

## بررسی آزمایشگاهی هیدرولیک جریان عبوری از سرریز جانبی مثلثی لبه شیبدار در شرایط زیر بحرانی

مصطفی نیسی، سید محسن سجادی\*، محمود شفاعی بجستان و جواد احدیان<sup>۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۲/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۵/۱۴)

### چکیده

سرریزهای جانبی از سازه‌های هیدرولیکی هستند که در شبکه‌های آبیاری و زهکشی به منظور انحراف آب و یا تنظیم سطح آب مورد استفاده قرار می‌گیرند. افزایش راندمان سرریزهای جانبی با هد ثابت، از جمله دغدغه پژوهشگران هیدرولیک در دهه گذشته بوده است. استفاده از شکل‌های مختلف تاج لبه تیز، کنگره‌ای، کلید بیانویی و همچنین افزایش طول سرریز با تغییر هندسه تاج مورد بررسی قرار گرفته است. در پژوهش حاضر نوع جدیدی از سرریز جانبی به شکل مثلثی در دو حالت با لبه ساده و شیبدار در آزمایشگاه و تحت شرایط هیدرولیکی مختلف در شرایط جریان زیر بحرانی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان داد که با شیبدار کردن لبه‌های سرریز جانبی مثلثی میزان ورتکس ایجاد شده در ورودی دهانه سرریز کاهش یافته و به این دلیل ضریب دبی و حجم جریان عبوری از سرریز نسبت به حالت عادی و مستطیلی به ترتیب به میزان حدود ۲۷ درصد و ۴۸ درصد افزایش نشان می‌دهد. همچنین پس از تحلیل داده‌ها، معادله غیرخطی برای تخمین ضریب دبی با کمک پارامترهای بدون بعد نسبت عمق بالادست جریان به ارتفاع سرریز ( $y_1/p$ ) و عدد فرود بالادست جریان ( $Fr_1$ ) با دقت  $\pm 15\%$  و  $NRMSE=0/134$  ارائه شد.

واژه‌های کلیدی: سرریز جانبی، مثلثی کنگره‌ای، مدل آزمایشگاهی، ضریب دبی، راندمان

۱. گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: m.sadjadi@scu.ac.ir

## مقدمه

سازه‌های آبرگیر، کنترل و تنظیم سطح آب نقش مهمی در مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی دارند. از جمله این نوع سازه‌ها، وظیفه اصلی سرریز جانبی است که آن انحراف آب از کناره کانال اصلی به کانال دیگری یا رودخانه است که مقدار دبی عبوری از این سرریز را می‌توان به کمک معادله سرریزها به شکل زیر محاسبه کرد:

$$Q = C_D L(Y - W)^{1.5} \quad (1)$$

در این معادله  $Q$  دبی جریان،  $L$  طول سرریز جانبی،  $Y$  عمق آب در کانال اصلی،  $W$  ارتفاع آستانه لبه سرریز و  $Y$  هد آب روی تاج سرریز است. جریان در کانال اصلی و در محدوده سرریز از نوع جریان متغیر مکانی است؛ از این رو مقدار  $Y$  در طول سرریز ثابت نبوده و به کمک معادله جریان متغیر مکانی محاسبه می‌شود (۲۱). این فرض که انرژی در طول سرریز ثابت است و به کمک مشتق‌گیری نسبت به  $X$  در جهت جریان معادله نهایی تغییرات پروفیل سطح آب از معادله (۲) به دست می‌آید (۲۵):

$$\frac{dy}{dx} = \frac{s_0 - s_f - \frac{\alpha Q}{gA^2} dx}{1 - \frac{\alpha Q^2}{gA^2 D}} \quad (2)$$

که در آن  $D$  عمق هیدرولیکی و  $\frac{\alpha Q^2}{gA^2 D}$  همان  $Fr_2$  است. این معادله، معادله دینامیکی جریان متغیر مکانی با کاهش دبی است.

دیماچی (۷) اولین کسی بود که با فرض مستطیل بودن کانال اصلی، ناچیز بودن شیب کانال در محدوده سرریز و تغییر ناچیز انرژی ویژه در طول سرریز معادله زیر را استخراج کرد:

$$C_M = \frac{3B}{2L} [\Delta\phi] \quad (3)$$

$$\phi(Y, E, P) = \frac{2E - 3P}{E - P} \sqrt{\frac{E - Y}{Y - P}} - 3 \sin^{-1} \sqrt{\frac{E - Y}{E - P}} \quad (4)$$

نکته مهمی که در جریان‌های متغیر مکانی با دبی کاهنده وجود دارد، این است که برخلاف جریان‌های متغیر مکانی با دبی افزایش‌دهنده، دبی در واحد طول عبوری از روی سرریز مقدار ثابتی

نبوده و تابع هندسه و شرایط هیدرولیکی است. در سالیان گذشته پژوهشگران تلاش کرده‌اند تا بتوانند راندمان سرریز جانبی را افزایش دهند. منظور از راندمان، افزایش دبی انحرافی برای یک بار آبی ثابت است. از این رو مطالعه‌های متعددی برای پیش‌بینی ضریب دبی برای انواع مختلف هندسه تاج سرریز انجام شده است. کریسپینو و همکاران (۴) و جلیلی قاضی‌زاده و همکاران (۱۴) به بررسی اثرات جریان‌های زیر بحرانی و فوق‌بحرانی بر ضریب دبی سرریزهای جانبی پرداختند. های و تیلور (۱۳) به بررسی سرریزهای کنگره‌ای پرداختند. آنها به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف از جمله هندسه در پلان، افزایش طول تاج سرریز و تعداد سیکل‌های سرریز کنگره‌ای پرداختند که در نهایت یک برنامه برای تخمین راندمان سرریز ارائه شد. دورجا راوو و پیلایی (۸) به کمک اصل مومنتوم به بررسی جریان متغیر تدریجی در سرریزهای جانبی تحت شرایط زیربحرانی و در محدوده اعداد فرود ۱/۵ تا ۳ پرداختند. خشاب و اسمیت (۱۰) به بررسی تغییرات انرژی جریان متغیر تدریجی کاهنده در طول بازشدگی پرداختند و در این بررسی از معادلات حاصل از اصل مومنتوم کمک گرفتند. رانجا راجا و همکاران (۲۲) به بررسی مشخصات جریان در هر دو نوع سرریز جانبی لبه تیز و لبه پهن در دو حالت زیر بحرانی و فوق بحرانی پرداختند. در این پژوهش روابط ارائه شده توسط دی مارچی برای این حالات مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که روابط یادشده به عدد فرود انتهایی بالادست و ارتفاع آب روی سرریز وابسته هستند. سابرامانیا و همکاران (۲۶) جریان عبوری از سرریزهای جانبی لبه تیز در کانال‌های مستطیلی را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داد. در این آزمایش‌ها هر دو رژیم جریان زیربحرانی و فوق بحرانی را بررسی کرده و نتایج با روابط ارائه شده توسط دی مارچی مطابقت بسیار خوبی را نشان دادند. هگر (۱۲) و پادیرانا و همکاران (۲۱) به کمک روش‌های مبتنی بر انرژی، اثرات کاهش اصطکاک را در کانال اصلی بررسی و تأثیر آن بر دبی عبوری از سرریز مورد ارزیابی قرار دادند.

بررسی دقیق تری قرار داد. ایشان علاوه بر ارائه معادله زیر برای تخمین ضریب دبی اظهار داشتند که بر اساس نتایج حاصله در این مدل پیشنهادی، ضریب دبی به میزان ۳۹ درصد و راندمان (افزایش دبی سرریز) به میزان ۷۸ درصد نسبت به سرریزهای جانبی مستطیلی افزایش یافته است. صادقان و همکاران (۲۳) نیز روی سرریز جانبی مثلثی ولی با کف شیبدار مطالعه‌های آزمایشگاهی انجام دادند. در این مطالعه که در شرایط جریان زیر بحرانی انجام شد، معادله (۷) برای تخمین ضریب دبی در این نوع سرریز ارائه شد:

$$C_M = -0.564 \sin(\delta/2)^{0.012} + Fr_1^{0.018} - 0.309 \left( \frac{y_1}{w} \right)^{-2.380} \quad (7)$$

نوروزی و همکاران (۱۸) به صورت آزمایشگاهی و عددی به بررسی گردابه‌های ایجاد شده در بالادست دریچه کشویی پرداختند. در این پژوهش که روی ۲۰۰ نمونه اثرات اشکال مختلف آستانه مورد بررسی قرار گرفتند، نتایج نشان داد استفاده از دریچه با آستانه باعث کاهش مقدار هوای ورودی به سیال می‌شود. با افزایش عرض آستانه، شدت گرداب کاهش می‌یابد و این کاهش با افزایش دبی خروجی تقویت می‌شود.

عبادزاده و همکاران (۹) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر آستانه با اشکال هندسی نیم استوانه، استوانه، هرم و مکعب مستطیل در عرض‌های مختلف ۵، ۷، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر در زیر دریچه کشویی پرداختند. نتایج نشان داد که قرار دادن آستانه در زیر درجه کشویی باعث افزایش سرعت افقی جریان می‌شود. همچنین ورود هوا به سیال از لایه‌های سطحی منجر به تشکیل پدیده گرداب در نیمرخ جریان می‌شود. باتوجه به مرور منابع مشخص شد که راندمان سرریزهای جانبی با تاج مثلثی نسبت به سایر روش‌ها بیشتر است، از این رو نیازمند مطالعات بیشتری است. به همین منظور در مطالعه حاضر از سرریز مثلثی ولی با لبه شیبدار و دیواره‌های غیرمتمارن استفاده شده است تا تأثیر این نوع سرریز بر میزان افزایش ضریب دبی و نیز راندمان دبی انحرافی بررسی شود.

در همین راستا هگر (۱۲) معادله (۵) را برای تخمین ضریب دبی سرریز جانبی مستطیلی ارائه داد که در آن عدد فرود بالادست سرریز است.

$$C_M = 0.485 \left( \frac{2 + (Fr)^2}{2 + 3(Fr)^2} \right)^{0.5} \quad (5)$$

آیدین و کایسلی (۲) و برقی و پروانه (۳) اثر هندسه سرریز جانبی را بر ظرفیت آبگذری دبی از سرریز جانبی با معرفی عامل شکل و اصلاح معادلات برای یک سرریز جانبی مستطیلی و تبدیل آن به سرریزهای مثلثی، دوزنقه‌ای و لایرانت مورد بررسی قرار دادند. انصاری و پاتیل (۱) و خانی و شعبانلو (۱۵) به بررسی اشکال مختلف کانال‌ها شامل دایره‌ای، سهموی، مثلثی و دوزنقه‌ای و تأثیر آن بر عملکرد سرریز جانبی پرداختند. پژوهشگران دیگر از جمله مارانزونی و تامیروتی (۱۷) و صفار و همکاران (۲۴) به بررسی عددی سرریزها و مدل‌سازی و شبیه‌سازی عملکرد آنها به کمک نرم‌افزارهایی در زمینه دینامیک محاسباتی سیالات (CFD) پرداختند. امیرقلو و همکاران (۱۱) با هدف ارتقاء بهره‌وری و راندمان در سرریزهای جانبی کنگره‌ای، مدل پیشنهادی خود را به‌عنوان سرریز جانبی مثلثی معرفی و مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با تحلیل داده‌های آزمایشگاهی، معادله (۶) را برای پیش‌بینی ضریب دبی دیمارچی در سرریز جانبی مثلثی با کف افقی ارائه دادند.

$$C_M = \left[ 18.6 - 23.535 \left( \frac{L}{B} \right)^{0.012} + 6.769 \left( \frac{L}{t} \right)^{0.112} - \left[ 0.502 \left( \frac{w}{y_1} \right)^{4.024} + 0.094 \sin \delta - 0.393 Fr_1^{2.155} \right] \right]^{-1.431} \quad (6)$$

پروانه و همکاران (۱۹) به بررسی جزئیات طرح جدیدی برای سرریزهای جانبی کنگره‌ای در شرایط زیر بحرانی پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که ضریب دبی سرریز جانبی کنگره‌ای نامتمارن به ترتیب تا ۱/۶ و ۲/۳۵ برابر دارای راندمان بیشتر نسبت به نوع متمارن و مستطیلی است. در مطالعه دیگری پروانه و همکاران (۲۰) سرریز جانبی مثلثی مطالعه صادقان را مورد

## مواد و روش‌ها

## آنالیز ابعادی

در این پژوهش همان‌گونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، پارامترهای تأثیرگذار بر ضریب دبی را می‌توان به شرح معادله (۸) بیان کرد:

$$f(y_u, L, l_1, l_2, P, B, \mu, g, \rho, \sigma, Q_i, S_0, \theta) = 0 \quad (8)$$

که در آن  $y_u$  عمق آب بالادست سرریز،  $yt$  عمق آب پایین دست سرریز،  $y$  ارتفاع آب روی سرریز،  $L$  طول سرریز جانبی،  $l_1$  طول ضلع بالادست سرریز مثلی،  $l_2$  طول ضلع پایین دست سرریز مثلی،  $P$  ارتفاع سرریز،  $B$  عرض کانال اصلی،  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی،  $\sigma$  کشش سطحی،  $\rho$  چگالی آب،  $Q_i$  دبی کانال اصلی،  $Q_w$  دبی روی سرریز و  $S_0$  شیب کف کانال و  $\theta$  شیب لبه دیواره سرریز مثلی است. پارامترهای بدون بعد مؤثر در تخمین ضریب دبی سرریز جانبی مثلی لبه شیبدار در معادله (۹) نشان داده شده است:

$$f(Fr, Re, w_e, \frac{L}{y_u}, \frac{B}{y_u}, \frac{l_1}{y_u}, \frac{l_2}{y_u}, \frac{y_u}{P}, \frac{y_u}{B}, \frac{l_1}{l_2}, S_0, \theta) = 0 \quad (9)$$

از آنجایی که عدد رینولدز در این پژوهش در محدوده ۱۲۲۱۲۶ تا ۱۳۹۱۸۷ است، به دلیل شرایط جریان متلاطم می‌توان از اثرات این پارامتر صرف نظر کرد (۶). همچنین به دلیل ایجاد عمق بیشتر از ۳ سانتی‌متر بر روی سرریز، می‌توان از اثرات کشش سطحی و عدد وبر صرف نظر کرد (۵). از این رو با صرف نظر از  $S_0$  به دلیل صفر بودن شیب کانال و توضیحات گفته شده و شرایط جریان از تأثیر نیروهای لزجی و کشش سطحی و دو عدد رینولدز و وبر که نماینده این دو نیرو هستند، صرف نظر می‌شود. در ادامه به منظور محاسبه معادله ضریب دبی سرریز جانبی مثلی لبه شیبدار، به کمک تئوری باکینگهام و صرف نظر از کشش سطحی به دلیل شرایط جریان متلاطم، به معادله بدون بعد (۱۰) می‌رسیم:

$$C_d = f(Fr, \frac{y_u}{P}, \frac{l_1}{l_2}, \theta) \quad (10)$$

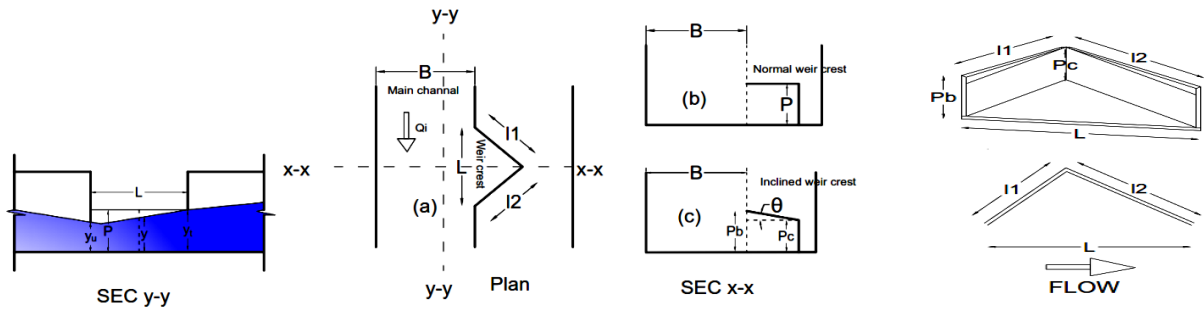
## امکانات و انجام آزمایش

برای رسیدن به اهداف این پژوهش مدل‌های مختلفی از سرریز جانبی مثلی با لبه شیبدار و دیواره‌های غیرمقارن ساخته شد. سپس این مدل‌ها در شرایط هیدرولیکی مختلف آزمایش شد. برای این منظور از فلوم به طول ۱۲ متر، عرض ۰/۸ متر و ارتفاع ۰/۶ متر استفاده شد. (شکل ۲) دیواره‌های فلوم از جنس پلکسی‌گلاس و کف آن از ورق استیل ساخته شده است. فلوم در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست دانشگاه شهید چمران اهواز قرار دارد. برای انجام این مطالعه عرض فلوم توسط ورق به ضخامت ۱۰ میلی‌متر به دو قسمت ۴۰ سانتی‌متر و ۳۹ سانتی‌متر تقسیم شد (شکل ۳). در فاصله ۴ متری از مخزن آرام‌کننده جریان، سرریز جانبی مستطیلی به طول ۴۰ سانتی‌متر ایجاد شد. مدل‌های مختلف سرریز مثلی نیز در همین ناحیه مورد آزمایش قرار گرفت.

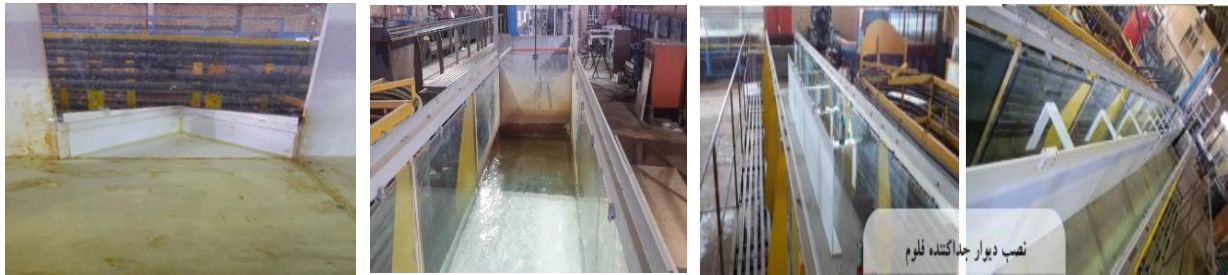
در این پژوهش تعداد ۲۰ مدل سرریز جانبی مورد بررسی قرار گرفت که شامل ۳ مدل سرریز جانبی مستطیلی، ۳ مدل سرریز جانبی مثلی مقارن با لبه ساده، ۴ مدل سرریز جانبی مثلی مقارن لبه شیبدار و ۱۰ مدل سرریز جانبی مثلی نامقارن لبه شیبدار با نسبت‌های ۱/۳ و ۱/۷ هستند شکل ۴. جزئیات مدل‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

همچنین در شکل ۴ نحوه نامگذاری پارامترهای مورد استفاده را نسبت به جهت جریان نشان داده است. در این جدول  $L$  طول دهانه بازشو (ورودی سرریز جانبی)،  $l_1$  طول ضلع بالادست سرریز،  $l_2$  طول ضلع پایین دست سرریز،  $P_b$  ارتفاع سرریز در قاعده مثلث و  $P_c$  ارتفاع سرریز در رأس سرریز مثلی هستند.

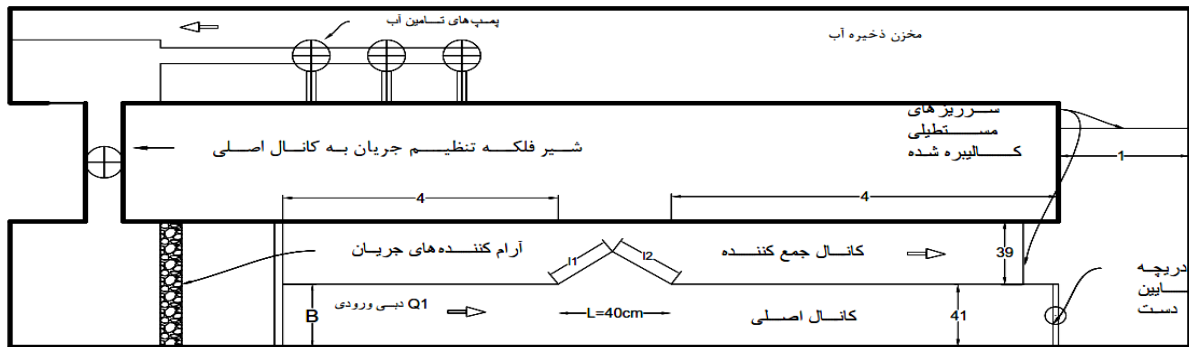
در این مطالعه پس از قرار دادن مدل سرریز مد نظر در دیواره جانبی کانال (با عرض ۴۰ سانتی‌متر)، پمپ روشن می‌شود. به کمک شیر نصب شده روی لوله ورودی آب به فلوم، مقدار دبی مد نظر تنظیم می‌شود. جریان پس از ورود به فلوم، در ابتدا آرام شده و سپس در طول فلوم ادامه می‌یافت. عمق آب در فلوم توسط دریچه‌ای که در پایین دست فلوم ۴۰ سانتی‌متر قرار داشت، تنظیم می‌شود. پس از برقراری کامل جریان تراز سطح



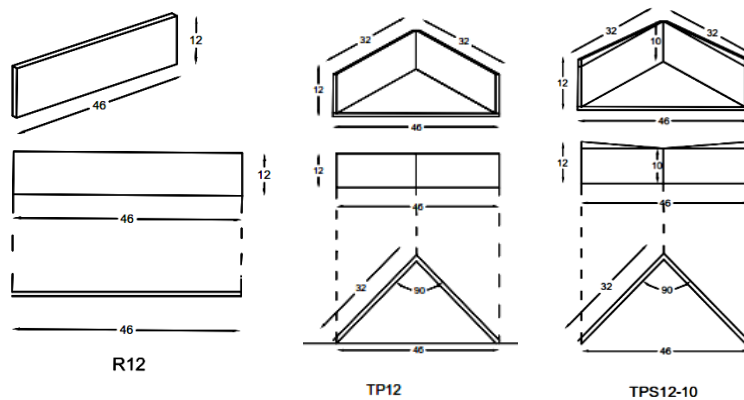
شکل ۱. پارامترهای تأثیرگذار بر ضریب دبی



شکل ۲. نمای فلوم، مدل سرریز مثلثی لبه شیبدار نصب شده، دریچه پایین دست، دیواره جداکننده



شکل ۳. پلان شماتیک فلوم آزمایشگاهی



شکل ۴: تصویر شماتیک سه تیپ سرریز مورد آزمایش (سرریز مستطیلی، مثلثی لبه ساده و مثلثی لبه شیبدار)

جدول ۱. نام و مشخصات مدل‌های پیشنهادی

ردیف	مدل	L	l <sub>1</sub>	l <sub>2</sub>	P <sub>b</sub>	P <sub>c</sub>
۱	R8	۴۰	*	*	*	*
۲	R10	۴۰	*	*	*	*
۳	R12	۴۰	*	*	*	*
۴	TP8	۴۰	۳۲	۳۲	۸	۸
۵	TP10	۴۰	۳۲	۳۲	۱۰	۱۰
۶	TP12	۴۰	۳۲	۳۲	۱۲	۱۲
۷	TPS12-11	۴۰	۳۲	۳۲	۱۲	۱۰
۸	TPS12-10	۴۰	۳۲	۳۲	۱۲	۱۰
۹	TPS10-9	۴۰	۳۲	۳۲	۱۰	۸
۱۰	TPS10-8	۴۰	۳۲	۳۲	۱۰	۸
۱۱	TA1.3P10	۴۰	۳۴	۲۶	۱۰	۱۰
۱۲	TA1.3PS10-8	۴۰	۳۴	۲۶	۱۰	۸
۱۳	TA0.7P12	۴۰	۲۶	۳۴	۱۲	۱۲
۱۴	TA0.7P10	۴۰	۲۶	۳۴	۱۰	۱۰
۱۵	TA0.7PS12-10	۴۰	۲۶	۳۴	۱۲	۱۰
۱۶	TA0.7PS10-8	۴۰	۲۶	۳۴	۱۰	۸
۱۷	TA1.7P12	۴۰	۳۹	۲۳	۱۲	۱۲
۱۸	TA1.7P10	۴۰	۳۹	۲۳	۱۰	۱۰
۱۹	TA1.7PS12-10	۴۰	۳۹	۲۳	۱۲	۱۰
۲۰	TA1.7PS10-8	۴۰	۳۹	۲۳	۱۰	۸

آب توسط عمق سنج با دقت ۱ میلی‌متر و در شبکه‌ای از نقاط، نشان داده شده در شکل ۵، برداشت می‌شود. به منظور نمایش نمودارها از محورهای بدون بعد  $X^*$ ،  $Y^*$  و  $Z^*$  استفاده شده است.

(نسبت فاصله از انتهای بالادست سرریز به عرض سرریز  $(X^* = \frac{X}{W})$ )

(نسبت عمق جریان روی سرریز به ارتفاع سرریز  $(Y^* = \frac{Y}{P})$ )

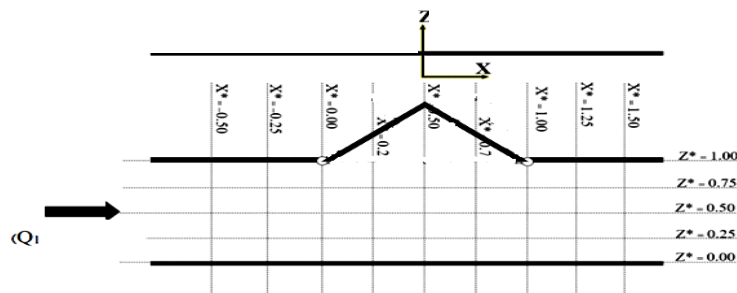
(نسبت فاصله از سرریز به عرض کانال اصلی  $(Z^* = \frac{Z}{B})$ )

محدوده محورهای بدون بعد فوق به شرح زیر هستند:

$X^* = 0/5$  از عدد  $0/5$  - (بالادست سرریز جانبی) تا  $1/50$  + (پایین دست سرریز جانبی)

$Y^* = 0$  از عدد  $0$  (عدم عبور جریان از سرریز) تا  $0/60$  به صورت متغیر

$Z^* = 0$  از عدد  $0$  (نزدیک جداره کانال اصلی) تا  $1/00$  (روی تاج سرریز جانبی)



شکل ۵. مش بندی و شبکه بندی برای برداشت نقاط در کانال اصلی

مورد بررسی، با افزایش عدد فرود بالادست، ضریب دبی برای مدل‌های پیشنهادی روند کاهشی از خود نشان می‌دهد. البته این کاهش در سرریز جانبی مثلثی لبه شیبدار بسیار بیشتر بوده و در محدوده فرود ۰.۵ تا ۰.۶، تقریباً همه مدل‌ها به یک همگرایی نسبی در ضریب دبی می‌رسند.

این کاهش حجم جریان عبوری و به تبع آن کاهش ضریب دبی با افزایش عدد فرود را می‌توان به گردابه‌های قوی‌تری که با افزایش عدد فرود بالادست ایجاد می‌شوند، نسبت داد.

در ادامه شکل ۸ برای دو عدد فرود ۰/۲۷ و ۰/۵۳، گردابه‌های ایجاد شده در دهانه را برای سرریز جانبی مثلثی لبه شیبدار نشان می‌دهد. با افزایش فرود بالادست و ایجاد گردابه قوی‌تر، جریان‌های برگشتی قوی‌تری ایجاد شده و حجم جریان عبوری از تاج سرریز را کاهش می‌دهند.

در این پژوهش از معادله (۱۱) برای بررسی راندمان سرریز جانبی استفاده شده است. مارانزونی و همکاران (۱۶) برای بررسی راندمان سرریزهای جانبی از این معادله استفاده کردند. این معادله تابعی از فرود پایین دست ( $Fr_2$ ) و نسبت عمق پایین دست جریان به ارتفاع سرریز ( $Y_2/P$ ) است. ایشان ضرایب  $\alpha$  و  $c$  را به ترتیب ۰/۸۱۸ و ۰/۶۱۵۵ تخمین زدند.

$$\varepsilon = \frac{Q_s}{Q_i} = 1 - \frac{1}{c \times \left( \frac{Y_2}{Fr_2 \times P} \right)^\alpha} \quad (11)$$

$$\eta = \left( \frac{Y_2}{Fr_2 \times P} \right)^\alpha \quad (12)$$

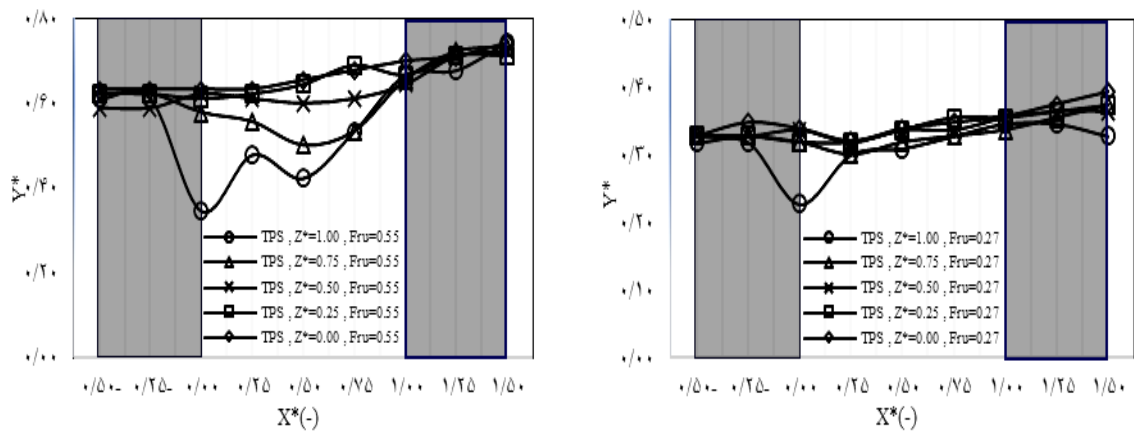
شکل ۹ نشان می‌دهد که با کاهش سرعت در پایین سرریز

## نتایج و تحلیل

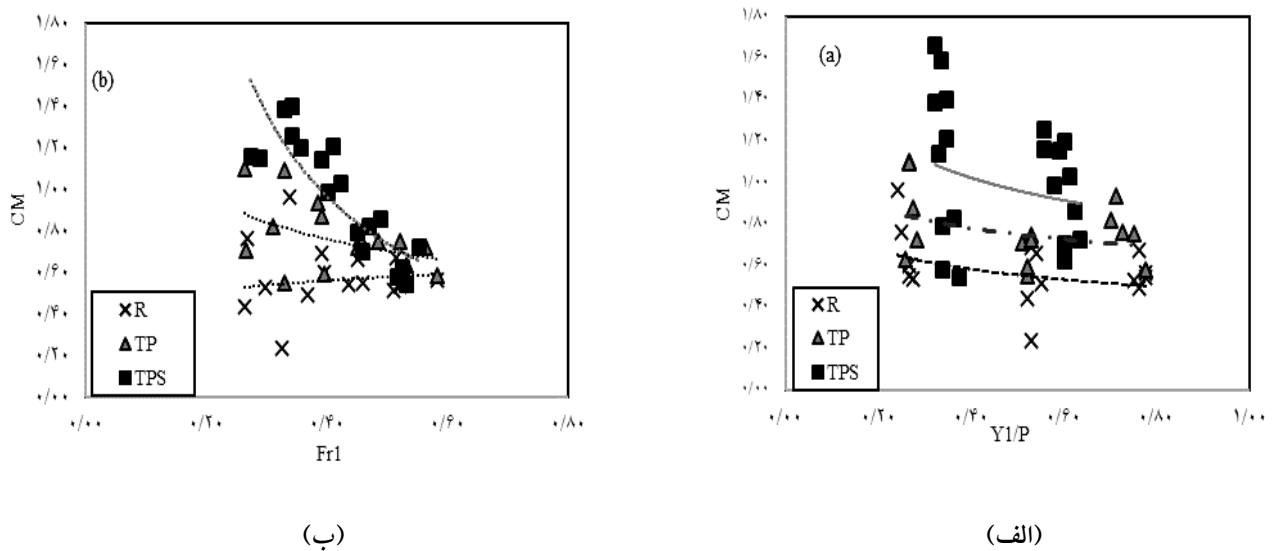
### پروفیل سطح آب

پروفیل سطح آب برای سرریز جانبی مثلثی لبه شیبدار در جهت محورهای طولی و عرضی در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که در مطالعات پیشین روی سرریز جانبی کنگره‌ای گفته شده است، در جریان زیر بحرانی سطح آب در طول سرریز جانبی بعد از یک افتادگی در انتهای بالادست سرریز، تا انتهای پایین دست سرریز جانبی افزایش می‌یابد. پایین افتادگی در انتهای بالادست سرریز جانبی به دلیل شتاب جریان ناشی از جریان جانبی و عرضی است. الگوی عمومی پروفیل‌های سطح آب برای تمامی مدل‌های سرریز جانبی پیشنهادی این پژوهش تقریباً شبیه آنچه در شکل ۶ نشان داده شده است، می‌باشد.

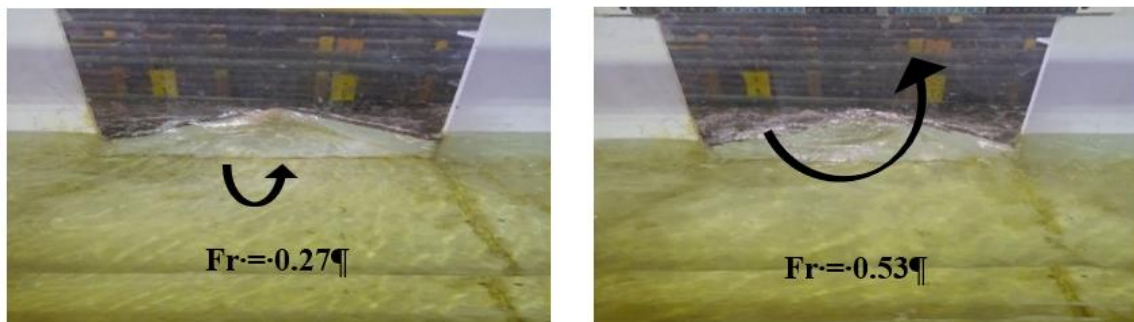
در شکل ۷- الف تأثیر لبه‌های شیبدار بر ضریب دبی سرریز جانبی مثلثی نشان داده شده است. همان‌گونه که از نمودار به دست می‌آید، ضریب دبی در همه مدل‌ها با افزایش نسبت بدون بعد  $Y_1/P$  روند کاهش دارد. در مقادیر کمتر نسبت بدون بعد  $Y_1/P$ ، جریان عبوری از تاج سرریز جانبی با جریان‌های تداخلی کمتری تخلیه می‌شود. به خصوص این موضوع در مورد سرریز جانبی مثلثی لبه شیبدار با اختلاف زیادی نسبت به مدل‌های دیگر مشهود است. در حالیکه با افزایش نسبت  $Y_1/P$ ، جریان‌های طولی و به دنبال آن تداخلات جریان‌های عرضی در مجاورت تاج سرریز قوی‌تر شده که باعث کاهش حجم جریان عبوری از سرریز شده و به تبع آن ضریب دبی نیز روند کاهش نشان می‌دهد. در شکل ۷- ب دیده می‌شود که در محدوده اعداد فرود



شکل ۶. مقایسه پروفیل‌های بدون بعد عمق آب در مدل TPS و عدد فرود ۰/۲۷ و ۰/۵۵

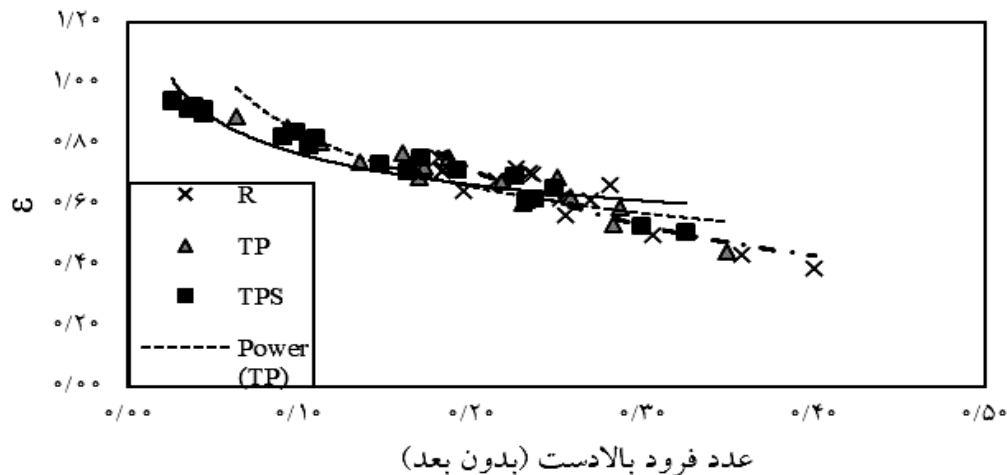


شکل ۷. ضریب دبی در مقابل  $Y1/P$  و  $Fr1$  برای مدل‌های R، TP و TPS



شکل ۸. مقایسهٔ ورتکس‌های ایجاد شده در دهانه ورودی سرریز TPS در فرودهای ۰/۲۷ و ۰/۵۳





شکل ۹. راندمان (ε) در مقابل عدد فرود بالادست برای مدل‌های R، TP و TPS

تخمین دبی در مدل پیشنهادی ارائه شد. به منظور تعیین بهترین معادله از ضریب تعیین ( $R^2$ )، جذر مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) و انحراف درجه دوم وزنی (WQD) که به صورت زیر تعریف می‌گردند، استفاده شده است:

$$\text{Normalized Root Mean Square Error (NRMSE)} = \sqrt{\frac{\sum (F(X) - f(X))^2}{\sum (f(x) - f)^2}} \quad (15)$$

$$\text{Weighted Quadratic Deviation (WQD)} = \frac{\sqrt{\sum f(X) \cdot F(X) \cdot [F(X) - f(X)]^2}}{\sum [f(X) - F(x)]} \quad (16)$$

که در آن مقدار اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه،  $F(X)$  مقدار به دست آمده از معادله،  $\bar{f}$  متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده و  $x$  پارامتر مستقل است. گفتنی است که هر چه مقادیر NRMSE و WQD کمتر باشند، معادله پیشنهادی به واقعیت نزدیکتر است. پس از ارزیابی متغیرها، در نهایت معادله (۱۷) با کمترین مقدار NRMSE و بیشترین مقدار  $R^2$  برای پیش‌بینی  $C_m$  در سرریز جانبی مثلثی لبه شیبدار پیشنهاد شد:

$$C_m = -3.1 \times (Fr)^{1.3} - 2.35 \times \left(\frac{Y_1}{P}\right)^{4.72} + 1.4 \quad (17)$$

در شکل ۱۱ ضریب دبی حاصل از معادله پیشنهادی با ضریب دبی آزمایشگاهی مقایسه شده است. همان‌طور که نشان داده شده است،

جانبی و به تبع آن کاهش عدد فرود پایین دست، به دلیل افزایش عمق جریان، دبی جریان عبوری از سرریز جانبی افزایش پیدا می‌کند. در بین مدل‌های این پژوهش، مدل پیشنهادی سرریز جانبی مثلثی لبه شیبدار راندمان و عملکرد بهتری را نسبت به دیگر مدل‌ها نشان می‌دهد.

شکل ۱۰ راندمان مدل‌های R، TP و TPS را در مقابل نسبت بدون بعد  $\eta$  نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودار نشان داده شده است، سرریز جانبی مثلثی لبه شیبدار TPS به دلیل وجود شیب ایجاد شده در تاج و هدایت جریان به سمت رأس مثلث و کاهش گردابه و جریان‌های برگشتی در دهانه ورودی سرریز، از راندمان بیشتری نسبت به مدل‌های دیگر برخوردار است.

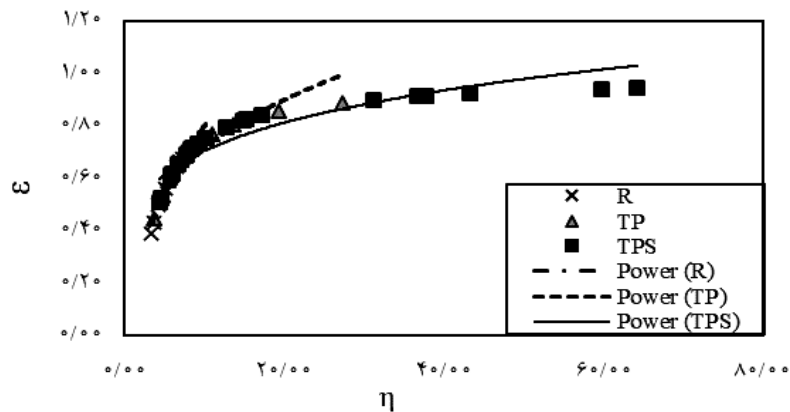
### معادله ضریب دبی

دی مارچی در سال ۱۹۳۴ معادله (۹) را به منظور تخمین ضریب دبی سرریز جانبی مستطیلی ارائه داد:

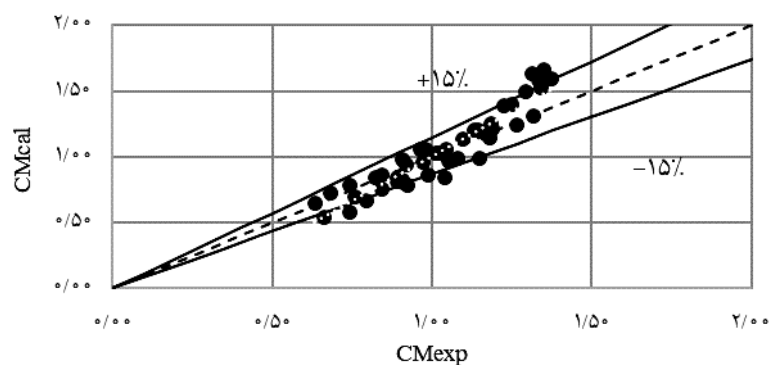
$$C_M = \frac{3B}{2L} [\Delta\phi] \quad (13)$$

$$\phi(Y, E, P) = \frac{2E - 3P}{E - P} \sqrt{\frac{E - Y}{Y - P}} - 3 \sin^{-1} \sqrt{\frac{E - Y}{E - P}} \quad (14)$$

در این معادله  $\phi_1$  و  $\phi_2$  به ترتیب خصوصیات جریان در بالادست و پایین دست سرریز است. در ادامه به کمک ترکیب پارامترهای بدون بعد مؤثر بر ضریب دبی در نرم‌افزار SPSS، معادله پیشنهادی برای



شکل ۱۰. راندمان (ε) در مقابل نسبت بدون بعد (η) برای مدل‌های R، TP و TPS



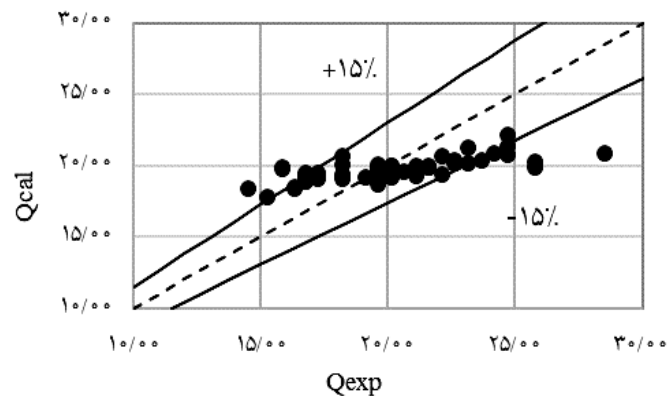
شکل ۱۱. مقایسه ضریب دبی آزمایشگاهی (CMexp) در مقابل ضریب دبی محاسباتی (CMcal)

### نتیجه گیری

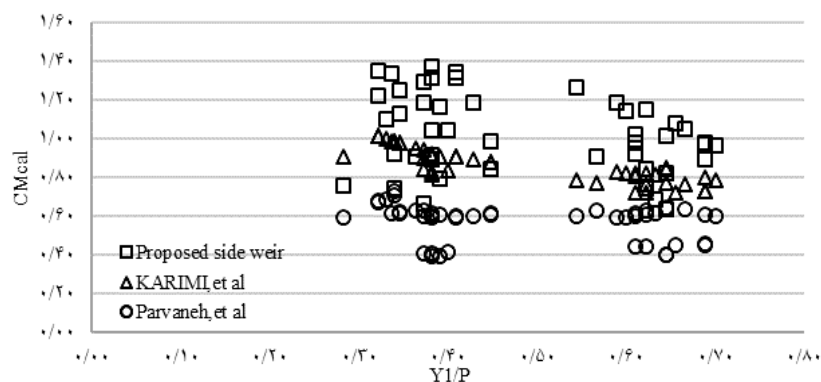
پژوهش حاضر به بررسی نوع جدیدی از سرریز جانبی مثلثی پرداخته است. برخلاف سرریز جانبی مثلثی عادی، مدل پیشنهادی سرریز جانبی مثلثی با لبه شیبدار است. نتایج نشان داد که با شیبدار کردن لبه‌های سرریز جانبی مثلثی، میزان گردابه‌های ایجاد شده در ورودی دهانه سرریز، کاهش یافته و به این دلیل ضریب دبی و حجم جریان عبوری از سرریز نسبت به حالت عادی و مستطیلی به ترتیب به میزان ۲۷ درصد و ۴۸ درصد افزایش نشان می‌دهد. در این پژوهش در مجموع تعداد ۱۰۰ آزمایش و در ۴۵۰۰ نقطه عمق جریان برداشت شد که در پایان پس از بررسی و تحلیل نتایج معادله غیرخطی برای تخمین ضریب دبی با کمک پارامترهای بدون بعد، نسبت عمق بالادست جریان به ارتفاع سرریز  $(y_i/p)$  و عدد فرود بالادست جریان  $(Fr_1)$  با دقت  $\pm 15\%$  و  $NRMSE=0/134$  ارائه شد.

خطای این معادله در حدود  $\pm 15\%$  است. همچنین با کمک ضریب دبی پیشنهادی و جاگذاری آن می‌توان دبی محاسباتی را به دست آورده و با دبی آزمایشگاهی مقایسه کرد.

شکل ۱۲ بر اساس این نمودار خطای برآورد شده  $\pm 15\%$  است. همچنین  $NRMSE=0/134$  و  $WQD=0/02$  به دست آمد. در شکل ۱۳ ضریب دبی سرریز جانبی مثلثی لبه شیبدار با دو مدل سرریز جانبی مثلثی با کف شیبدار و سرریز جانبی مثلثی نامتقارن تحت شرایط مشابه مقایسه شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، ضریب دبی سرریز جانبی مثلثی پیشنهادی به خصوص در محدوده کوچکتر عدد فرود بالادست از دو مدل سرریز جانبی حدود ۵۵٪ بیشتر است. این روند با افزایش مقدار عدد فرود بالادست روند کاهشی داشته؛ به طوری که در محدوده اعداد فرود ۰/۲۵ تا ۰/۳۵ ضریب دبی سه مدل سرریز جانبی تقریباً برابر ۰/۸ است که علت آن را می‌توان ایجاد گردابه‌های قوی‌تر در دهانه ورودی سرریز جانبی بیان کرد.



شکل ۱۲. مقایسه دبی آزمایشگاهی ( $Q_{exp}$ ) در مقابل دبی محاسباتی ( $Q_{cal}$ )



شکل ۱۳. مقایسه نتایج پژوهش حاضر با سایر پژوهشگران

جریان به سمت سرریز جانبی کمک کرده و جریان عبوری از تاج سرریز را افزایش می‌دهند. این مدل پیشنهادی سرریز می‌تواند در نمونه‌های عملی در شبکه‌ها به افزایش راندمان و بهره‌وری سرریزهای موجود کمک نماید.

همچنین نتایج نشان داد که در شرایط مشابه جریان، بهره‌وری و ضریب دبی سرریز جانبی مثلثی لبه شیبدار نسبت به سرریز جانبی مثلثی با کف شیبدار حدود ۵۵٪ بیشتر است. مشاهدات نشان داد که لبه‌های شیبدار به هدایت

#### منابع مورد استفاده

1. Ansari, U. S. and L. G. Patil. 2020. Numerical analysis of triangular labyrinth side weir in triangular channel. *ISH Journal of Hydraulic Engineering* 28(1): 141-148. <https://doi.org/10.1080/09715010.2020.1715269>.
2. Aydin, M. and K. Kayisli. 2016. Prediction of discharge capacity over two- cycle labyrinth side weir using ANFIS. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 142(5): 06016001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001006](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001006).
3. Borghei, S. M. and A. Parvaneh. 2011. Discharge characteristics of a modified oblique side weir in subcritical flow. *Flow Measurement And Instrumentation* 22 (5): 370–376. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2011.04.009>.
4. Crispino, G., L. Cozzolino, R. Della Morte and C. Gissoni. 2015. Supercritical low-crested bilateral weirs: Hydraulics and design procedure. *Journal of Applied Water Engineering and Research* 3(1): 35–42. <https://doi.org/10.1080/23249676.2015.1026852>.
5. Daneshfaraz, R., R. Norouzi and H. Abbaszadeh. 2023. Effect of geometric shapes of chimney weir on discharge coefficient. *Journal of Applied Water Engineering and Research* 12(1): 27–38. <https://doi.org/10.1080/23249676.2023.2192977>

6. Daneshfaraz, R., R. Norouzi, J. Patrick Abraham, P. Ebadzadeh, B. Akhondi and M. Abar. 2023. Determination of flow characteristics over sharp-crested triangular plan form weirs using numerical simulation. *Water Science* 37(1): 211-224.
7. De-Marchi, G. 1934. Essay on the performance of lateral weirs. *L' Energia Elettrica* 11:(11): 849-860.
8. Durga Rao, K. H. V. and C. R. S. Pillai. 2008. Study of flow over side weirs under supercritical conditions. *Water Resources Management* 22 (1): 131-143. <https://doi.org/10.1007/s11269-007-9153-4>.
9. Ebadzadeh, P. and H. Abbaszadeh, R. Daneshfaraz and R. Norouzi. 2024. Reducing the extent of vortices upstream of the sliding valve. *Journal of Hydraulic Structures* 10(2): 55-61. 10.22055/JHS.2024.19042.
10. El-Khashab, A. and K. V. H. Smith. 1976. Experimental investigation of flow over side weirs. *Journal of Hydraulic Engineering* 102 (9): 1255-1268. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1987\)113:4\(491\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1987)113:4(491)).
11. Emiroglu, M. E., N. Kaya and H. Agaccioglu. 2010. Discharge capacity of labyrinth side weir located on a straight channel. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 136 (1): 37-46. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000112](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000112).
12. Hager, W. H. 1987. Lateral outflow over side weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*. 113(4): 491-504. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1987\)113:4\(491\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1987)113:4(491)).
13. Hay, N. and G. Taylor. 1970. Performance and design of labyrinth weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*. 96 (11): 2337-2357. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0002766>.
14. Jalili Ghazizadeh, M., H. Fallahi and E. Jabbari. 2021. Characteristics of water surface profile over rectangular side weir for supercritical flows. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 147(5): 04021011. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001551](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001551).
15. Khani, M. C. and S. Shabanlou. 2021. A robust evolutionary design of generalized structure group method of data handling to estimate discharge coefficient of side weir in trapezoidal channels. *Iranian Journal of Science and Technology-Transactions of Civil Engineering* 46(1): 585-602 (in Farsi).
16. Maranzoni, A., M. Pilotti and M. Tomirotti. 2017. Experimental and Numerical Analysis of Side Weir Flows in a Converging Channel. *Journal of Hydraulic Engineering* 143(7): 04017009.
17. Maranzoni, A. and M. Tomirotti. 2021. 3D CFD analysis of the performance of oblique and composite side weirs in converging channels. *Journal of Hydraulic Research* 59(4): 586-604. <https://doi.org/10.1080/00221686.2020.1818304>.
18. Norouzi, R., P. Ebadzadeh, V. Sume and R. Daneshfaraz. 2023. Upstream vortices of a sluice gate: An experimental and numerical study. *AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society* 72(10): 1906-1919.
19. Parvaneh, A., S. M. Borghei and M. R. Jalili Ghazizadeh. 2012. Hydraulic performance of asymmetric labyrinth side weirs located on a straight channel. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 138(8): 766-772. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000455](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000455).
20. Parvaneh, A., M. Parvaneh, G.R. Rakhshanderoo, M.R. Jalili Ghazizadeh and H. Sadeghian. 2021. Discharge Characteristics of a Novel Inclined-Bed Triangular Side Weir in Subcritical Flow. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 148(2): 06021013.
21. Pathirana, K. P. P., M. M. Munas and A. L. A. Jaleel. 2006. Discharge coefficient for sharp-crested side weir in supercritical flow. *Journal of The Institution of Engineers* 39(2): 17-24. <http://dx.doi.org/10.4038/engineer.v39i2.7182>.
22. Ranga Raju, K. G., S. K. Grupta and B. Prasad. 1979. Side weir in rectangular channels. *Journal of the Hydraulics. Div.* 105(5): 547-554. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0005207>.
23. Sadeghian, H., A. Parvaneh, M. A. Nekoie and M. Parvaneh. 2019. Discharge characteristics of triangular labyrinth side weirs (with inclined bed) located on a straight channel. In Proc., 38th International Association of Hydro-Environmental Engineering and Research World Congress. Madrid, Spain. <https://doi.org/10.3850/38WC092019-0155>.
24. Saffar, S., M. Solimani Babarsad, M. Mahmoodian Shoostari, M. H. Poormohammadi and R. Riazi. 2021. Prediction of the discharge of side weir in the converge channels using artificial neural networks. *Flow Measurement And Instrumentation* 78: 101889. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2021.101889>.
25. Subramanya, K. 2009. *Flow in open channels*. Tata McGraw-Hill, New Dehli, India.
26. Subramanya, K. and S. C. Awasthy. 1972. Spatially varied flow over side weirs. *Journal of Hydraulic Division* 98(1): 1-10.

## Experimental Study of Flow over the Triangular Side Weir with Inclined Crest in Subcritical Flow

M. Neysi, M. Sajadi\*, M. Shafai Bejestan, J. Ahadiyan<sup>1</sup>

(Received: May 13-2024 ; Accepted: August 4-2024)

### Abstract

Side weirs are hydraulic structures employed in irrigation and drainage channels as diversion devices or head regulators. The increasing efficiency of the structure of side weirs for constant head has been one of the concerns of researchers in the last decade. The use of different forms of sharp crest, labyrinth, piano key, and increasing the length of the overflow by changing the geometry of the crest have been investigated. In this research, a new type of triangular-shaped side weir has been studied in the laboratory under different hydraulic conditions in sub-critical flow conditions. The results demonstrated that by inclining the crests of the triangular side weir, the amount of vortex created at the entrance of the opening was reduced. So the discharge coefficient and the flow volume over the side weir showed an increase of up to 27% and 48%, respectively, compared to the normal triangular and rectangular side weirs. Also, after analyzing the data, a non-linear equation was presented to estimate the discharge coefficient with the dimensionless parameters of the ratio of the upstream depth to the weir height ( $y_1/p$ ) and the upstream Froud number ( $Fr_1$ ) with an accuracy of  $\pm 15\%$  and  $NRMSE=0.134$ .

**Keywords:** Side weir, Triangular labyrinth, Experimental model, Discharge coefficient, Efficiency

---

1. Department of Water Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

\*: Corresponding author, Email: m.sadjadi@scu.ac.ir