

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^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۳/۵)

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 محققان هیدرولیک در دهه گذشته بوده است. استفاده از شکل‌های مختلف تاج لبه تیز، کنگره ای، کلید پیانویی و همچنین افزایش طول سرریز با تغییر هندسه تاج مورد بررسی قرار گرفته است. در تحقیق 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 غیر خطی جهت تخمین ضریب دبی با کمک پارامترهای بدون بعد نسبت عمق بالادست جریان به ارتفاع سرریز (y_i/p) و عدد فرود بالادست جریان (Fr_i) با دقت $\pm 15\%$ و $NRMSE=0.134$ ارائه شد.

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

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

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

مقدمه

سازه‌های آبگیر، 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 بکمک 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.

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

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

دیمارچی (۵) 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 محققان 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 مطالعات متعددی برای پیش بینی 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 فوق بحرانی بر ضریب دبی سرریزهای جانبی پرداختند. های و تیلور (۱۳) به بررسی سرریزهای کنگره ای پرداختند. ایشان به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف از جمله هندسه در پلان، افزایش طول تاج سرریز، و تعداد سیکل‌های سرریز کنگره ای پرداختند که در نهایت یک برنامه جهت تخمین راندمان سرریز ارائه شد. دورجا راوو و پیلایی (۸) به کمک اصل ممنتوم به بررسی جریان متغیر تدریجی در سرریزهای جانبی تحت شرایط زیر بحرانی 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 ممنتوم 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 تحقیق روابط ارائه شده توسط دی مارچی برای این حالات مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که روابط مذکور به عدد فرود انتهایی بالادست و ارتفاع آب روی سرریز وابسته هستند. سابرامانیا (۲۶) جریان عبوری از سرریزهای جانبی لبه تیز در کانال‌های مستطیلی را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داد. در این آزمایشات هر دو رژیم جریان زیر بحرانی 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 را مورد ارزیابی قرار دادند. در همین راستا هگر (۱۲) معادله (۵) را برای تخمین ضریب دبی

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 بر روی سرریز جانبی مثلثی ولی با کف شیبدار مطالعات آزمایشگاهی انجام داد. در این مطالعه که در شرایط جریان زیر بحرانی انجام شد، معادله ی (۷) جهت 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 تحقیق که بر روی ۲۰۰ نمونه اثرات اشکال مختلف آستانه مورد بررسی قرار گرفتند که نتایج نشان داد نتایج نشان دادند 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. با توجه 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. از این رو در مطالعه حاضر از سرریز مثلثی ولی با لبه شیبدار و دیواره‌های غیر متقارن استفاده شده است تا تأثیر این نوع سرریز بر میزان افزایش ضریب دبی و نیز راندمان دبی انحرافی بررسی شود.

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، دوزنقه ای و لایبرانت مورد بررسی قرار دادند. انصاری و پاتیل (۱) و خانی و شعبانلو (۱۵) به بررسی اشکال مختلف کانال‌ها شامل دایره ای، سهموی، مثلثی و دوزنقه ای و تأثیر آن بر عملکرد سرریز جانبی پرداختند. پژوهشگران دیگر از جمله مارانزونی و تامیروتی (۱۶) 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 کنگره ای، مدل پیشنهادی خود را به‌عنوان سرریز جانبی مثلثی معرفی و مورد بررسی قرار داد. آن‌ها با تحلیل داده‌های آزمایشگاهی، معادله (۶) را برای پیش بینی ضریب دبی دیمارچی در سرریز جانبی مثلثی با کف افقی ارائه دادند.

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

پروانه و همکاران (۱۹) به بررسی جزئیات طرح جدیدی برای سرریزهای جانبی کنگره ای در شرایط زیربحرانی پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که ضریب دبی سرریز جانبی کنگره ای نامتقارن به ترتیب تا ۱/۶ و ۲/۳۵ برابر دارای راندمان بیشتر نسبت به نوع متقارن و مستطیلی است. در مطالعه دیگری پروانه و همکاران (۲۰) سرریز جانبی مثلثی مطالعه صادقان را مورد بررسی دقیق تری قرار داد. ایشان ضمن ارائه معادله زیر جهت

مواد و روش ها

آنالیز ابعادی

در این تحقیق همان گونه که در شکل ۱ نشان داده شده است پارامترهای تأثیرگذار بر ضریب دبی را می توان 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، μ ویسکوزیته دینامیکی، σ کشش سطحی، ρ چگالی آب، Q_i دبی کانال اصلی، Q_w دبی روی سرریز و S_0 شیب کف کانال و θ 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 تحقیق در محدوده ۱۲۲۱۲۶ تا ۱۳۹۱۸۷ است، به دلیل شرایط جریان متلاطم می توان از اثرات این پارامتر صرف نظر کرد. دانش فراز و همکاران (۶). همچنین به دلیل ایجاد عمق بیشتر از ۳ سانتی متر بر روی سرریز، می توان از اثرات کشش سطحی و عدد وبر صرف نظر کرد. دانش فراز و همکاران (۵). لذا با صرف نظر از S_0 به دلیل صفر بودن شیب کانال و توضیحات گفته شده و شرایط جریان از تأثیر نیروهای لزوجتی و کشش سطحی و دو عدد رینولدز و وبر که نماینده این دو نیرو هستند صرف نظر می شود. 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) در ذیل می رسمیم.

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

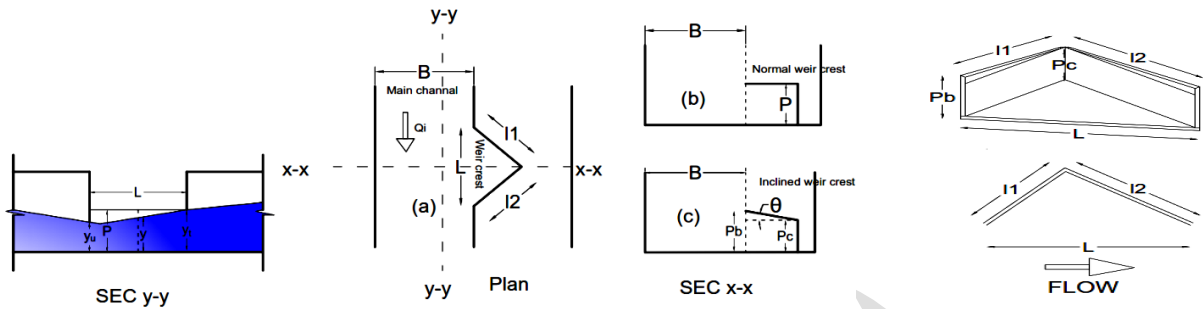
امکانات و انجام آزمایش

برای رسیدن به اهداف این تحقیق مدل های مختلفی از سرریز جانبی مثلی با لبه شیبدار و دیواره های غیر متقارن ساخته شد. سپس این مدل ها در شرایط هیدرولیکی مختلف آزمایش شد. برای این منظور از فلوم به طول ۱۲ متر، عرض ۰.۸ متر، ۱ متر و ارتفاع ۰.۶ متر ۸۰ سانتی متر استفاده شد. (شکل ۲) دیواره های فلوم از جنس پلکسی گلاس و کف آن از ورق استیل ساخته شده است. فلوم در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز قرار دارد. برای انجام این مطالعه عرض فلوم توسط ورق به ضخامت ۱۰ میلیمتر به دو قسمت ۴۰ سانتی متر و ۳۹ سانتی متر تقسیم شد. (شکل ۳). در فاصله ۴ متری از مخزن آرام کننده جریان، سرریز جانبی مستطیلی به طول ۴۰ سانتی متر ایجاد شد. مدل های مختلف سرریز مثلی نیز در همین ناحیه مورد آزمایش قرار گرفت.

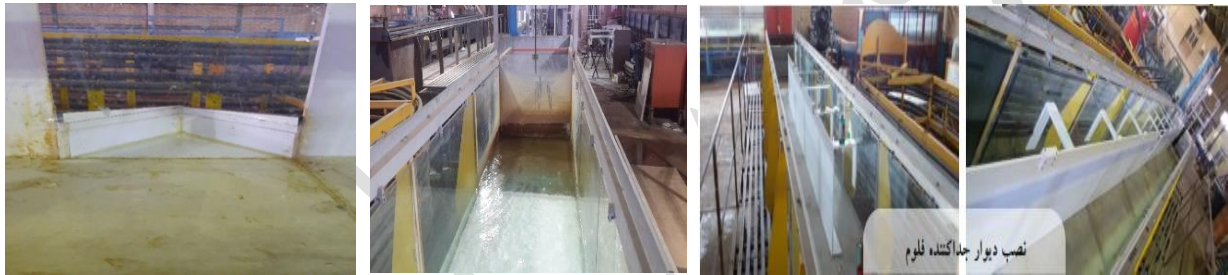
در این تحقیق تعداد ۲۰ مدل سرریز جانبی مورد بررسی قرار گرفت که شامل، ۳ مدل سرریز جانبی مستطیلی، ۳ مدل سرریز جانبی مثلی متقارن با لبه ساده، ۴ مدل سرریز جانبی مثلی متقارن لبه شیبدار و ۱۰ مدل سرریز جانبی مثلی نامتقارن لبه شیبدار با نسبت های ۱/۳ و ۱/۷ هستند، شکل ۴ جزئیات مدل ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

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، P_e ارتفاع سرریز در راس سرریز مثلی هستند.

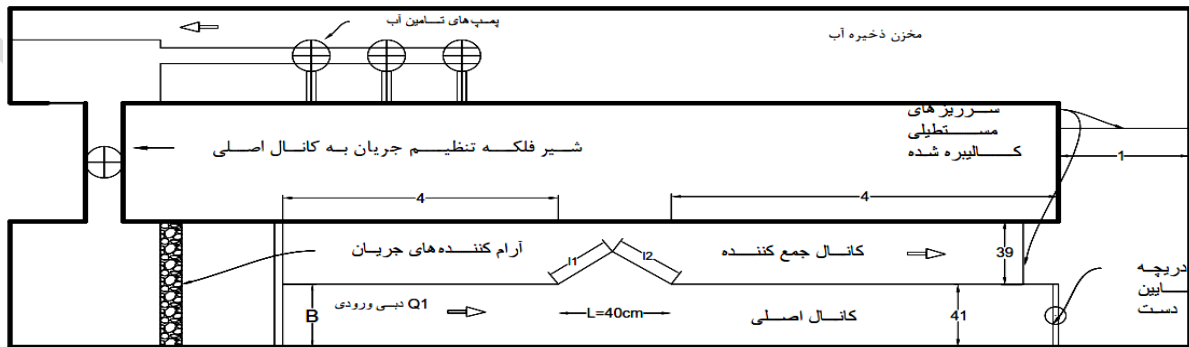
در این مطالعه پس از قرار دادن مدل سرریز مورد نظر در دیواره جانبی کانال (با عرض ۴۰ سانتی متر)، پمپ روشن می شد. به کمک شیر نصب شده بر روی لوله ورودی آب به فلوم، مقدار دبی مورد نظر تنظیم می شد. جریان پس از ورود به فلوم، در ابتدا آرام شده و سپس در طول فلوم ادامه می یافت. عمق آب در فلوم توسط دریچه ای که در پایین دست فلوم ۴۰ سانتی متر قرار داشت تنظیم می شد. پس از برقراری کامل جریان تراز سطح



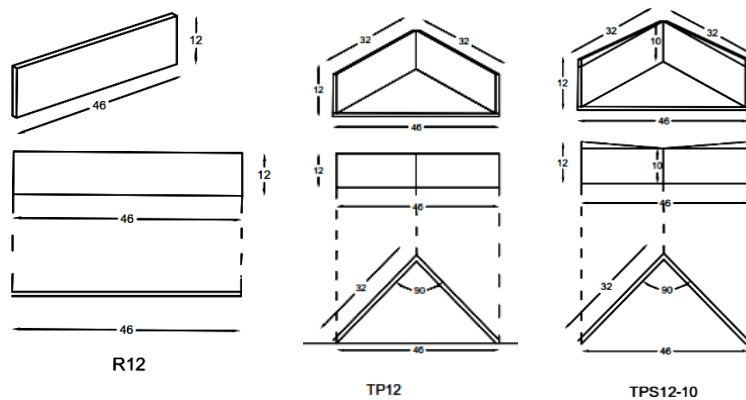
شکل ۱. پارامترهای تأثیرگذار بر ضریب دبی



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 ₁	l ₂	P _b	P _c
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

محدوده محورهای بدون بعد فوق به شرح ذیل هستند.

(بالادست سرریز جانبی) تا $+1/5^{\circ}$ (پایین دست سرریز جانبی) $X^* =$

از عدد -0.5

از عدد -0.5 (بالادست سرریز جانبی) تا $+1/5^{\circ}$ $X^* =$

از عدد 0 (عدم عبور جریان از سرریز) تا 6° به صورت متغیر $Y^* =$

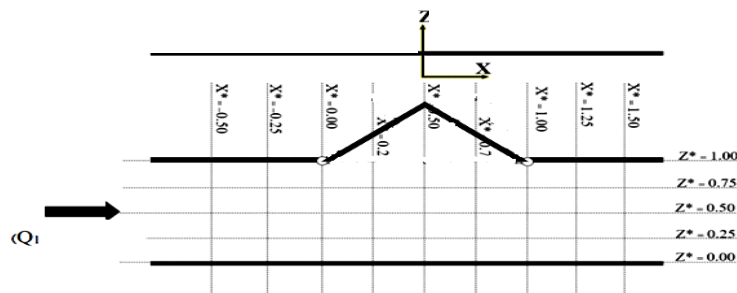
از عدد 0 (نزدیک جداره کانال اصلی) تا $1/10^{\circ}$ (روی تاج سرریز جانبی) $Z^* =$

آب توسط عمق سنج با دقت ۱ میلی‌متر و در شبکه ای 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) $(Z^* = \frac{Z}{B} =$



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

می‌شود که در محدوده اعداد فرود 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 شیدار 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 می‌گردند 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 شیدار نشان می‌دهد. با افزایش فرود بالادست و ایجاد گردابه قوی‌تر جریان‌های برگشتی قوی‌تری ایجاد و حجم جریان عبوری از تاج سرریز را کاهش می‌دهند.

در این پژوهش از معادله (۱۱) جهت بررسی راندمان سرریز جانبی استفاده شده است. مارانزونی و همکاران (۱۶) جهت 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 α و c را به ترتیب ۰/۸۱۸ و ۰/۶۱۵۵ تخمین زدند.

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

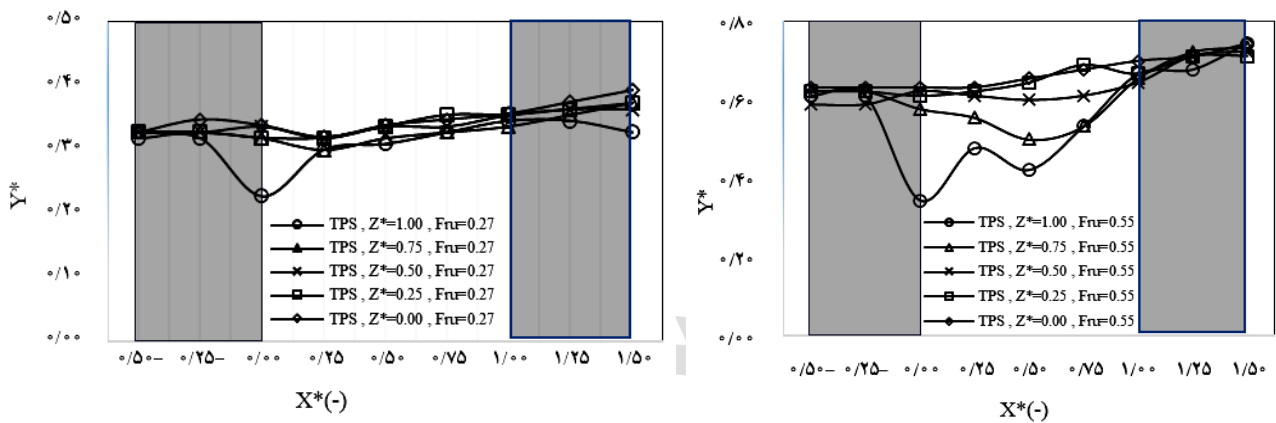
$$\eta = \left(\frac{Y_2}{Fr_2 \times P} \right)^\alpha \quad (12)$$

شکل ۹ نشان می‌دهد که با کاهش سرعت در پایین سرریز

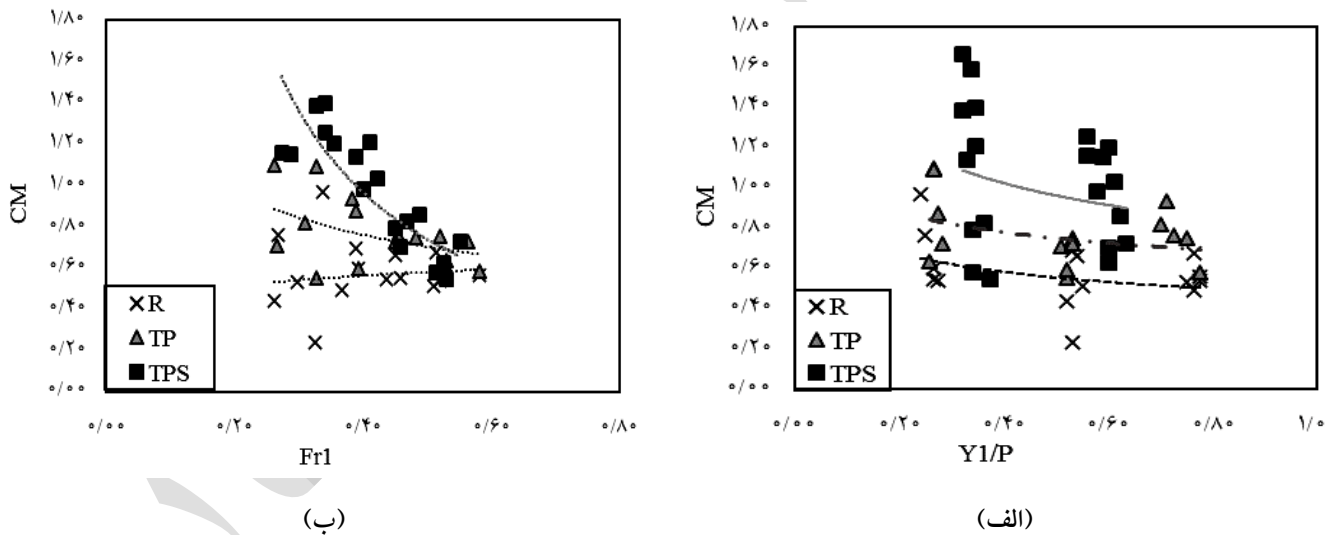
نتایج و تحلیل پروفیل سطح آب

پروفیل سطح آب برای سرریز جانبی مثلثی لبه شیدار در جهت محورهای طولی و عرضی در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاهی و امکانات موجود که امکان ایجاد چنین اعداد فرود در محدوده همان‌طور که در مطالعات پیشین بر روی سرریز جانبی کنگره ای گفته شده است در جریان زیربحرانی سطح آب در طول سرریز جانبی و 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 تحقیق تقریباً شبیه آنچه در شکل ۶ نشان داده شده است.

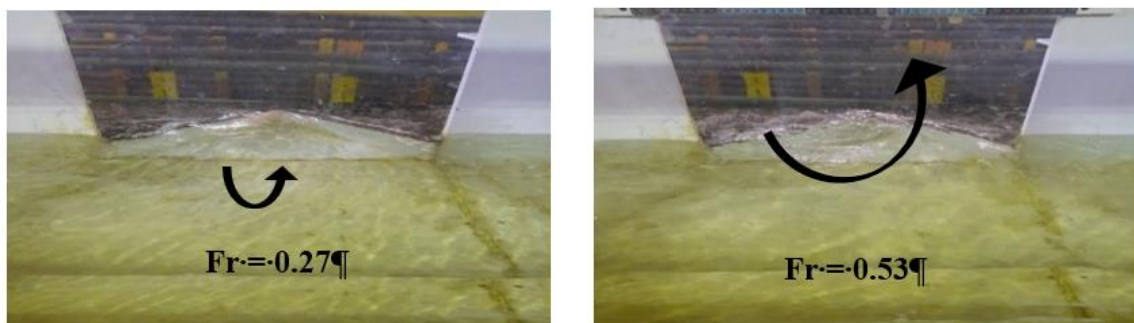
در شکل ۷- الف تأثیر لبه‌های شیدار بر ضریب دبی سرریز جانبی مثلثی نشان داده شده است. همان‌گونه که از نمودار به دست می‌آید ضریب دبی در همه ی مدل‌ها با افزایش نسبت بدون بعد Y_1/P روند کاهش دارد. در مقادیر کمتر نسبت بدون بعد Y_1/P جریان عبوری از تاج سرریز جانبی با جریان‌های تداخلی کمتری تخلیه می‌شود. خصوصاً این موضوع در مورد سرریز جانبی مثلثی لبه شیدار 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 و به تبع آن ضریب دبی نیز روند کاهش نشان می‌دهد. در شکل ۷- ب مشاهده



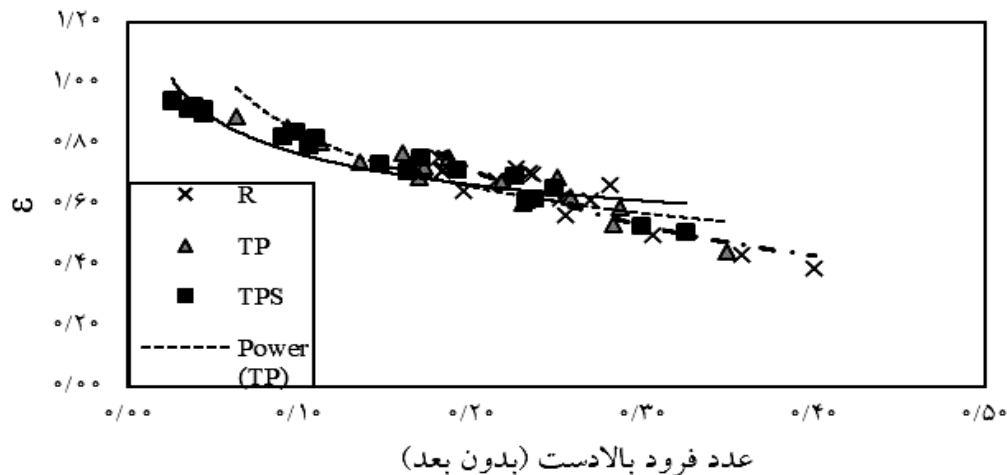
شکل ۶: مقایسه پروفیل‌های بدون بعد عمق آب در مدل TPS و عدد فرود ۰.۲۷ و ۰.۵۵.



شکل ۷. الف) ضریب دبی در مقابل $y1/p$ و ب) $Fr1$ برای مدل‌های TPS, TP, R



شکل ۸. مقایسه ورتکسهای ایجاد شده در دهانه ورودی سرریز TPS در فرودهای ۰.۲۷، ۰.۵۳



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

جهت 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.

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

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

که در آن $f(x)$ مقدار اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه، $F(X)$ مقدار به دست آمده از معادله و \bar{f} ، متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده، x ، پارامتر مستقل است. لازم به ذکر 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 حداقل مقدار NRMSE و بیشترین R^2 جهت پیش بینی C_M در سرریز جانبی مثلثی لبه شیبدار پیشنهاد شد.

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

شکل ۱۱ ضریب دبی حاصل از معادله پیشنهادی را 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 تحقیق مدل پیشنهادی سرریز جانبی مثلثی لبه شیبدار راندمان و عملکرد بهتری را نسبت به دیگر مدل‌ها نشان می‌دهد.

شکل ۱۰ راندمان مدل‌های R، TP، TPS را در مقابل نسبت بدون بعد η 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 راس مثلث و کاهش گردابه و جریان‌های برگشتی در دهانه ورودی سرریز از راندمان بالاتری نسبت به مدل‌های دیگر برخوردار است.

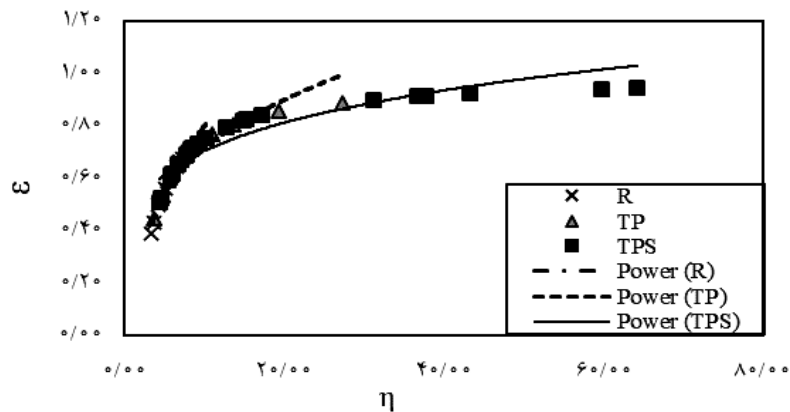
معادله ضریب دبی

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

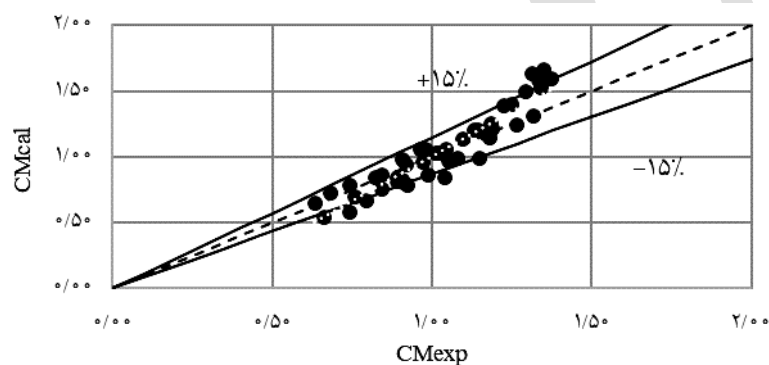
$$C_M = \frac{3B}{2L} [\Delta\phi] \quad (13)$$

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

در این معادله ϕ_1 و ϕ_2 خصوصیات جریان به ترتیب در بالادست و پایین دست سرریز است. در ادامه به کمک ترکیب پارامترهای بدون بعد مؤثر بر ضریب دبی در نرم‌افزار SPSS معادله پیشنهادی



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

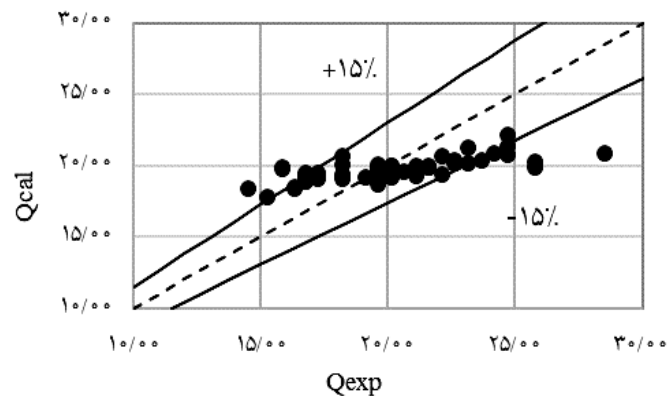


شکل ۱۱. مقایسه ضریب دبی آزمایشگاهی (Cmexp) در مقابل ضریب دبی محاسباتی (Cmcal)

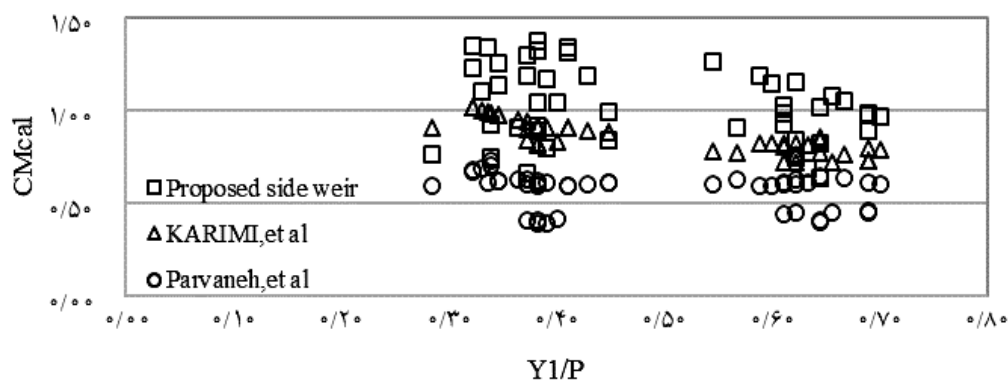
نتیجه گیری

تحقیق حاضر به بررسی نوع جدیدی از سرریز جانبی مثلثی پرداخت. 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 تحقیق در مجموع تعداد ۱۰۰ آزمایش و در تعداد ۴۵۰۰ نقطه عمق جریان برداشت شد که در پایان پس از بررسی و تحلیل نتایج معادله غیر خطی جهت 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.

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 می‌شود. 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 مشاهده می‌شود ضریب دبی سرریز جانبی مثلثی پیشنهادی خصوصاً 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 مساوی و 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 تحقیق حاضر با سایر محققین C_m در مقابل Y_1/P

جریان به سمت سرریز جانبی کمک کرده و جریان عبوری از تاج سرریز را افزایش می دهند. این مدل پیشنهادی سرریز می تواند در نمونه های عملی در شبکه ها به افزایش راندمان و بهره وری سرریزهای موجود کمک نماید.

همچنین نتایج نشان داد که در شرایط مشابه جریان، بهره وری و ضریب دبی سرریز جانبی مثلثی لبه شیبدار نسبت به سرریز جانبی مثلثی با کف شیبدار حدود ۵۵٪ بیشتر است. مشاهدات نشان داد که لبه های 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*. 1–8. <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. Gisonni. 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., Norouzi, R., & Abbaszadeh, H. (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., Norouzi, R., Patrick Abraham, J., Ebadzadeh, P., Akhondi, B., & Abar, M. (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, Parisa & Abbaszadeh, Hamidreza & Daneshfaraz, Rasoul & Norouzi, Reza. (2024). Reducing the extent of vortices upstream of the sliding valve. *Journal of Hydraulic Engineering* 10. 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. 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)).
11. Emiroglu, M. E., N. Kaya, and H. Agaccioğlu. 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*. 1-18. <https://doi.org/10.1007/s40996-021-00594-y>. (in Farsi)
16. Maranzoni, A., Pilotti, M., and Tomirotti, M. (2017). Experimental and Numerical Analysis of Side Weir Flows in a Converging Channel. *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(7).
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, Ebadzadeh P, Sume V, Daneshfaraz R, (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. Borghhei, 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., S. M., 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)
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. Gupta, 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. Nekooie, 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: *International Association for Hydro- Environment Engineering and Research*. <https://doi.org/10.3850/38WC092019-0155>.
24. Saffar, S., M. Solimani Babarsad, M. Mahmoodian Shooshtari, 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*, 3rd Ed., Tata McGraw-Hill, New Dehli, India.
26. Subramanya, K., and Awasthy, S. C. 1972. Spatially varied flow over side weirs. *Journal of Hydraulic Division*, 98(1), 1-10.