی مخصوص در سرریزهای معمولی خواهد بود. Borghei et al. (1999) تأثیر پارامترهای هیدرولیکی و هندسی کانال و شکل سرریز را بر ضریب بده در جریان زیربحرانی برای سرریزهای لبه‌تیز مورد مطالعه قرار دادند. (Muslu (2002 مدلی براساس روش برازش منحنی برای به دست آوردن پارامترهای هیدرولیکی سرریز جانبی ارائه کرد. (Uyumaz and Smit (1991)، Hager (1994)، Oliveto et al. (2001) و Vatankeh (2012) خصوصیات جریان از روی سرریزهای جانبی را در کانال‌های دایره‌ای مورد مطالعه قرار دادند. (Swamee et al. (1994)، Kumar and Pathak (1987)، Cosar and Agaccioglu (2004) و Ghodsian (2003) به بررسی ضریب بده سرریزهای جانبی مثلثی و مستطیلی پرداختند. (Castro-Orgaz and Hager (2012) به بررسی شدت جریان جانبی، زاویه خروجی جریان از سرریز جانبی و ضرایب تصحیح اندازه حرکت و انرژی پرداختند. Borghei and Salehi (2003) به تعیین ضریب بده با استفاده از تحلیل پروفیل سطح آب در سرریزهای جانبی پرداختند. Honar and Keshavarzi (2009) اثر گرد شدگی لبه دیواره سرریز را بر ضریب بده سرریزهای جانبی مستطیلی واقع در کانال‌های مستطیلی بررسی کردند و نتیجه گرفتند که بده عبوری از روی سرریز نسبت به حالت ورودی به شکل ساده (لبه‌تخت و بدون گرد شدگی) افزایش می‌یابد. (Rahimpour et al. (2011) به بررسی آزمایشگاهی جریان بر روی سرریزهای جانبی دوزنقه‌ای لبه‌تیز با

سرریز کوچک باشد، فقط برای اندازه‌گیری جریان مناسب است و اگر طول سرریز، بزرگ در نظر گرفته شود، فقط برای تخلیه سریع سیلاب مناسب بوده و دقت اندازه‌گیری بده کاهش می‌یابد. جریان روی سرریز جانبی، از نوع جریان متغیر مکانی با کاهش بده است. در این نوع جریان، مقدار بده در طول کانال اصلی کاهش پیدا کرده و با توجه به نوع جریان در بالادست (فوق بحرانی یا زیر بحرانی) نوع پروفیل سطح آب روی سرریز متفاوت خواهد بود. تاکنون مطالعات گسترده‌ای بر روی شکل‌های مختلف سرریزهای جانبی که در کانال‌هایی با مقاطع عرضی مختلف قرار می‌گیرند، انجام شده است. عموماً تلاش محققین بر تعیین روابط بده این سرریزها و افزایش عملکرد هیدرولیکی آنها (افزایش ضریب بده) بوده است. تحقیق حاضر نیز به بررسی خصوصیات هیدرولیکی سرریزهای جانبی دوزنقه‌ای لبه نیم‌دایره‌ای پرداخته است. در سرریزهای با تاج نیم‌دایره به دلیل سهولت عبور جریان از تاج سرریز، انتظار می‌رود ضریب بده جریان نسبت به سرریزهای با لبه تخت بی‌شتر شده و این امر باعث افزایش عملکرد هیدرولیکی و کاهش هزینه‌های اجرایی (به دلیل کاهش طول سرریز) شود. هدف اصلی از این تحقیق، تخمین بده عبوری و تعیین رابطه‌ای مناسب برای تخمین ضریب بده سرریز جانبی دوزنقه‌ای با تاج نیم‌دایره در شرایط جریان زیر بحرانی در کانال اصلی و بهره‌برداری سرریز تحت شرایط جریان آزاد بر اساس نتایج آزمایشگاهی و تحلیل نظری است.

## سابقه مطالعات

مطالعه و بررسی سرریز جانبی به اوایل قرن حاضر بر می‌گردد. De marchi (1934) برای اولین بار یک حل تحلیلی برای بده دست آوردن پروفیل سطح آب در طول سرریز جانبی مستطیلی واقع در کانال‌های مستطیلی ارائه داد و معادله جریان متغیر مکانی با کاهش بده را با فرض ثابت بودن انرژی مخصوص، ضریب بده و ضریب توزیع سرعت در طول سرریز، از طریق انتگرال‌گیری به دست آورد. مطالعات (De marchi (1934) پایه و اساس مطالعات بعدی بر روی جریان متغیر مکانی با کاهش بده در سرریزهای جانبی قرار گرفت. وی بر روی یک کانال مستطیلی به عرض  $B$  با شیب صفر، با صرف نظر از افت انرژی، معادله عمومی جریان متغیر مکانی با کاهش بده را به صورت زیر به دست آورد:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{Qy \left( \frac{-dQ}{dx} \right)}{gB^2 y^3 - Q^2} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در این رابطه  $dy/dx$  شیب پروفیل سطح آب،  $Q$  بده جریان،  $y$  عمق جریان،  $g$  شتاب ثقل و  $B$  عرض کانال اصلی (کانال

بوده است. تحقیق حاضر نیز به بررسی خصوصیات هیدرولیکی سرریزهای جانبی دوزنقه‌ای لبه نیم‌دایره پرداخته است. جمع‌بندی مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که تاکنون مطالعه‌ای در زمینه سرریزهای با تاج و کناره‌های نیم‌دایره به عنوان سرریز جانبی انجام نشده است. لذا با توجه به اهمیت موضوع از نظر افزایش راندمان تخلیه آب اضافی و کاهش هزینه‌های اجرایی، این تحقیق انجام شده است.

## مواد و روش‌ها

### تجهیزات آزمایشگاهی

تحقیق حاضر در آزمایشگاه مرکزی هیدرولیک دانشگاه تهران انجام گردیده است. آزمایش‌ها در فلومی با چارچوب فلزی و بدنه ای از جنس پلکسی گلاس به طول ۱۲ متر، عرض ۰/۲۵ متر و ارتفاع ۰/۴۵ متر انجام شده است. این فلوم روی پایه‌هایی به ارتفاع ۱/۶ متر قرار گرفته که از طریق اهرم قرار گرفته روی آن، می‌توان شیب کانال را تنظیم کرد. کانال جانبی از جنس پلکسی گلاس و به طول ۱/۸ متر، عرض ۰/۲۵ متر و ارتفاع یک متر می‌باشد که بده سرریز شده تحت شرایط جریان آزاد را به حوضچه تخلیه انتقال می‌دهد. به منظور آرام‌سازی جریان و کنترل تلاطم، در ابتدای کانال از یک توری فلزی استفاده شده است. سرریزهای جانبی مورد آزمایش در فاصله ۶ متری از ابتدای کانال قرار گرفته و به گونه‌ای نصب شده‌اند که امکان جابجایی راحت سرریز به خوبی فراهم شود. به منظور تأمین عمق آب مورد نیاز در کانال، ایجاد اعداد فرود مختلف و تنظیم بده عبوری از روی سرریز جانبی از یک دریچه به عرض ۰/۲۵ متر در پایین دست سرریز جانبی (انتهای کانال اصلی) استفاده شده است. اندازه‌گیری پروفیل سطح آب در کانال اصلی توسط یک عمق‌سنج نیرپیک با دقت  $\pm 0.1$  میلی‌متر انجام می‌شد. این عمق‌سنج قابلیت جابجایی در طول و عرض کانال را داشته و با شبکه‌بندی عرض کانال به سه محور (محور مرکزی و دو محور به فواصل ۵ سانتیمتری از دیواره‌ها)، اقدام به برداشت پروفیل سطح آب روی محورها به فواصل چهار سانتی‌متری شد. در مقطع نزدیک به لبه سرریز به علت تغییرات شدید سطح آب، برداشت پروفیل سطح آب در فواصل دو سانتی متری انجام شد. برای اندازه‌گیری و کنترل پروفیل سطح آب برداشت شده توسط عمق‌سنج، پیژومترهایی در سه محور کانال اصلی نصب شد که این پیژومترها از طریق شلنگ به تابلوی پیژومتر متصل شده بودند. در هر آزمایش با گرفتن عکس از پیژومترها و رقومی کردن آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار گرافر، صحت داده‌های برداشت شده با عمق‌سنج مورد بررسی قرار گرفت. بده عبوری از کانال اصلی و سرریز جانبی با استفاده از یک سرریز

شیب‌های متفاوت و تحت شرایط جریان زیر بحرانی پرداختند. آن‌ها برای به دست آوردن بده واحد طول عبوری از سرریز جانبی دوزنقه‌ای، این سرریز را ترکیبی از سرریز مستطیلی و مثلثی در نظر گرفته و از مجموع معادله‌های ارائه شده برای بده واحد طول سرریزهای مستطیلی و مثلثی، معادله جریان متغیر مکانی را برای سرریز دوزنقه‌ای توسعه دادند و ضریب دی‌مارخی را تابعی از عدد فرود کانال اصلی، نسبت ارتفاع سرریز به عمق جریان در ابتدای سرریز، شیب جانبی دیواره سرریز، نسبت طول سرریز به عمق ابتدایی جریان و نسبت عرض کانال اصلی به عمق جریان به دست آوردند. از آنجایی که مجموع بده واحد طول سرریز مثلثی و مستطیلی برابر بده واحد طول سرریز دوزنقه‌ای نیست، فرض انجام شده نیاز به بررسی بیشتر دارد. (Emiroglu *et al.* (2011) سرریز جانبی مستطیلی لبه تیز را مورد بررسی قرار دادند و برای به دست آوردن ضریب بده از معادله سرریز معمولی استفاده کردند. در این تحقیق ضریب بده به صورت تابعی از پارامترهای زیر در نظر گرفته شده است و با در نظر گرفتن تمام پارامترهای مؤثر رابطه‌ای برای محاسبه ضریب بده با متوسط خطای ۴/۴۵٪ ارائه شده است.

$$C_d = f\left(Fr_1, \frac{L}{B}, \frac{L}{y_1}, \frac{P}{y_1}\right) \quad (\text{رابطه ۳})$$

در معادله (۳)،  $Fr_1$  عدد فرود در بالادست سرریز جانبی،  $B$  عرض کانال اصلی،  $L$  طول سرریز،  $p$  ارتفاع سرریز،  $y_1$  عمق جریان در ابتدای سرریز و  $C_d$  ضریب بده جریان می‌باشد. (Riha and Zachoval (2014) ضریب تخلیه سرریز جانبی دوزنقه‌ای لبه‌پهن را در محدوده‌ی اعداد فرود کم بررسی کردند. (Honar and Mazloom shahraki (2014) ضریب بده سرریزهای جانبی استوانه‌ای و نیم‌استوانه‌ای را در جریان‌های زیر بحرانی بررسی کردند. (Azimi *et al.* (2017a) به مطالعه سرریز جانبی مستطیلی در کانال دوزنقه‌ای پرداختند و معادله‌ای را برای تخمین ضریب بده سرریز ارائه نمودند. (Azimi *et al.* (2017b) در تحقیقی دیگر به تحلیل حساسیت عوامل مؤثر بر ضریب بده سرریزهای مستطیلی واقع در کانال دوزنقه‌ای پرداختند. طبق این تحقیق عدد فرود مؤثرترین پارامتر بر ضریب بده سرریز جانبی می‌باشد. طبق مطالعات (Parsaie and Haghiabi (2017) نیز عدد فرود مؤثرترین پارامتر بر ضریب بده سرریز جانبی مستطیلی می‌باشد.

همان‌طور که در بالا اشاره شد، تاکنون مطالعات گسترده‌ای بر روی شکل‌های مختلف سرریزهای جانبی که در کانال‌هایی با مقاطع عرضی مختلف قرار دارند، انجام شده است. عموماً تلاش محققین بر تعیین روابط بده و ضریب بده این سازه‌ها و افزایش عملکرد هیدرولیکی آن‌ها (افزایش ضریب بده و در نتیجه بده)

مقایسه و بهترین نتیجه انتخاب گردد. در این تحقیق عمق آب در ابتدای سرریز ( $y_1$ )، میانگین عمق‌های ابتدا و انتهای سرریز ( $V_{avg}$ ) و عمق آب در مرکز سرریز ( $V_{center}$ ) و در محور مرکزی کانال اصلی به عنوان عمق‌های مرجع انتخاب شده‌اند و ضرایب بده متناسب با هر عمق محاسبه شده و در نهایت مناسب‌ترین عمق مرجع معرفی شده است.

همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، سرریز دوزنقه ای معادل یک مقطع مستطیلی با طول  $b$  و دو مقطع نیم مثلثی با زاویه  $(\theta/2)$  می‌باشد. مقدار بده عبوری از سرریز دوزنقه‌ای با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید (Bos, 1976). (رابطه ۴)

$$Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2gh^3} \left[ b + \frac{4}{5} h \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \right]$$

در رابطه (۴)،  $h$  ارتفاع یا هد آب روی سرریز و  $\tan(\theta/2)$  برابر با تانژانت زاویه جدار جانبی با محور قائم می‌باشد که با  $Z$  نشان داده می‌شود. مشخصات هندسی سرریز دوزنقه‌ای در شکل (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱- محدوده تغییرات مشخصات هیدرولیکی

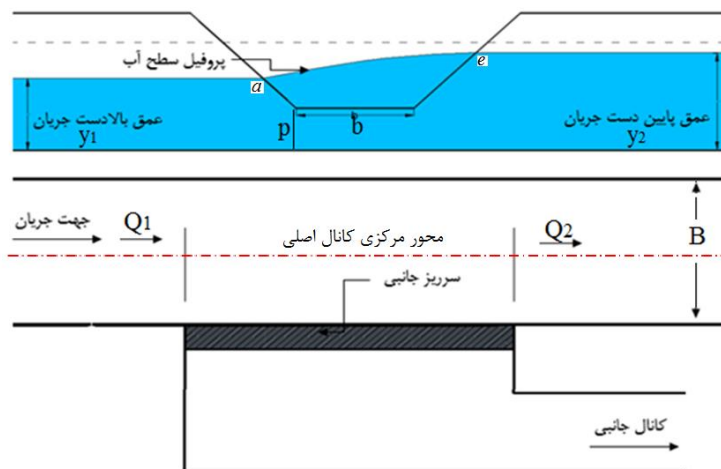
محدوده تغییرات	خصوصیات هیدرولیکی
۰/۰-۱۹/۹۳	عدد فرود در کانال اصلی ( $Fr_1$ )
۲۶-۹	عمق جریان در ابتدای سرریز ( $y_1$ ) (سانتیمتر)
۲۷-۱۰/۰۵	عمق جریان در انتهای سرریز ( $y_2$ ) (سانتیمتر)
۱۳/۳۸-۹/۹۸	بده کل در کانال اصلی (لیتر بر ثانیه)
۴/۱۸-۳/۹۰	بده سرریز جانبی (لیتر بر ثانیه)

مستطیلی لبه تیز و یک سرریز مثلثی با زاویه رأس ۲۹ درجه که توسط یک جریان سنج مغناطیسی سه اینچی با دقت  $\pm 0.2$  تا  $\pm 0.5$  درصد (ساخت شرکت مگاب) واسنجی شده‌اند، اندازه‌گیری شد. آزمایش‌ها بر روی سرریز جانبی دوزنقه‌ای با تاج و کناره‌های نیم‌دایره، با شیب‌های جداره ۰/۵، ۰/۶۷ و ۱ (۱ قائم به  $Z$  افقی) و تاج سرریز با قطرهای چهار سانتی‌متری و هشت سانتی‌متری در سه ارتفاع ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر انجام شد. در کل ۱۸ ترکیب مختلف از تاج، پایه و لبه سرریز ایجاد شد که برای هر کدام از این ترکیب‌ها پنج بده کل برای کانال اصلی و برای هر بده کل سه بده جانبی در نظر گرفته شد. برای لبه گرد ساختن سرریز، از چوب‌هایی که به شکل نیم‌دایره درآمده بودند استفاده شد. همچنین برای ضد آب کردن آن‌ها، از ماده رزین استفاده شد. در مجموع ۲۰۳ آزمایش بر روی سرریز جانبی دوزنقه‌ای انجام شد. مشخصات و محدوده پارامترهای هیدرولیکی این آزمایش‌ها در جدول (۱) ارائه شده است.

#### معادلات حاکم

#### اصول نظری سرریز دوزنقه‌ای لبه گرد معمولی

به طور کلی نحوه اثرگذاری سرعت رسش در سرریزهای جانبی و سرریزهای معمولی متفاوت است. لذا یکی از شرایط کاربرد رابطه سرریز معمولی در این نوع از سرریزها، ثابت در نظر گرفتن عمق آب در طول سرریز جانبی می‌باشد. انتخاب یک ارتفاع آب مرجع در طول سرریز جانبی از نکات مهم در استفاده از رابطه سرریز معمولی برای سرریزهای جانبی است. بنابراین لازم است عمق یا هدهای مرجع مختلفی انتخاب شود و نتایج آن‌ها با یکدیگر



شکل ۱- نمایی از فلوم مورد استفاده و سرریز دوزنقه‌ای لبه گرد (مقطع طولی و پلان)

اقدام به شناسایی پارامترهای بی‌بعد مؤثر بر ضریب بده شد. این پارامترها در رابطه (۵) ارائه شده است.

#### نتایج و بحث

برای سرریز جانبی دوزنقه‌ای با شناسایی پارامترهای مؤثر بر [www.SID.ir](http://www.SID.ir)

(رابطه ۵)

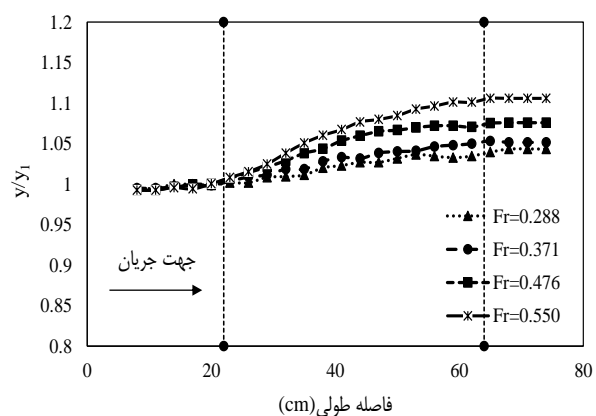
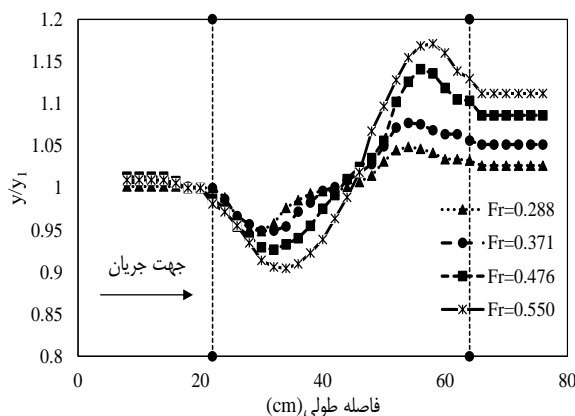
$$C_d = f \left( Fr_1, Re, We, \frac{P}{y_1}, \frac{D}{y_1}, \frac{B}{y_1}, \frac{b}{y_1}, S_0, Z \right)$$

در این رابطه  $Fr_1$  عدد فرود جریان در بالادست سرریز جانبی،  $S_0$  شیب طولی کانال اصلی،  $D$  قطر تاج سرریز،  $P$  ارتفاع تاج سرریز،  $Re$  عدد رینولدز جریان و  $We$  عدد وبر می‌باشد. با توجه به تحقیقات انجام گرفته توسط محققین پیشین، از برخی از متغیرها به دلیل کم بودن تأثیر آن‌ها بر ضریب بده جریان سرریز جانبی، می‌توان چشم‌پوشی کرد. (Borghai et al. (1999) در آزمایش‌های خود نشان داد که در جریان زیر بحرانی تأثیر شیب کانال بر ضریب بده ناچیز است. و از آنجایی که در کلیه آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، شیب ثابت و برابر صفر می‌باشد، لذا از تأثیر شیب کف صرف‌نظر می‌شود. عدد وبر معرف کشش سطحی و عدد رینولدز معرف لزجت سیال می‌باشد. با توجه به دامنه تغییر عدد رینولدز (جریان آشفته) و عمق جریان روی تاج سرریز جانبی (هد آب بیشتر از دو سانتی‌متر روی تاج سرریز)، می‌توان از تأثیر این پارامترها نیز صرف‌نظر کرد. با توجه به این که عرض کانال اصلی و سرریز جانبی در تمامی آزمایش‌ها ثابت می‌باشد، لذا متغیرهای بی‌بعد  $(B/y_1)$  و  $(b/y_1)$  به دلیل ثابت بودن قابل بررسی نیستند. با حذف پارامترهای بی‌بعدی که تأثیر کمی در ضریب بده جریان دارند، رابطه ابعادی به شکل زیر خواهد بود. (رابطه ۶)

$$C_d = f \left( Fr_1, Z, \frac{P}{y_1}, \frac{D}{y_1} \right)$$

ارزیابی پروفیل‌های سطح آب

با توجه به اهمیت پروفیل‌های طولی و عرضی سطح آب، در این بخش به توضیح و تفسیر پروفیل‌های شکل گرفته روی سرریز جانبی پرداخته می‌شود. در این تحقیق اندازه‌گیری پروفیل سطح آب در امتداد سه محور و به موازات سرریز جانبی انجام شده است. با توجه به آزمایش‌ها می‌توان مشاهده نمود که ارتفاع سطح آب در ابتدای سرریز کمتر از انتهای آن بوده و این بیانگر وجود رژیم جریان زیر بحرانی در جریان‌های متغیر مکانی با کاهش بده می‌باشد. در شکل (۲) برخی نیمرخ‌های طولی در امتداد محور لبه جریان و محور مرکزی جریان به عنوان نمونه نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۲) ملاحظه می‌گردد، در محور لبه سرریز جانبی، سطح آب در ابتدا با یک افت روبرو شده که این افت ناشی از جدایی جریان در اثر ورودی می‌باشد و پس از آن به تدریج شروع به افزایش می‌نماید. نرخ افزایش سطح آب تا مرکز سرریز بیشتر بوده و پس از آن به تدریج از میزان آن کاسته می‌شود که بیانگر گسترش اثر ورودی سرریز جانبی تا مرکز سرریز می‌باشد و از آن به بعد این اثر کاهش می‌یابد. نتایج به دست آمده با نتایج ارائه شده توسط El-Khashab and Smith (1976) و Emiroglu et al. (2011) که در مورد سرریزهای جانبی لبه‌تیز 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. هر چه جریان‌های ثانویه بیشتر باشد این افزایش نیز بیشتر می‌شود (Emiroglu et al., 2011).



شکل ۲- پروفیل سطح آب بدون بده به ازای اعداد فرود مختلف در ابتدای سرریز و برای  $Z=0.67$  و قطر لبه  $D=8\text{cm}$ ؛ شکل سمت چپ بیانگر پروفیل در لبه سرریز و شکل سمت راست بیانگر پروفیل در محور مرکزی کانال

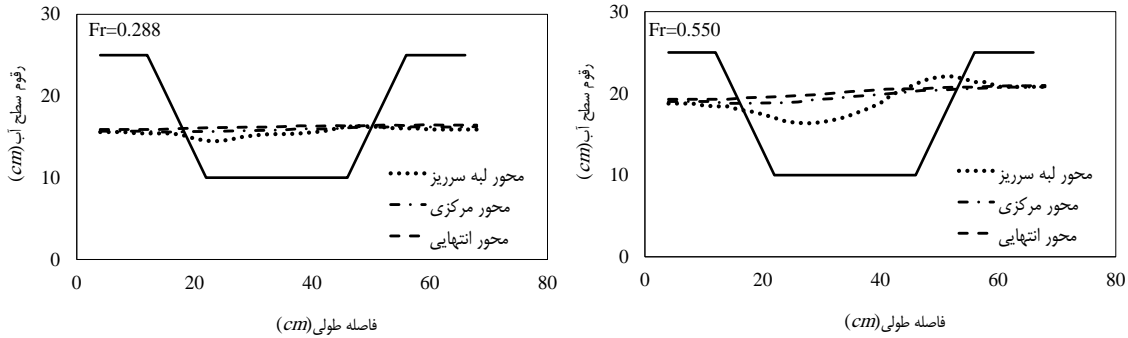
با عدد فرود جریان بالادست، اختلاف ارتفاع سطح آب در ابتدا و انتهای سرریز تغییر می‌کند. در اعداد فرود پایین این اختلاف کم و با

در شکل (۳) پروفیل سطح آب به ازای اعداد فرود مختلف ترسیم شده است با توجه به شکل می‌توان مشاهده کرد که متناسب

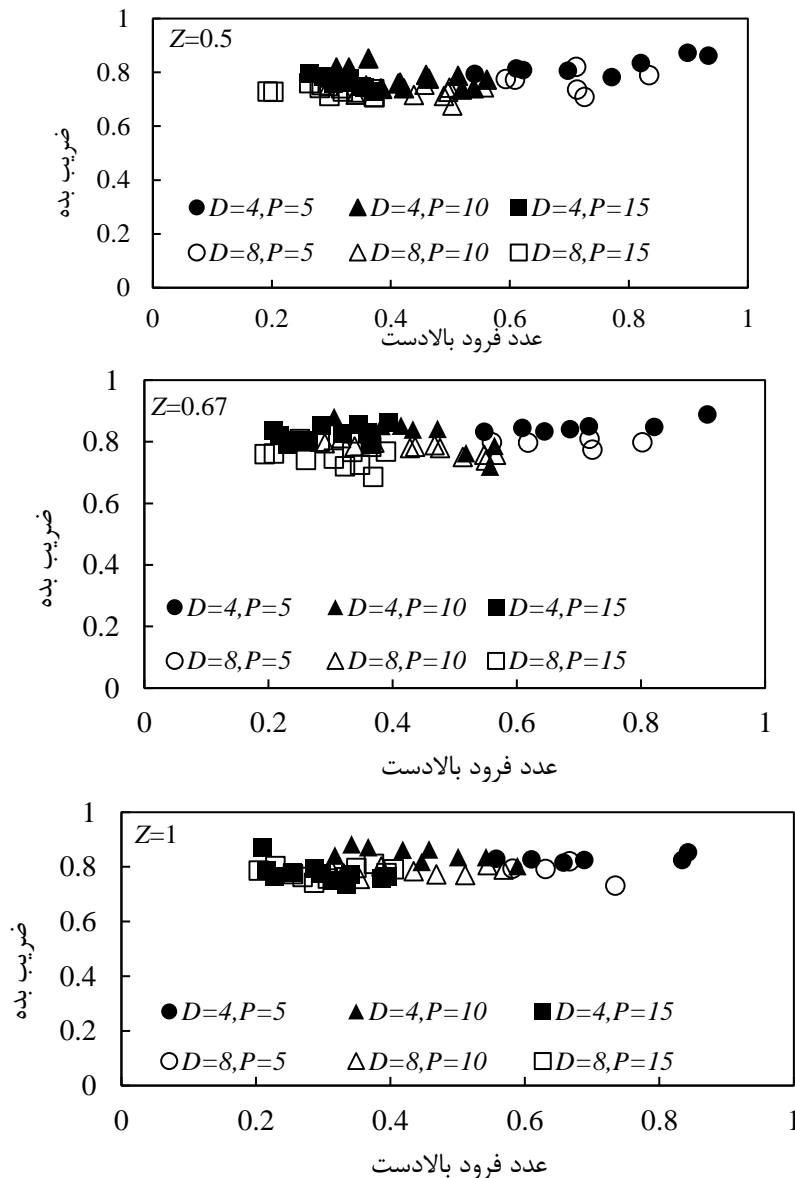
مرکزی کانال اصلی به عنوان عمق شاخص و با استفاده از معادله سرریز معمولی، ضریب بده جریان برای هر یک از مقادیر شیب جانبی محاسبه گردید و روابطی بر اساس پارامترهای بی‌بعد برای هر شیب جانبی ارائه شد. همچنین یک رابطه کلی برای تعیین ضریب بده سرریز جانبی در صورت استفاده از عمق  $y_1$  ارائه شد.

افزایش عدد فرود تغییرات سطح آب بیشتر می‌شود. همچنین تغییرات سطح آب در لبه سرریز بیشتر از دو محور دیگر می‌باشد.

تحلیل ضریب بده جریان بر اساس عمق شاخص‌های مختلف با در نظر گرفتن عمق ابتدای سرریز جانبی ( $y_1$ ) در محور



شکل ۳- پروفیل‌های برداشت شده در امتداد سرریز برای اعداد فرود مختلف



شکل ۴- ضریب بده جریان برای عمق شاخص ابتدای سرریز در برابر عدد فرود بالادست سرریز (قطر  $D$  و ارتفاع  $P$  بر حسب سانتی‌متر)

درصد است. رابطه کلی که می‌توان براساس شیب‌های جداره متفاوت ارائه نمود به صورت رابطه (۱۰) است که متوسط خطای این رابطه برابر ۳/۸ درصد ولی حداکثر خطای آن برابر ۱۵/۹۰ درصد می‌باشد.

(رابطه ۱۰)

$$C_d = (0.41 + 1.02Z - 0.63Z^2)(Fr_1)^{0.052} \times \left(\frac{y}{D}\right)^{0.03}$$

در این تحقیق ضریب بده تابعی از شیب، عدد فرود و عمق نسبی در نظر گرفته شده است. در رابطه پیشنهادی (۱۰) شیب به صورت توانی لحاظ نشده است. هنگامی که یک کمیت بی‌بعد دارای خود تشابهی ناقص (*Incomplete Self-Similarity* (ISS) باشد، آن را به صورت توانی در نظر می‌گیرند. در این حالت وقتی کمیت بی‌بعد به سمت صفر یا بی‌نهایت میل می‌کند حد کمیت بی‌بعد وابسته نیز به سمت صفر یا بی‌نهایت میل خواهد کرد. از آنجایی که وقتی شیب به سمت صفر یا بی‌نهایت میل می‌کند ضریب بده به سمت صفر یا بی‌نهایت میل نمی‌کند، شیب دارای خاصیت خود تشابهی ناقص نبوده و بنابراین لزومی به توانی در نظر گرفتن آن نیست.

مقادیر خطای محاسباتی توسط معادلات (۷) تا (۱۰) در شکل (۵) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود برای رابطه کلی، میزان خطا نسبت به روابطی که برای هر شیب به صورت مجزا ارائه شده بود، اندکی افزایش می‌یابد.

با توجه به شکل (۵) می‌توان مشاهده کرد که با افزایش عدد فرود بالادست، درصد خطا افزایش می‌یابد که علت آن این است که با افزایش عدد فرود جریان، تغییرات پروفیل سطح آب بیشتر شده و استفاده از رابطه سرریز معمولی در این حالت همراه با درصد خطای بیشتری خواهد بود.

به طور مشابه برای اعماق مشخصه دیگر (میانگین عمق ابتدا و انتها و عمق مرکزی) محاسبات انجام شد و نتایج در جدول (۲) ارائه گردید. با توجه به معادلات پیشنهادی برای سه عمق شاخص در روش تحلیل سرریز معمولی، ملاحظه می‌شود که معادله پیشنهادی با استفاده از عمق شاخص میانگین ابتدا و انتهای سرریز جانبی، متوسط درصد خطای کمتری داشته و تخمین ضریب بده با این روش دقت بیشتری نسبت به سایر روش‌ها دارد.

در شکل (۶) مقدار خطای محاسباتی از رابطه پیشنهادی در برابر ضریب بده جریان رسم شده که با توجه به شکل می‌توان مشاهده کرد که اکثر تخمین‌ها در محدوده خطای  $\pm 10\%$  قرار دارد.

تغییرات ضریب بده جریان در برابر عدد فرود جریان برای شیب‌های جداره مختلف در شکل (۴) ارائه شده است. همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود. با افزایش عدد فرود، ضریب بده جریان نیز افزایش می‌یابد. این امر به این دلیل می‌باشد که با افزایش عدد فرود، اختلاف عمق آب در بالادست و پایین دست سرریز جانبی بیشتر می‌شود و با انتخاب عمق بالادست سرریز جانبی به عنوان عمق شاخص، عمق آب روی سرریز جانبی کمتر از مقدار واقعی در نظر گرفته شده است، بنابراین مقدار بده محاسباتی کمتر از مقدار واقعی بوده و برای جریان آن ضریب بده افزایش می‌یابد. همچنین می‌توان مشاهده کرد که به طور متوسط ضریب بده جریان برای قطر چهار سانتی‌متر بیشتر از قطر هشت سانتی‌متر است. همچنین همان‌طور که از روابط توسعه داده شده برای ضریب بده نشان داده خواهد شد، با افزایش شیب جداره سرریز جانبی دوزنقه‌ای ضریب بده افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش قطر تاج سرریز، ضریب بده جریان کاهش و با افزایش شیب جداره سرریز جانبی، ضریب بده افزایش می‌یابد. مطابق شکل (۴) و همچنین تحلیل‌های انجام شده از اثر ارتفاع سرریز می‌توان صرف نظر کرد.

با توجه به تحلیل ابعادی انجام شده، ضریب بده سرریز دوزنقه‌ای تاج نیم‌دایره‌ای تابعی از چهار پارامتر بی‌بعد می‌باشد. با توجه به داده‌های آزمایشگاهی و پارامترهای مؤثر، روابطی برای هر یک از شیب‌های جداره به صورت زیر حاصل گردید.

(رابطه ۷)

$$C_d = 0.772(Fr_1)^{0.052} \times \left(\frac{y}{D}\right)^{0.01} \quad Z = 0.5$$

(رابطه ۸)

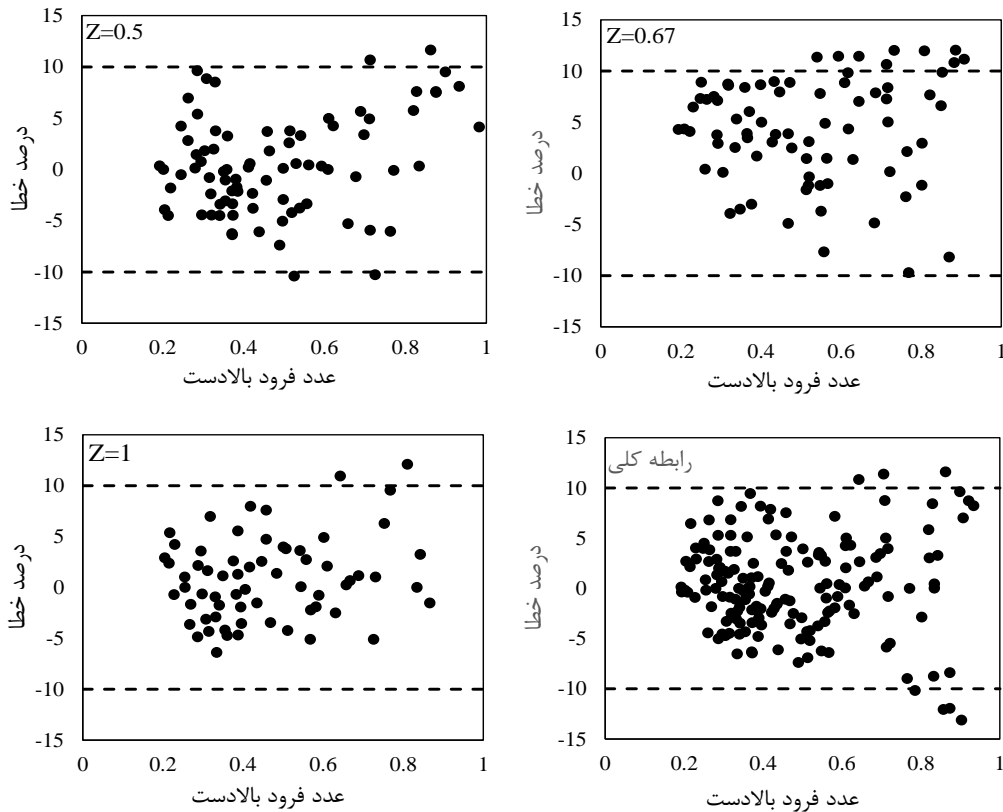
$$C_d = 0.779(Fr_1)^{0.045} \times \left(\frac{y}{D}\right)^{0.05} \quad Z = 0.67$$

(رابطه ۹)

$$C_d = 0.81(Fr_1)^{0.053} \times \left(\frac{y}{D}\right)^{0.02} \quad Z = 1$$

ضرایب برآزشی روابط پیشنهادی فوق بر اساس داده‌های آزمایشگاهی و با استفاده از حل گر اکسل و با شرط حداقل کردن مقدار متوسط قدر مطلق خطای نسبی ضریب بده، حاصل شده‌اند. برای شیب جانبی  $Z=0.5$  معادله پیشنهادی دارای خطای متوسط ۳/۶۳ درصد و حداکثر خطای ۱۲/۶۵ درصد نسبت به داده‌های آزمایشگاهی بوده، همچنین برای  $Z=0.67$  خطای متوسط معادله پیشنهادی ۳/۷ درصد و حداکثر خطای آن ۱۴/۱۲ درصد و برای  $Z=1$  متوسط خطا ۳/۲۳ درصد و حداکثر خطا ۱۰/۸

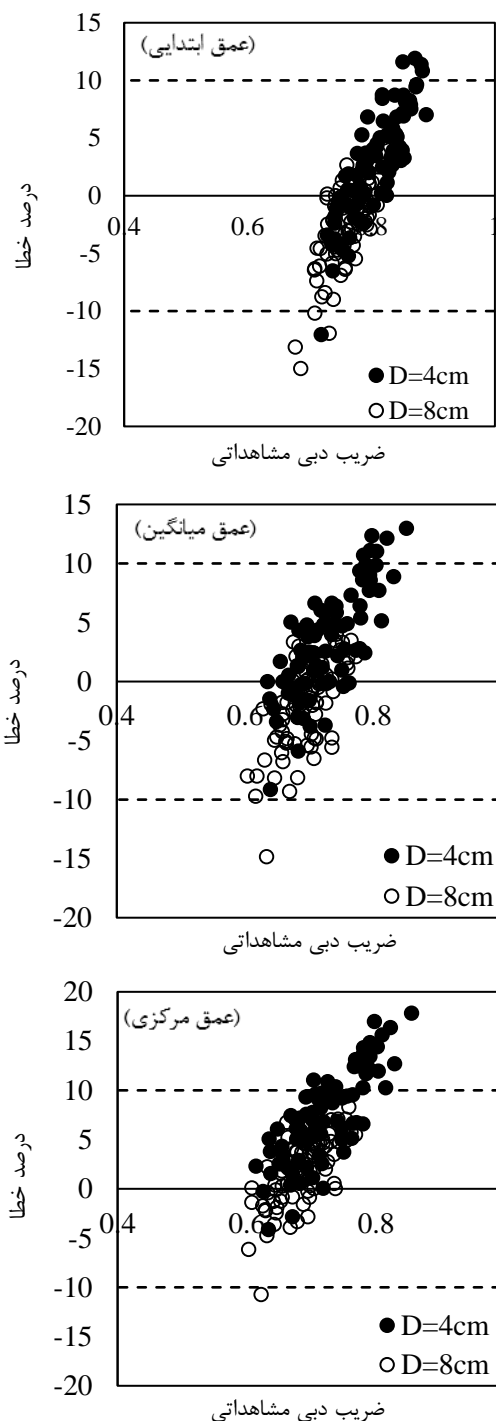




شکل ۵ - درصد خطای معادلات (۷) تا (۱۰)

جدول ۲ - روابط ارائه شده برای ضریب بده با استفاده از اعماق مشخصه متفاوت

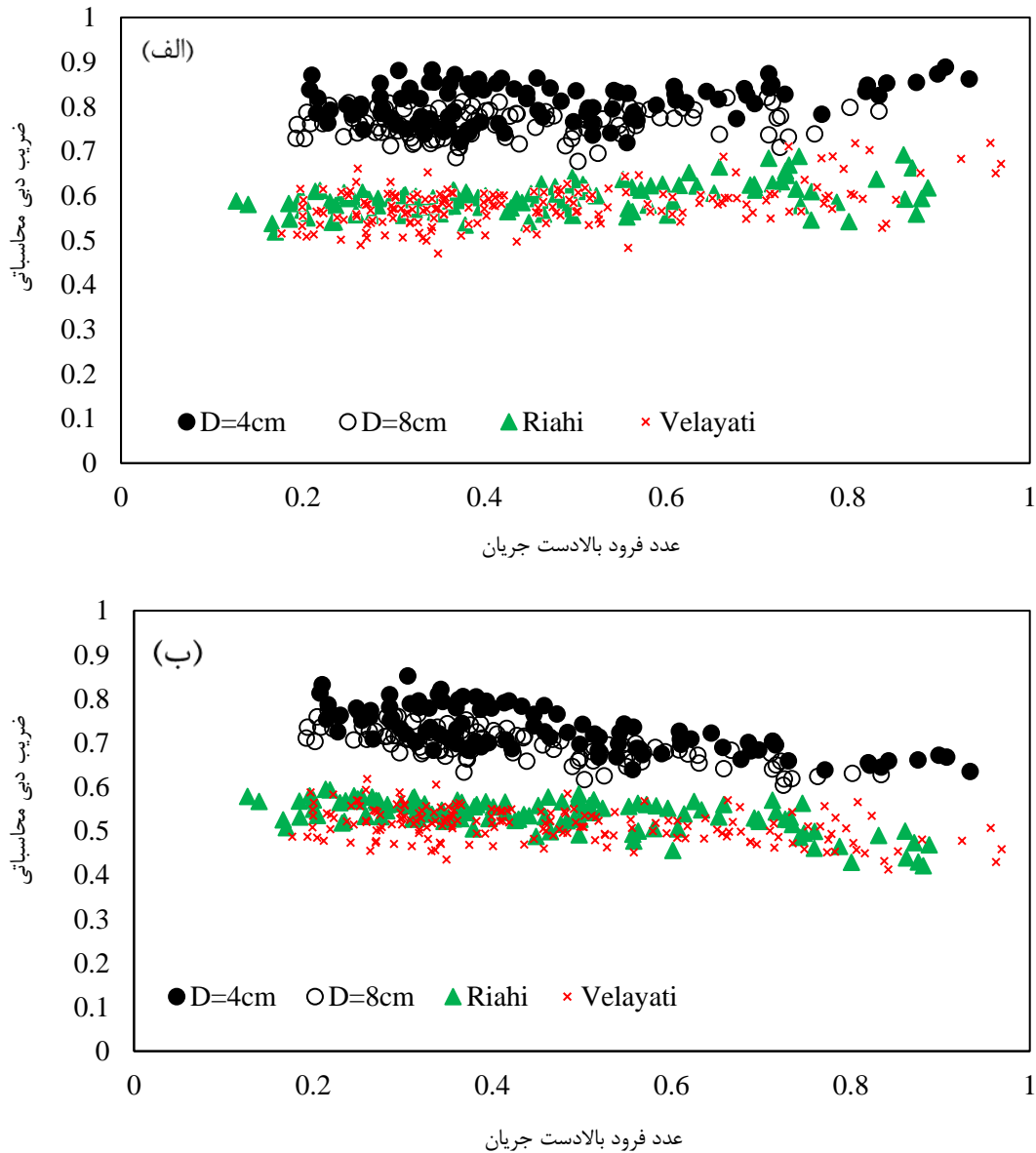
عمق مشخصه	شیب جداره	معادله	متوسط خطا	حداکثر خطا
y <sub>1</sub>	Z=0.5	$C_d = 0.772(Fr_1)^{0.052} \times \left(\frac{y}{D}\right)^{0.01}$	۳/۶۳	۱۲/۶۵
	Z=0.67	$C_d = 0.779(Fr_1)^{0.045} \times \left(\frac{y}{D}\right)^{0.05}$	۳/۷	۱۴/۱۲
	Z=1	$C_d = 0.81(Fr_1)^{0.053} \times \left(\frac{y}{D}\right)^{0.02}$	۳/۲۳	۱۰/۸
	رابطه کلی	$C_d = (0.41 + 1.02Z - 0.63Z^2)(Fr_1)^{0.052} \times \left(\frac{y}{D}\right)^{0.03}$	۳/۸	۱۵/۹
y <sub>avg</sub>	Z=0.5	$C_d = 0.607(Fr_1)^{-0.08} \times \left(\frac{y}{D}\right)^{0.04}$	۳/۱۵	۱۲/۰۵
	Z=0.67	$C_d = 0.624(Fr_1)^{-0.1} \times \left(\frac{y}{D}\right)^{0.04}$	۴/۲	۱۴/۸
	Z=1	$C_d = 0.640(Fr_1)^{-0.1} \times \left(\frac{y}{D}\right)^{0.001}$	۳/۴	۱۲/۱
	رابطه کلی	$C_d = (0.38 + 0.66Z - 0.41Z^2)(Fr_1)^{-0.1} \times \left(\frac{y}{D}\right)^{0.03}$	۳/۶	۱۵/۳
y <sub>center</sub>	Z=0.5	$C_d = 0.572(Fr_1)^{-0.09} \times \left(\frac{y}{D}\right)^{0.02}$	۳/۲۵	۱۲/۸
	Z=0.67	$C_d = 0.623(Fr_1)^{-0.08} \times \left(\frac{y}{D}\right)^{0.07}$	۴/۴	۱۴/۷۵
	Z=1	$C_d = 0.630(Fr_1)^{-0.1} \times \left(\frac{y}{D}\right)^{0.01}$	۳/۵	۱۳/۰۱
	رابطه کلی	$C_d = (0.39 + 0.6Z - 0.37Z^2)(Fr_1)^{-0.1} \times \left(\frac{y}{D}\right)^{0.04}$	۳/۸	۱۵/۶



شکل ۶ - درصد خطای تخمین ضریب بده با استفاده از رابطه پیشنهادی برای عمق‌های شاخص مختلف

سرریز لبه‌تیز و سرریز لبه‌پهن می‌باشد که این ویژگی باعث می‌شود به ازای یک دبی و ارتفاع آب یکسان روی سرریز جانبی، دبی عبوری از سرریز با تاج دایره‌ای بیشتر شده و در کنترل سطح سیلاب مؤثرتر باشد که دلیل این امر، راحتی عبور جریان از روی سرریز لبه‌گرد و شکل خط جریانی تاج سرریز می‌باشد. همچنین ملاحظه می‌گردد که با افزایش قطر تاج سرریز، ضریب دبی جریان اندکی کاهش می‌یابد.

نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج حاصل از پژوهش‌های پیشین در شکل (۷) مقایسه شده است. در شکل (۷) ضریب بده در برابر عدد فرود بالادست در سرریز جانبی دوزنقه‌ای لبه‌گرد (تحقیق حاضر)، لبه‌تیز (Riahi, 2013) و لبه‌پهن (Velaiati, 2014) مقایسه شده است. همان‌طور که از شکل ملاحظه می‌شود تغییرات ضریب بده سرریز جانبی برای دو قطر چهار و هشت سانتی‌متر روندی مشابه سرریز لبه‌پهن و لبه‌تیز دارد، با توجه به شماره‌های ارائه شده، ضریب دبی سرریز جانبی لبه‌گرد بیشتر از



شکل ۷- مقادیر ضرایب دبی تخمینی با استفاده از معادله‌های پیشنهادی در برابر عدد فرود با استفاده از روش سرریز معمولی؛ (الف) عمق شاخص ابتدای سرریز جانبی (ب) عمق شاخص میانگین عمق ابتدا و انتهای سرریز جانبی

### نتیجه‌گیری

ورودی در نظر گرفت. برای تحلیل جریان روی سرریز جانبی دوزنقه‌ای لبه‌گرد، عمق ابتدای سرریز جانبی، میانگین عمق ابتدا و انتهای سرریز جانبی و عمق مرکزی سرریز به عنوان عمق‌های شاخص برای استفاده در رابطه سرریز معمولی در نظر گرفته شدند. برای هر یک از عمق‌های شاخص، محاسبه ضریب بده سرریز انجام شد. با توجه به تحلیل ابعادی انجام شده مؤثرترین پارامترها بر ضریب بده عدد فرود بالادست و نسبت عمق به قطر لبه می‌باشند. برای توسعه معادله‌های ضریب بده و ضرایب تجربی آن‌ها از داده‌های آزمایشگاهی استفاده شد و با استفاده از حل اکسل مقدار بهینه این ضرایب با شرط حداقل کردن مقدار متوسط قدر مطلق خطای نسبی ضریب بده حاصل می‌گردد. با توجه به

در این تحقیق خصوصیات جریان روی سرریزهای جانبی دوزنقه-ای لبه‌گرد در رژیم جریان زیربحرانی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین به بررسی و تفسیر پروفیل‌های سطح آب در سه محور (محور لبه سرریز، محور مرکزی و محور انتهایی) و ضریب بده جریان روی سرریز جانبی دوزنقه‌ای پرداخته شد. محور مرکزی کانال که دارای نوسانات کم بوده و از لبه سرریز و دیواره کانال کمتر متأثر می‌شود، به عنوان بهترین محور اندازه‌گیری عمق جریان معرفی شد. در بررسی پروفیل سطح آب برای تمامی آزمایش‌ها نتیجه‌گیری شد که سطح آب در ابتدای سرریز جانبی با کاهش روبرو شده که علت آن را می‌توان جدایی جریان در اثر

سرریز باید استفاده کرد و در صورتی که هدف تخمین ضریب بده سرریز جانبی از پیش طراحی شده باشد، از هر سه عمق شاخص در تحلیل بده سرریز جانبی می‌توان استفاده کرد. تحقیق حاضر در کانالی افقی با عرض ثابت انجام شده است، پیشنهاد می‌شود آزمایشات تکمیلی برای بررسی اثرات شیب و عرض کانال نیز انجام شود.

معادله‌های پیشنهادی و شاخص آماری متوسط قدر مطلق خطای نسبی ضریب بده برای سه عمق شاخص، ملاحظه می‌شود که معادله پیشنهادی با استفاده از عمق شاخص میانگین ابتدا و انتهای سرریز جانبی، متوسط درصد خطای (۳٪/۱۶) کمتری داشته و تخمین ضریب بده با این روش کمی دقیق‌تر از سایر روش‌ها است. باید توجه نمود در صورتی که هدف از تخمین ضریب بده، طراحی سرریز جانبی باشد فقط از روش عمق شاخص ابتدای

## REFERENCES

- Azimi, H., Bonakdari, H., and Ebtehaj, I. (2017a). A highly efficient gene expression programming model for predicting the discharge coefficient in a side weir along a trapezoidal canal. *Irrigation and Drainage*, 66(4), 655-666.
- Azimi, H., Bonakdari, H., and Ebtehaj, I. (2017b). Sensitivity analysis of the factors affecting the discharge capacity of side weirs in trapezoidal channels using extreme learning machines. *Flow Measurement and Instrumentation*, 54, 216-223.
- Borghei, S. M. and Salehi, H. (2003). "Experimental study of Discharge coefficient of the side weir using Experimental model." In: *International Conference on Civil Engineering*. Isfahan University of Technology, pp. 3-10.
- Borghei, S. M., Jallili, M. R., and Ghodsian, M. (1999). "Discharge coefficient for sharp crested side weir in subcritical flow." *Journal of Hydraulic engineering*, ASCE, 125(10): 1051-1056.
- Bos, M. G. (1976). "Discharge measurement structure." *International Institute for land reclamation and improvement*, Wageningen, The Netherlands.
- Castro-Orgaz, O., and Hager, W. (2012). "Subcritical side weir flow at high lateral discharge." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 138(9): 777-787.
- 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): 410-23.
- De marchi, G. (1934). "Saggio di teotia de funzionamental degli stramazzi laterali." *L'Energia Electricia*, Rome, Italy, 11, 849-860 (in Italian).
- El-Khashab, A., and Smith, K. V. (1976). "Experimental investigation of flow over side weirs." *Journal of Hydraulics Division*, 102(9): 1255-1268.
- Emiroglu, M.E., Agaccioglu, H. and Kaya, N. (2011). "Discharging capacity of rectangular side weirs in straight open channels." *Flow Measurement and Instrumentation*, 22(4): 319-330.
- Ghodsian, M. (2003). "Supercritical flow over rectangular side weir." *Canadian Journal of Civil Engineering*, 30(3): 596-600
- Hager, W. H. (1987). "Lateral outflow over side weirs." *Journal of Hydraulic Engineering*, 113(4): 491-504.
- Hager, W. H. (1994). "Supercritical flow in circular-shaped side weir." *Journal of irrigation and drainage engineering*, ASCE, 120(1): 1-12.
- Honar, T., and Keshavarzi, A. R. (2009). "Effect of rounded edge entrance on discharge coefficient of side weir in rectangular channel." *Journal of irrigation and drainage*, 58(4): 482-491.
- Honar, T., and Mazloom Shahraki, S. (2014). Discharge Coefficient Analysis of Cylindrical and Semi-Cylindrical Side Weirs in Subcritical Flow. *JWSS-Isfahan University of Technology*, 18(69), 141-150 (In Farsi).
- Kumar, C. P. and Pathak, S. K. (1987), "Triangular side weirs," *Journal of irrigation and drainage engineering*, 113(1): 98-105.
- Muslu, Y. (2002). "Lateral weir flow model using a curve fitting analysis." *Journal of Hydraulic engineering*, ASCE, 128(7): 712-715.
- Oliveto, G., Biggiero, V., and Fiorentino, M. (2001). "Hydraulic features of supercritical flow along prismatic side weirs." *Journal of Hydraulic Research*, 39(1): 73-82.
- Parsaie, A., and Haghiabi, A. H. (2017). Prediction of side weir discharge coefficient by genetic programming technique. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 11(1).
- Rahimpuor, M., Keshavarz, Z., and Ahmadi, M. M. (2011). "Flow over trapezoidal side weir." *Flow Measurement and Instrumentation*, 22(6): 507-510.
- Ranga Raju, K. G., Gupta, S. K., and Prasad, B. (1979), "Side weirs in rectangular channels." *Journal of Hydraulic Division*, ASCE, 105(5): 547-54.
- Riahi, S. (2013). Theoretical and experimental study for a Sharp-crested trapezoidal side weir in subcritical flow regime. Thesis of master science, *University of Tehran* (In Farsi).
- Řiha, J., and Zachoval, Z. (2014). "Discharge Coefficient of a Trapezoidal Broad-Crested Side Weir for Low Approach Froude Numbers." *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(8), 06014013.
- Swamee, P. K., Santosh, K. P., and Masoud, S. A. (1994). "Side weir analysis using elementary discharge coefficient." *Journal of irrigation and drainage engineering*, 120(4): 742-755.
- Uyumaz, A., and Smith, R. H. (1991). "Design procedure for flow over side weirs." *Journal of*

*Irrigation and Drainage Engineering*, 117(1): 79-90.

Vatankhah, A. R. (2012). "New solution method for water surface profile along a side weir in a circular." *Journal of irrigation and drainage engineering*, 138(10): 948-954.

Velaiati, F. (2014). Theoretical and experimental study for a broad-crested trapezoidal side weir in subcritical flow regime. Thesis of master science, *University of Tehran* (In Farsi).