

مطالعه آزمایشگاهی تأثیر هندسه و تراز کف کانال بالادست بر ضریب دبی جریان در سرریز پلان کنگره‌ای - ذوزنقه‌ای

حنانه شفاعت‌طلب دهقانی¹، مهدی اسمعیلی ورکی^{2*}، افشین اشرف‌زاده³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، مجتمع دانشگاه گیلان

2- استادیار سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، مجتمع دانشگاه گیلان

3- استادیار منابع آب، گروه مهندسی آب، مجتمع دانشگاه گیلان

* esmaeili.varaki@yahoo.com

چکیده - سرریزهای کنگره‌ای یکی از سازه‌های متداول به منظور تنظیم سطح آب و تخلیه جریان در کانال‌های انتقال آب و دریاچه سدها بدون نیاز به عملیات بهره‌برداری خاص می‌باشند. مشکل عمده در بهره‌برداری از این سازه‌ها در کانال‌های انتقال آب، ترسیب مواد رسوبی موجود در بالادست آن‌ها می‌باشد که در نتیجه عملکرد هیدرولیکی این نوع از سازه‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این پژوهش تأثیر تغییر هندسه و تغییر تراز کف کانال بالادست بر ضریب دبی جریان سرریزهای پلان کنگره‌ای - ذوزنقه‌ای به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها در شرایط عدم تغییر تراز کف کانال و سه تراز کف کانال بالادست سرریز (30، 60 و 90 درصد ارتفاع سرریز) در 6 هندسه از سرریز کنگره‌ای - ذوزنقه‌ای انجام شد. مقایسه نتایج حاصل از بررسی تأثیر ترازیهای مختلف کف کانال بالادست بر ضریب دبی جریان این سرریزها نشان داد که تغییر تراز کف کانال به 30 و 60 درصد ارتفاع سرریز نسبت به عدم تغییر تراز کف کانال تأثیر معنی‌داری بر ضریب دبی جریان آن‌ها ندارند، ولی با افزایش تراز کف کانال بالادست به 90 درصد، ضریب دبی جریان این سرریزها نسبت به عدم تغییر تراز کف کانال تغییر چشم‌گیری نموده و به طور متوسط در هندسه‌های مورد بررسی 14 درصد کاهش می‌یابد. مقایسه نتایج حاصل از تغییر هندسه این سرریزها نشان داد که در ترازیهای کف کانال کمتر از 90 درصد، به دلیل افزایش استغراق موضعی در سیکل‌های خروجی سرریزها با افزایش دبی جریان، هندسه‌های با زاویه راس سیکل کوچک‌تر و طول سیکل در جهت جریان (B) بیشتر، ضریب دبی جریان بالاتری داشتند. اما در ترازیهای کف کانال 90 درصد، به علت آن که با افزایش سرعت جریان نزدیک‌شونده به سرریز، بخش عمده جریان از محدوده نزدیک به راس سیکل‌ها تخلیه می‌شدند، در نتیجه نیاز به مومنتم بیشتری برای خروج از سیکل‌ها داشتند و بنابراین ضریب دبی جریان سرریزهایی با زاویه راس سیکل بیشتر و طول سیکل در جهت جریان کمتر نسبت به سایر هندسه‌ها بیشتر بود.

کلیدواژه‌گان: سرریز کنگره‌ای، رسوب‌گذاری، ضریب دبی سرریز، سازه کنترل.

1- مقدمه

هیدرولیکی مناسب‌تر ابداع نمایند. یکی از سازه‌های تنظیم سطح آب که اخیراً مورد توجه قرار گرفته است، سرریزهای کنگره‌ای می‌باشند. این سرریزها با داشتن طول تاج بیشتر به‌علت برخورداری بودن از هندسه غیرخطی در پلان، به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای اصلاح سرریزهایی که برای

سازه‌های کنترل و تنظیم آب نقش مهمی در مدیریت توزیع جریان در کانال‌های آبیاری و نیز تخلیه سیلاب در سدها دارند. از این‌رو محققان همواره تلاش دارند سازه‌هایی با کارایی بالاتر، بهره‌برداری راحت‌تر و رفتار

ملاحظات خاص مکانی و با در نظر گرفتن شرایط هیدرولیکی حاصل می‌گردد.

Crookston and Tullis (2013a, b) با مقایسه عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای-دو زنگه‌ای با شکل‌های تاج ربع و نیم‌دایره‌ای با زاویه‌های مختلف دیواره جانبی ($6^\circ < \alpha < 35^\circ$) و خطی دریافتند که در دامنه هد نسبی کل $H_T/P < 0.4$ ، افزایش در راندمان حاصل از شکل تاج نیم‌دایره‌ای (نسبت به تاج ربع‌دایره‌ای) قابل ملاحظه‌تر است، زیرا در مقادیر پایین هد نسبی کل، گردشگری تاج در وجه پایین دست سرریز به جریان کمک می‌کند که به دیواره پایین دست سرریز بچسبد. بنابراین راندمان و ظرفیت تخلیه جریان افزایش می‌یابد. هنگامی که دبی و مومنتم متناظر جریان عبوری از سرریز افزایش یابد، سفره‌های ریزشی هوادهی می‌گردد و خطوط جریان از تاج سرریز جدا شده و نیم‌رخ جریانی مشابه با تاج ربع‌دایره‌ای به وجود می‌آورند. هم‌چنین با بررسی تأثیر هوادهی مصنوعی (شکافنده‌های سفره ریزشی جریان یا لوله‌های هوادهی) بر روی ظرفیت تخلیه سرریزهای کنگره‌ای مذکور، پی بردند که تأثیر آن‌ها بر ظرفیت تخلیه این سرریزها نسبت به شرایط هوادهی نشده ناچیز (0/5-1/7 درصد) و قابل صرف نظر کردن است ولی منجر به کاهش ناپایداری در پشت سرریز می‌شوند.

Savage et al. (2016) مدل‌سازی عددی و فیزیکی سرریزهای کنگره‌ای دو زنگه‌ای با زاویه دیواره جانبی 15° درجه ($\alpha = 15^\circ$) را در هدهای نسبی کل بزرگ ($H_T/P > 1$) انجام دادند. آن‌ها با استفاده از نتایج مدل عددی دریافتند که مدل‌های آشفتگی انتخاب شده اثری بر دبی جریان نداشته و مدل عددی می‌تواند با تقریب خوبی دبی‌های مورد انتظار را شبیه‌سازی نماید.

یاسی و محمدی (1386) با اصلاح طرح هندسی پلان سرریز زیگزگی نوع مثلثی، دو زنگه‌ای و مستطیلی از طریق تغییر شکل دماغه سرریز به قوسی از دایره، با سه مدل سرریز با پلان قوسی نشان دادند که شکل قوسی دماغه سرریز منجر به افزایش کارایی هیدرولیکی می‌گردد.

اسمعیلی ورکی و صفروضوی زاده (1392) با بررسی عملکرد هیدرولیکی سرریزهای پلان نیم‌دایره‌ای با

عبور دبی حداکثر محتمل با مشکل روبه‌رو هستند، مطرح می‌شوند. از مزایای این نوع سرریزها می‌توان به بالا بودن ظرفیت سرریز، هوادهی آسان جریان و پایین بودن نوسان‌های سطح آب در آستانه عبوری جریان از روی سرریز اشاره کرد. بنابراین، تعیین شکل بهینه هندسی این سرریزها از نظر دبی عبوری و هزینه ساخت ضروری می‌باشد (ژردری مقدم و جعفری ندوشن، 1392). اولین مطالعات در خصوص ضوابط طراحی و کارکرد هیدرولیکی سرریزهای پلان کنگره‌ای توسط Taylor (1968) و Hay and Taylor (1970) روی مدل‌های با پلان هندسی مثلثی، مستطیلی و دو زنگه‌ای با شکل تاج لبه‌تیز صورت پذیرفت.

Lux and Hinchliff (1985) و Lux (1993) با توسعه اطلاعات تجربی، رابطه ضریب جریان عبوری روی سرریزهای با پلان مثلثی و دو زنگه‌ای را اصلاح نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که میزان واقعی جریان عبوری از سرریز پلان کنگره‌ای حدود 25 درصد کمتر از مقدار برآورد شده نظیر آن از روش هی و تیلور (1970) می‌باشد. علت اصلی تفاوت، احتساب ارتفاع سطح آب بالادست به جای ارتفاع کل (مجموع ارتفاع سطح آب و ارتفاع نظیر سرعت) می‌باشد.

Carollo et al. (2012) با بررسی آزمایشگاهی منحنی‌های دبی-هد بالادست و فرآیند جریان‌های ریزشی از روی سرریزهای کنگره‌ای مثلثی با بزرگ‌نمایی‌های طول و جانمایی‌های مختلف، دریافتند بیشترین مزیت استفاده از سرریز W شکل در مقابل سرریز خطی، در ارتفاع‌های آب کم و نسبت بزرگ‌نمایی طول زیاد حاصل می‌گردد.

Khode et al. (2012) با مطالعه آزمایشگاهی بر روی سرریزهای کنگره‌ای دو زنگه‌ای با زوایای دیواره جانبی متفاوت با تاج ربع‌دایره‌ای شکل، معادلاتی برای پیش‌بینی ضرایب دبی در واحد طول (C_L) و عرض (C_w) این سرریزها و نیز حداکثر مقدار ضریب دبی برای طول مؤثر (C_{Lmax}) و واحد عرض (C_{wmax}) آن‌ها ارائه نمودند. هم‌چنین بیان داشتند جانمایی‌های متعددی از این سرریزها را می‌توان با تغییر زاویه دیواره جانبی و تعداد سیکل‌ها بدست آورد، اما طرح نهایی سرریز با توجه به

تعداد آن‌ها در جهت جریان (N) ، زاویه راس سیکل‌ها (α) ، عرض راس سیکل (A) ، عرض هر سیکل (w) ، طول خط مرکزی دیواره جانبی سرریز (l_c) ، طول خط مرکزی برای یک سیکل سرریز $(L_{c-cycle})$ ، طول مؤثر سرریز (L_e) ، ضخامت دیواره (t_w) ، شکل تاج (لبه تیز، مسطح، ربع و نیم‌دایره‌ای، CS^1)، شکل ریزش تیغه آب (آزاد، تداخلی، هواده‌ی شده و هواده‌ی مستغرق، NA^2)، مکان قرارگیری سرریز (مخزن و کانال، WP^3)، هد کل بالادست $(H_T = H_0 + V^2/2g)$ ، تراز بستر پایاب (P_d) ، اختلاف رقوم سطح آب در دو طرف سرریز (h_d) ، تراز کف کانال در بالادست سرریزها (S) ، کشش سطحی سیال (σ) ، شتاب ثقل (g) ، جرم مخصوص سیال (ρ) و لزجت دینامیکی سیال (μ) می‌باشد (شکل 1).

با توجه به آن‌که l_c و $L_{c-cycle}$ و پارامترهای وابسته می‌باشند، می‌توان آن‌ها را بر اساس پارامترهای مستقل به صورت $L_{c-cycle} = 2l_c + A$ ، $l_c = (w - A) / 2\sin\alpha$ و $L_e = N(L_{c-cycle}) + 2L_s$ بیان نمود. که در رابطه بالا L_s ، فاصله دیواره‌های جانبی سرریز از دیواره‌های کانال است. بنابراین می‌توان دبی جریان عبوری از سرریزهای کنگره‌ای را به صورت رابطه تابعی (1) نوشت:

$$Q = f_1(P, L_e, t_w, CS, NA, WP, h_d, P_d, H_T, S, \sigma, g, \rho, \mu) \quad (1)$$

از آنجا که تمامی آزمایش‌ها در شرایط بدون هواده‌ی انجام شد و ضخامت سرریزهای مورد بررسی اندک و تاج آن‌ها به شکل لبه تیز بوده و در این نوع از سرریزها ضخامت نسبی دیواره سرریز بی تأثیر می‌باشد (Crookston, 2010) و نیز دارای پلان دوزنقه‌ای بوده و هم‌چنین مکان قرارگیری آن‌ها درون کانال و پایاب جریان در سرریزها بدون تأثیر بودند، لذا در رابطه (1) می‌توان پارامترهای NA ، t_w ، CS ، WP ، h_d و P_d را حذف نمود. با به کارگیری تئوری باکینگهام در تحلیل ابعادی، رابطه (1) به معادله (2) تبدیل می‌گردد:

$$\frac{Q}{L_e H_T^{1.5} \sqrt{g}} = f_2\left(\frac{H_T}{P}, \frac{L_e}{P}, \frac{S}{P}, \frac{\rho Q^2}{\sigma H_T^3}, \frac{\rho Q}{\mu H_T}\right) \quad (2)$$

هندسه‌های خطی-نیم‌دایره و نیم‌دایره‌ای دریافتند در کلیه هندسه‌های مورد بررسی، تا قبل از شروع استغراق موضعی که در محدوده $H_T/P > 0.35$ رخ می‌دهد، ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای با پلان نیم‌دایره‌ای منطبق بر سرریز خطی و سرریزهای با پلان نیم‌دایره-خطی اندکی کمتر از سرریز خطی می‌باشد. هم‌چنین با افزایش عمق نسبی مؤثر جریان (H_T/P) ، به دلیل تداخل بیشتر سفره‌های ریزشی در سرریزهای پلان نیم‌دایره-خطی، مقدار کاهش دبی نسبت به سرریزهای پلان نیم‌دایره‌ای بیشتر می‌باشد. یکی از مشکلات بهره‌برداری از شبکه‌های آبیاری، رسوب گذاری در طول کانال‌ها و در نزدیکی سازه‌های موجود در شبکه می‌باشد که در نتیجه عملکرد هیدرولیکی آن‌ها تغییر خواهد نمود.

دیزجی و محمودخانی (1388) با بررسی تأثیر رسوبات بر ضریب تخلیه سرریزهای مثلثی، مستطیلی، اوجی و روگذر در کانال باز پی بردند در مقایسه با آب زلال، رسوبات معلق سبب کاهش ضریب تخلیه می‌شوند. این اثر روی ضریب تخلیه، در دبی‌ها و شیب کف کمتر، نمایان تر بوده و مستقل از نوع سرریز به کار گرفته شده می‌باشد. دستورانی و نصرآبادی (1391) با بررسی اثر ته‌نشینی رسوبات در پشت سرریز اوجی بر شرایط جریان نشان دادند که با افزایش رسوبات پشت سرریز، مقدار ضریب دبی سرریز از $2/25$ در شرایط بدون رسوب به $1/69$ در حالت پر بودن مخزن کاهش می‌یابد.

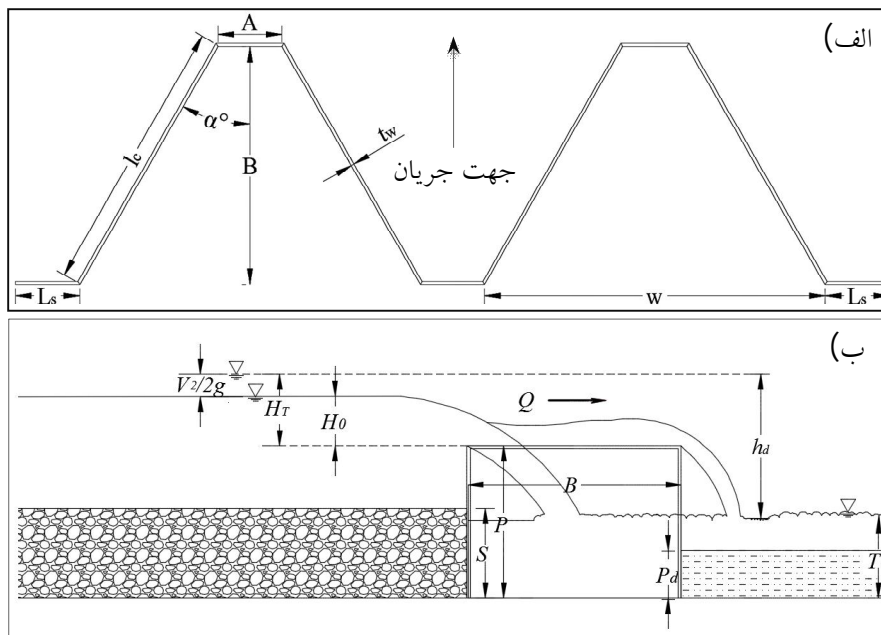
با توجه به این‌که مسأله رسوب گذاری در شبکه‌های آبیاری عملکرد سازه‌های تنظیم سطح آب و به تبع آن سازه‌های آبیگر را تحت تأثیر قرار می‌دهد، هدف از انجام پژوهش حاضر بررسی تأثیر تغییر تراز کف کانال بالادست، که می‌تواند ناشی از رسوب گذاری باشد و تغییر هندسه پلان سرریز بر ضریب دبی جریان در سرریزهای پلان کنگره‌ای-دوزنقه‌ای می‌باشد.

2- مواد و روش‌ها

2-1- تحلیل ابعادی

پارمترهای تأثیرگذار بر ضریب دبی سرریز در سرریزهای کنگره‌ای شامل ارتفاع سرریز (P) ، طول سیکل‌ها (B) و

1. Crest shape of weir
2. Nappe Aeration condition
3. Weir Position



شکل 1 علایم اختصاری متغیرهای مؤثر بر ضریب دبی جریان سرریزهای پلان کنگره‌ای - دوزنقه‌ای: (الف) در نمای پلان، (ب) در نمای نیم‌رخ طولی در شرایط رسوب‌گذاری در بالادست

مدل‌های فیزیکی - هیدرولیکی گروه مهندسی آب دانشگاه گیلان و در فلومی شیب‌پذیر با سیستم بازچرخانی به طول 15 متر، عرض 1/5 و عمق 1 متر که دارای دیواره‌های از جنس شیشه و کف فلزی بود، انجام گردید. برای تأمین دبی، از پمپ سانتریفیوژ که قادر به تأمین دبی تا 90 لیتر بر ثانیه و مجهز به دستگاه کنترل دور موتور تنظیم بود، استفاده شد. جریان ورودی توسط پمپ وارد مخزن بالادست و سپس وارد مخزن آرام‌کننده ورودی شده و در ادامه وارد کانال می‌گردید. به‌منظور اندازه‌گیری و تنظیم دبی جریان از دبی‌سنج اولتراسونیک با دقت $\pm 0/01$ لیتر بر ثانیه استفاده شد (شکل‌های 2 و 3). برای تغییر تراز کف کانال (30، 60 و 90 درصد ارتفاع سرریز) در بالادست سرریزها از کف کاذب استفاده گردید.

در هر آزمایش بعد از نصب سرریز و تغییر کف کانال بالادست، به دلیل آن‌که توزیع فشار در مجاورت محل ریزش جریان از روی سرریز هیدرواستاتیک نیست و به‌منظور اجتناب از تأثیر انحنای ایجاد شده در خطوط جریان در هنگام ریزش بر اندازه‌گیری، عمق آب در فاصله بیش از 4 برابر عمق بحرانی در بالادست سرریز با استفاده از عمق‌سنج دیجیتالی با دقت $\pm 0/1$ میلی‌متر قرائت شد

اگر فرض شود طرف دوم معادله (2) به‌عنوان ضریب دبی جریان در سرریز تلقی گردد، در نهایت معادله دبی سرریزهای کنگره‌ای به‌صورت (3) به‌دست خواهد آمد:

$$Q = C_d L_e H_T \sqrt{g H_T} \quad (3)$$

که در آن:

$$C_d = f_3 \left(\frac{H_T}{P}, \frac{L_e}{P}, \frac{S}{P}, W_e, Re \right) \quad (4)$$

که Re و W_e به ترتیب عددهای رینولدز و وبر می‌باشند. با توجه به آن‌که در تحقیق حاضر هد جریان روی لبه سرریزها از 2 سانتی‌متر بیشتر و جریان در کانال فلوم آزمایشگاهی آشفته بود، نیروهای کشش سطحی و لزجت قابل صرف‌نظر کردن می‌باشند (Subramanya, 1986)، بنابراین در رابطه (4) می‌توان اعداد رینولدز (Re) و وبر (W_e) را حذف نمود. بنابراین رابطه (4) به‌صورت معادله (5) ساده می‌شود:

$$C_d = f_4 \left(\frac{H_T}{P}, \frac{L_e}{P}, \frac{S}{P} \right) \quad (5)$$

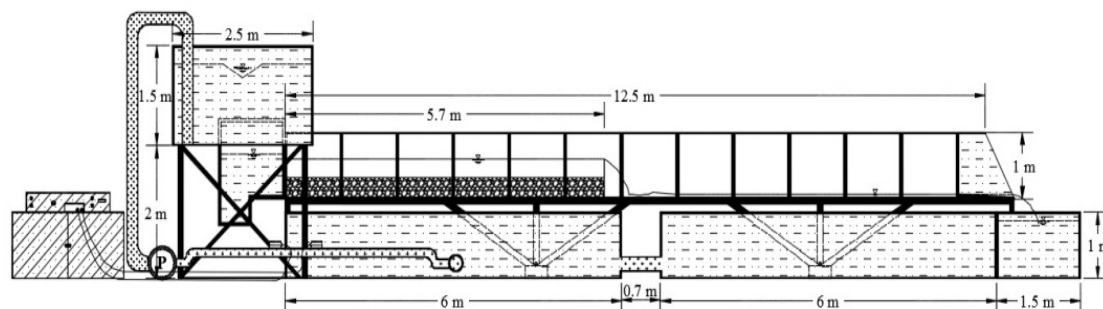
در این تحقیق معادله (5) به‌عنوان رابطه پایه‌ای برای انجام آزمایش‌ها به‌کار گرفته شد.

2-2- تجهیزات آزمایشگاهی و روش انجام آزمایش

آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک و

متری از ورودی کانال نصب گردیدند. لازم به ذکر است که به منظور درک بهتر عملکرد سرریزهای کنگره‌ای در ترازهای مختلف کف کانال بالادست، سرریز خطی نیز مورد بررسی قرار گرفت. در جدول 1 و شکل 4 به ترتیب مشخصات هندسی و تصاویری از پلان سرریزهای مورد آزمایش آورده شده است.

(Henderson, 1966). همچنین با تصویربرداری از نیمرخ سطح آب و استفاده از نرم‌افزار Grapher، نیمرخ سطح آب در کلیه آزمایش‌ها رقومی سازی گردید. سرریزهای مورد بررسی در این تحقیق شامل 6 هندسه پلان کنگره‌ای - ذوزنقه‌ای به ارتفاع 50 سانتی‌متر بودند که از ورقه‌های آهنی به ضخامت 3 میلی‌متر ساخته شد و در فاصله 5/7



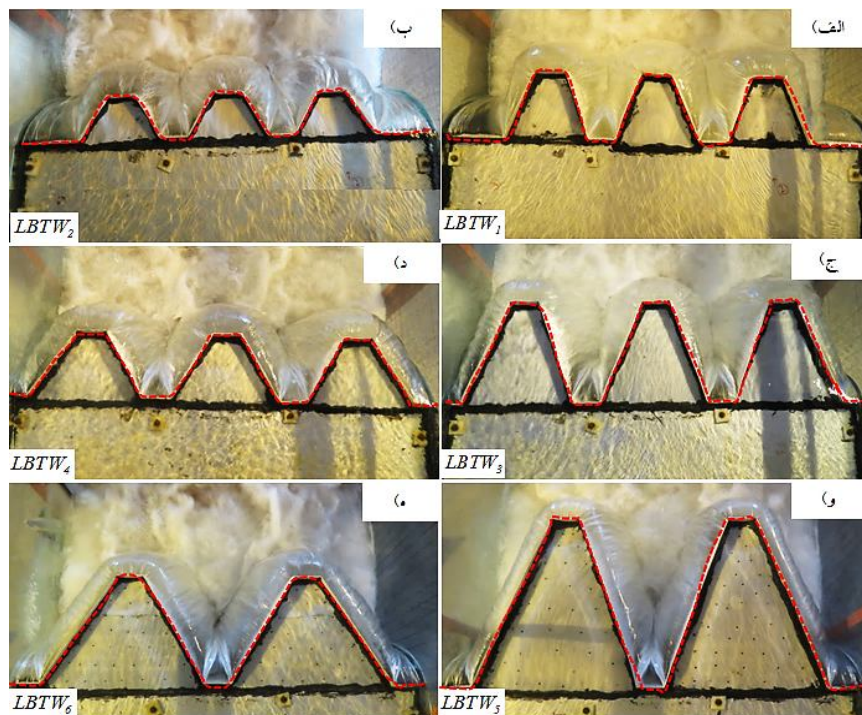
شکل 2 طرح کلی از کانال آزمایشگاهی



شکل 3 تصاویری از کانال آزمایشگاهی و سرریزهای مورد آزمایش

جدول 1 مشخصات هندسی سرریزهای مورد بررسی

تغییرات دبی (L/s)	طول مؤثر سرریز تغییرات هد کل H_r / P	زاویه راس (α° , degree)	تعداد سیکل در جهت جریان (N)	طول سیکل در جهت جریان (B, cm)	عرض هر سیکل (w, cm)	شماره سرریز
44-88	0/08-0/19	260	3	26	30	LBTW ₁
44-88	0/08-0/19	210	3	17	30	LBTW ₂
44-88	0/08-0/19	322	3	41	40	LBTW ₃
44-88	0/08-0/19	240	3	26	40	LBTW ₄
44-88	0/08-0/19	342	2	68	60	LBTW ₅
44-88	0/08-0/19	250	2	43	60	LBTW ₆
44-88	0/08-0/19	150	*	*	*	LNW



شکل 4 تصاویری از سرریزهای پلان کنگره‌ای - دوزنقه‌ای مورد مطالعه،
 (الف) $LBTW_1$ ، (ب) $LBTW_2$ ، (ج) $LBTW_3$ ، (د) $LBTW_4$ ، (و) $LBTW_5$ ، (ه) $LBTW_6$

واحد طول در مقابل هد بالادست در سرریزهای پلان کنگره‌ای - دوزنقه‌ای و خطی نشان داده شده است. مشاهدات آزمایشگاهی و تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که با افزایش دبی جریان در سرریزهای پلان کنگره‌ای مورد بررسی، تداخل سفره‌های ریزشی جریان در سیکل‌ها و شکل‌گیری استغراق موضعی، منجر به کاهش اثر مثبت طول مؤثر تاج سرریز و روند نزولی در تغییرات ضریب دبی جریان هندسه‌های مختلف این سرریز گردید، درحالی‌که شیب منحنی تغییرات ضریب دبی جریان در سرریز خطی صعودی می‌باشد.

بررسی نتایج نشان داد که تأثیر ترازهای کف کانال بالادست به میزان 30 و 60 درصد ارتفاع سرریز بر ضریب دبی جریان در هندسه‌های مختلف سرریزهای کنگره‌ای و خطی مشابه شرایط عدم تغییر تراز کف کانال بالادست می‌باشد. ولی با افزایش تراز کف کانال بالادست به 90 درصد، به علت افزایش سرعت جریان نزدیک‌شونده به سرریز و نیز کاهش هد بالادست جریان در این تراز، ضریب دبی جریان در هندسه‌های مختلف سرریز پلان کنگره‌ای تغییر قابل ملاحظه‌ای می‌یابد.

در این تحقیق، برای محاسبه ضریب دبی جریان سرریز از معادله عمومی سرریزها که به صورت رابطه (6) می‌باشد، استفاده گردید:

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2gH_T} C_d L_e H_T \quad (6)$$

که در آن Q ، ظرفیت دبی سرریز متناسب با طول مؤثر تاج سرریز، C_d ، ضریب دبی جریان در سرریز، g ، شتاب ثقل، L_e ، طول مؤثر تاج سرریز و H_T ، هد کل بالادست می‌باشد. در این تحقیق در مجموع 476 آزمایش برای هندسه‌های مختلف سرریزهای کنگره‌ای - دوزنقه‌ای در ترازهای مختلف کف کانال بالادست انجام پذیرفت. در ادامه نتایج حاصل تشریح شده است.

3- نتایج و بحث

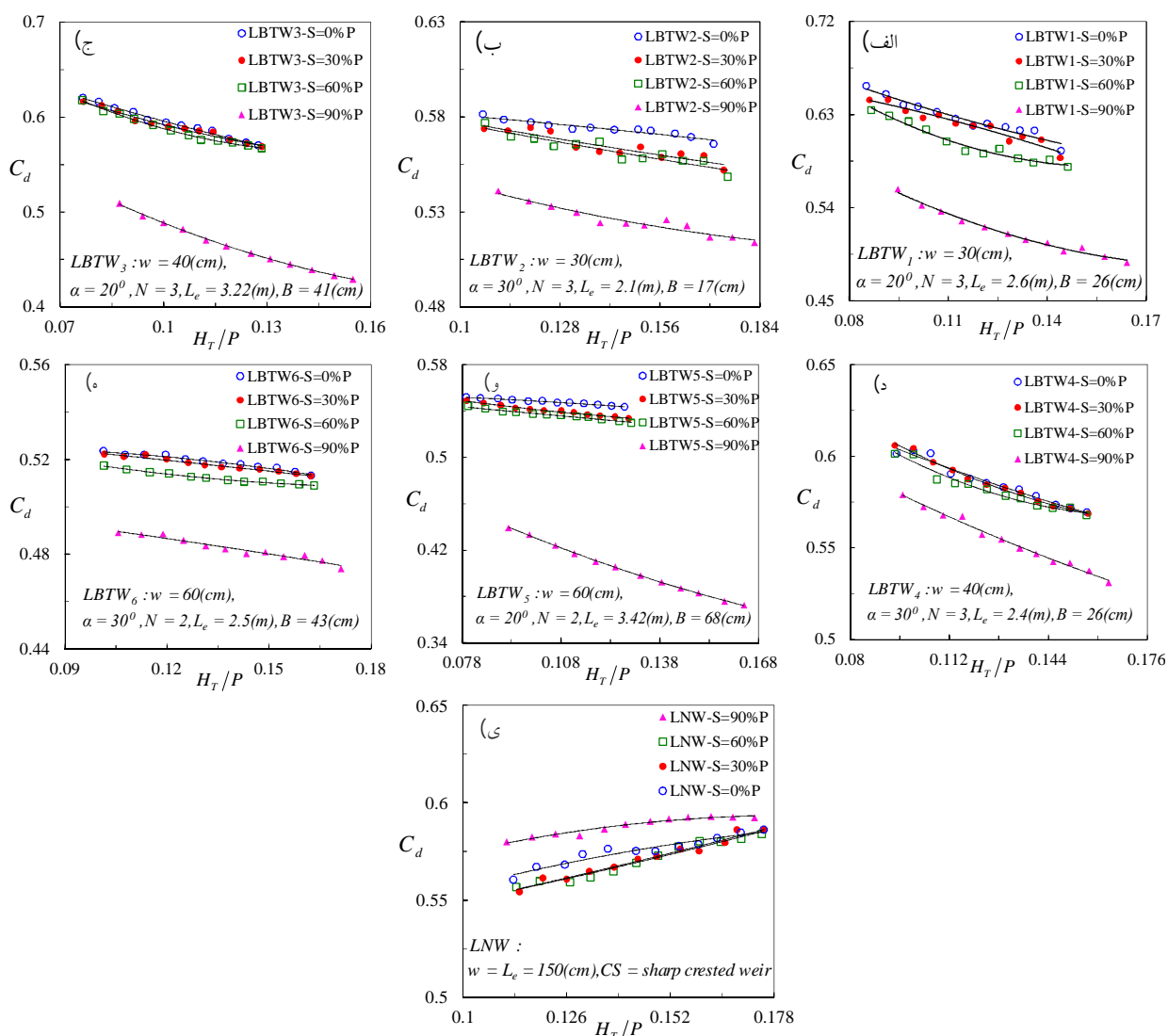
3-1- تأثیر تغییر تراز کف کانال بالادست بر عملکرد

سرریزهای پلان کنگره‌ای - دوزنقه‌ای

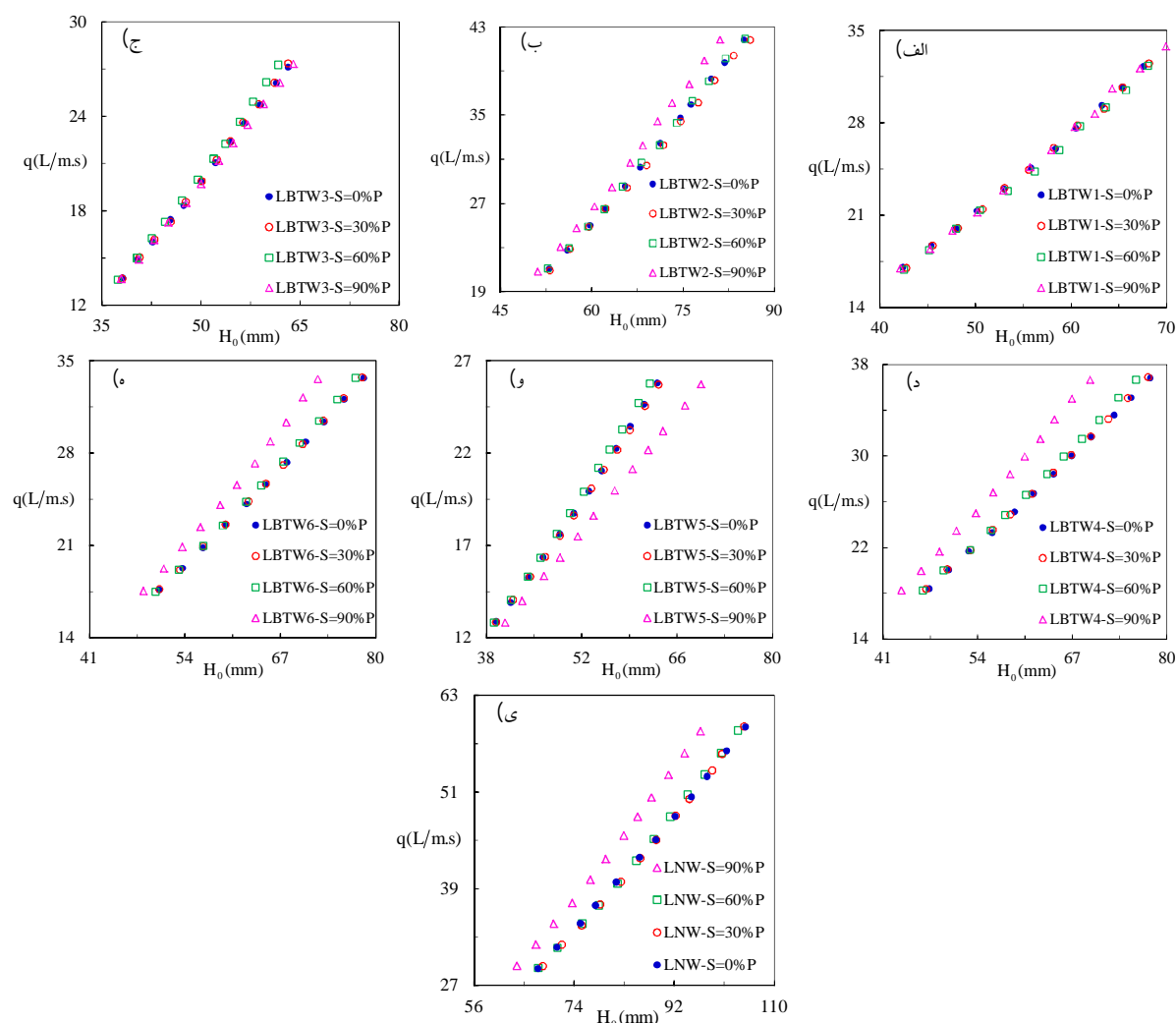
در جدول 2 و شکل‌های 5 و 6، به ترتیب تأثیر تغییر تراز کف کانال بالادست بر ضریب دبی جریان سرریز و دبی

جدول 2 مقایسه درصد تغییرات ضریب دبی جریان در سرریزهای پلان کنگره‌ای - ذوزنقه‌ای در دامنه دبی‌های مورد مطالعه

شماره سرریز	ضریب دبی جریان در سرریز برای شرایط عدم تغییر تراز کف در	ضریب دبی جریان در سرریزها برای تراز کف 90% در	درصد تغییر در سرریزها برای	درصد تغییر در سرریز با افزایش تراز کف کانال بالادست از 0 به 90% در
	دبی حداکثر	دبی حداقل	تراز کف 0%	تراز کف 90%
$LBTW_1$	0/59	0/66	0/48	-18
$LBTW_2$	0/56	0/58	0/51	-9
$LBTW_3$	0/57	0/62	0/43	-25
$LBTW_4$	0/57	0/6	0/53	-7
$LBTW_5$	0/54	0/55	0/37	-31
$LBTW_6$	0/51	0/52	0/47	-8
LNW	0/58	0/56	0/59	+1



شکل 5 مقایسه تغییرات ضریب دبی جریان سرریز برای شرایط مختلف هیدرولیکی و هندسه‌های سرریز کنگره‌ای در ترازهای مختلف از کف کانال بالادست: الف) $LBTW_1$ ، ب) $LBTW_2$ ، ج) $LBTW_3$ ، د) $LBTW_4$ ، و) $LBTW_5$ ، ه) $LBTW_6$ ، ی) LNW



شکل 6 مقایسه تغییرات دبی - اشل در ترازهای مختلف کف کانال بالادست و هندسه‌های مختلف سرریز کنگره‌ای:

الف) $LBTW_1$ ، ب) $LBTW_2$ ، ج) $LBTW_3$ ، د) $LBTW_4$ ، و) $LBTW_5$ ، ه) $LBTW_6$ ، ی) LNW

سرریز اتفاق نمی‌افتد.

همان‌طور که در نمودارهای شکل 6 ملاحظه می‌گردد، با افزایش تراز کف کانال بالادست به 90 درصد ارتفاع سرریز، هد بالادست جریان در هندسه $LBTW_5$ به مقدار 7 درصد و در هندسه $LBTW_3$ به مقدار 1 درصد، افزایش می‌یابد. در هندسه‌های $LBTW_1$ ، $LBTW_2$ ، $LBTW_4$ و $LBTW_6$ هد بالادست سرریز به ترتیب 1، 4، 9 و 6 درصد کاهش می‌یابد. به‌عنوان جمع‌بندی می‌توان بیان نمود که با افزایش تراز کف کانال بالادست به 90 درصد، هندسه‌های با زاویه راس بزرگ‌تر و طول سیکل در جهت جریان (B) کوچکتر، بیشترین کاهش را در تراز هد بالادست روی سرریز ایجاد می‌کنند.

مقایسه نتایج حاکی از آن است که در شرایط عدم تغییر تراز کف کانال بالادست و در ترازهای مورد بررسی کف کانال بالادست، شیب منحنی‌های ضریب دبی جریان و یا به‌عبارت دیگر کاهش ضریب دبی جریان در هندسه‌هایی از سرریز کنگره‌ای که دارای طول سیکل در جهت جریان (B) کوچکتری هستند، کمتر می‌باشد. در هندسه‌های مذکور، در شرایط عدم تغییر تراز و ترازهای کف کمتر از 90 درصد، تداخل جریان حتی در دامنه دبی‌های کم نیز رخ می‌دهد و با افزایش تراز کف کانال بالادست به 90 درصد، و به تبع آن افزایش سرعت جریان نزدیک‌شونده به سرریزها به دلیل کوتاهی پارامتر (B)، جریان سریع‌تر از سیکل‌های خروجی تخلیه می‌شود. در نتیجه در این نوع هندسه‌ها شیب ناگهانی در منحنی‌های ضریب دبی جریان

3-2- تأثیر هندسه سرریزهای پلان کنگره‌ای -

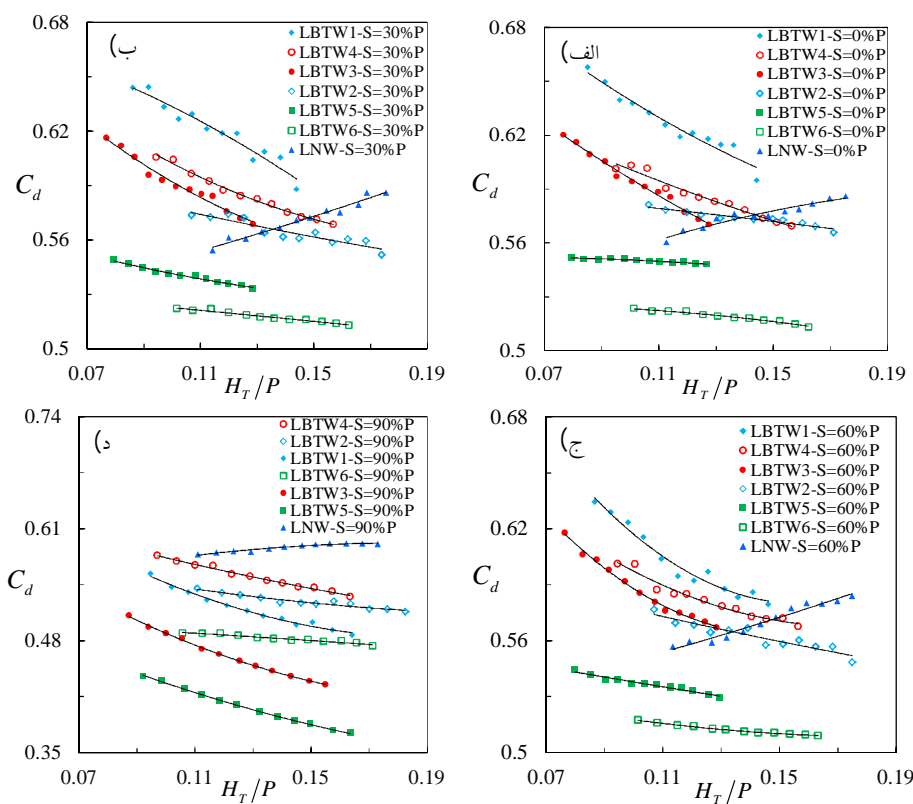
ذوزنقه‌ای بر ضریب دبی جریان

در نمودارهای شکل‌های 7 و 8، تأثیر تغییر هندسه سرریزهای پلان کنگره‌ای بر ضریب دبی جریان و دبی واحد طول این سرریزها در هر یک از ترازهای کف کانال بالادست نشان داده شده است. مقایسه نتایج نشان داد که ضریب دبی جریان هندسه‌های مختلف سرریزهای کنگره‌ای در ترازهای کف کانال بالادست کمتر از 90 درصد ارتفاع سرریز، مشابه می‌باشد، اما با افزایش تراز کف کانال بالادست به 90 درصد ارتفاع سرریز، به علت افزایش نقش سرعت جریان نزدیک‌شونده در این تراز نسبت به سایر ترازهای کف کانال بالادست، رفتار هیدرولیکی هندسه‌های مورد بررسی متفاوت می‌باشد. بررسی‌های صورت گرفته توسط (Crookston and Tullis (2013، بر روی ضریب دبی جریان سرریزهای پلان کنگره‌ای - ذوزنقه‌ای با زاویه‌های راس مختلف، نشان داده است که افزایش زاویه راس سیکل‌ها منجر به افزایش ضریب دبی

جریان سرریزهای کنگره‌ای می‌گردد.

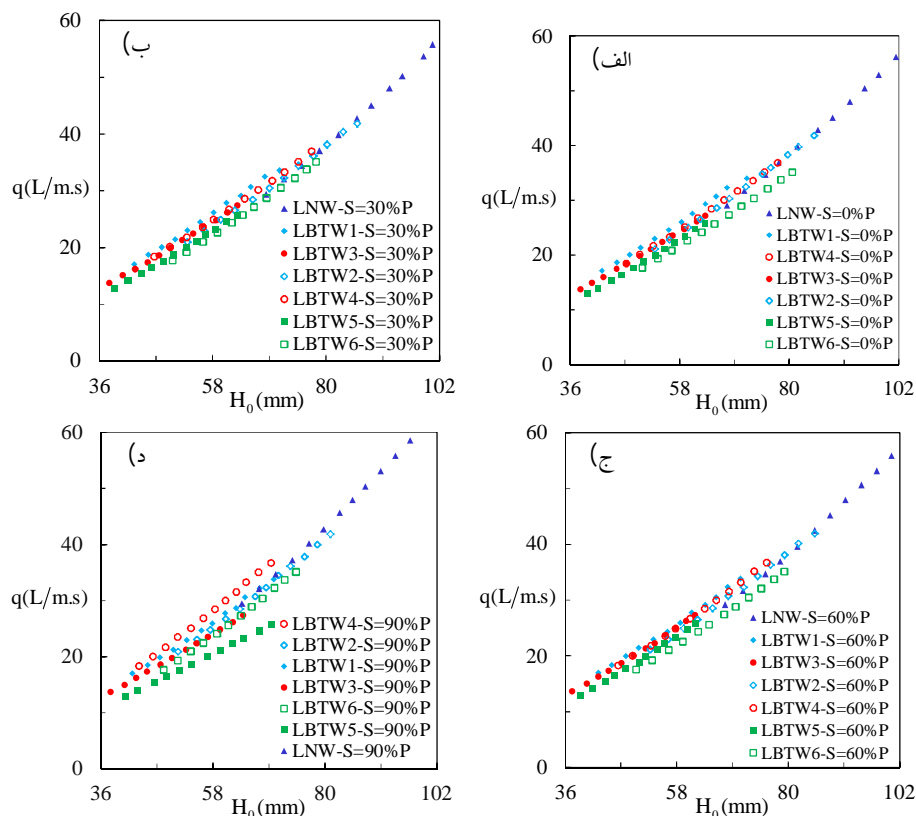
مشاهدات آزمایشگاهی و تجزیه و تحلیل نتایج در تحقیق حاضر نشان داد، علاوه بر زاویه راس سرریز، طول سیکل‌ها در جهت جریان (B) نیز تأثیر زیادی بر ضریب دبی جریان سرریزهای پلان کنگره‌ای در ترازهای مختلف از کف کانال بالادست دارند.

در سرریزهای کنگره‌ای با هندسه سه سیکل، بیشترین ضریب دبی جریان در ترازهای کف کانال بالادست کمتر از 90 درصد ارتفاع سرریز، مربوط به هندسه $LBTW_1$ (به ترتیب با عرض و طول سیکل 30 و 26 سانتی‌متر و زاویه راس سیکل 20 درجه) و کمترین ضریب دبی جریان مربوط به هندسه $LBTW_2$ (به ترتیب با عرض و طول سیکل 30 و 17 سانتی‌متر و زاویه راس سیکل 30 درجه) بود. در هندسه $LBTW_2$ ضریب دبی جریان سرریز در دامنه دبی‌های مورد آزمایش در دبی حداقل، 12 و در دبی حداکثر 5 درصد نسبت به هندسه $LBTW_1$ ، کاهش یافت.



شکل 7 مقایسه تأثیر تغییر هندسه سرریزهای پلان کنگره‌ای بر ضریب دبی جریان سرریز در ترازهای مختلف کف کانال،

(الف) $S = 0\%P$ ، (ب) $S = 30\%P$ ، (ج) $S = 60\%P$ ، (د) $S = 90\%P$



شکل 8 مقایسه تأثیر تغییر هندسه سرریزهای پلان کنگره‌ای - دوزنقه‌ای بر دبی واحد طول در ترازهای مختلف کف کانال مختلف، (الف) $S = 0\%P$ (ب) $S = 30\%P$ (ج) $S = 60\%P$ (د) $S = 90\%P$

هندسه‌های $LBTW_3$ و $LBTW_4$ دارای ضریب دبی جریان مشابه می‌باشند. در هندسه $LBTW_4$ با ثابت ماندن تعداد و عرض سیکل‌ها نسبت به هندسه $LBTW_3$ ، اثر مثبت افزایش زاویه که می‌تواند منجر به کاهش تداخل سفره‌های ریزشی شود، با اثر منفی کاهش طول سیکل‌های سرریز در جهت جریان (B) که باعث بیشتر شدن محدوده تداخلی سفره‌های ریزشی می‌شود، به گونه‌ای خنثی شده و در نتیجه ضریب دبی جریان آن نسبت به هندسه $LBTW_3$ تغییر محسوسی پیدا نکرد (شکل 10).

مشاهدات آزمایشگاهی حاکی از آن است که با ثابت ماندن تعداد و عرض سیکل‌ها، با وجود افزایش زاویه راس سرریز در هندسه $LBTW_6$ نسبت به هندسه $LBTW_5$ ، به دلیل کاهش طول سیکل در جهت جریان (B) آن از 68 به 43 سانتی‌متر، مساحت ناحیه تداخلی ناشی از برخورد سفره‌های ریزشی جریان بیشتر می‌گردد؛ در نتیجه،

مشاهدات آزمایشگاهی حاکی از آن است که با ثابت ماندن تعداد و عرض سیکل‌ها، با وجود افزایش زاویه راس سرریز در هندسه $LBTW_2$ ، به دلیل کاهش طول سیکل در جهت جریان (B) آن از 26 به 17 سانتی‌متر، تداخل سفره‌های ریزشی در طول بخش عمده‌ای از سرریز رخ می‌دهد (شکل 9). در نتیجه ضریب دبی جریان این سرریز در دبی‌های کم به طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد. با افزایش دبی جریان، ناحیه تداخلی سفره‌های ریزشی در فضای بین سیکل‌ها افزایش می‌یابد. از این رو هرچه طول سیکل در جهت جریان (B) کمتر باشد، جریان سریع‌تر می‌تواند از فضای سیکل‌ها خارج شود، در نتیجه، اتلاف مومنت کمتری در فضای بین سیکل‌ها در مقایسه با سیکل‌های با طول بیشتر رخ می‌دهد. به همین جهت میزان کاهش ضریب دبی جریان سرریز $LBTW_2$ در مقایسه با سرریز $LBTW_1$ در دبی حداکثر کمتر می‌باشد. همان‌طور که در منحنی‌های شکل 7 مشاهده می‌گردد،

تداخل تیغه‌های ریزشی جریان از دیواره‌های جانبی با یال‌های سیکل سرریز کنگره‌ای رخ داده و منجر به کاهش ضریب دبی جریان این هندسه نسبت به هندسه $LBTW_1$ می‌شود (شکل 11).

از این رو پیشنهاد می‌شود برای کاهش اثر دیواره‌های جانبی سرریزها، حداقل فاصله دیواره‌های جانبی سیکل‌ها از دیواره‌های کانال (L_s)، نصف عرض سیکل باشد. مقایسه‌های صورت گرفته حاکی از آن است که در تراز کف کانال بالادست کمتر از 90 درصد هندسه‌های با سه سیکل، ضریب دبی جریان بیشتری نسبت به هندسه‌های دو سیکل داشتند. به طوری که بیشترین و کمترین ضریب دبی جریان در بین هندسه‌های مورد مطالعه، به ترتیب مربوط به هندسه‌های $LBTW_1$ و $LBTW_6$ بودند. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که دبی واحد طول در هندسه $LBTW_1$ در دبی‌های حداقل و حداکثر در حدود 8 درصد نسبت به هندسه $LBTW_6$ بیشتر می‌باشد.

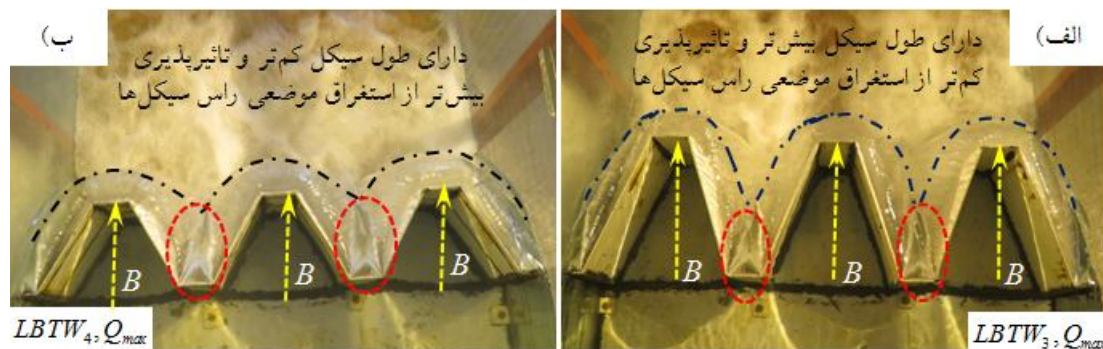
هندسه $LBTW_5$ دارای ضریب دبی جریان بهتری از هندسه $LBTW_6$ می‌باشد.

مقایسه نتایج نشان داد با ثابت ماندن تعداد و زاویه راس سیکل‌ها، افزایش عرض سیکل‌ها (w) و به تبع آن افزایش طول سیکل‌ها در جهت جریان (B)، منجر به افزایش ضریب دبی جریان سرریزها می‌شود. به عنوان نمونه در سرریزهای $LBTW_2$ و $LBTW_4$ ، افزایش طول (B) و عرض سیکل‌ها (w) به ترتیب از 17 و 30 به 26 و 40 سانتی‌متر، سبب افزایش ضریب دبی جریان این هندسه نسبت به هندسه $LBTW_2$ به مقدار 1 و 4 درصد در دبی‌های حداقل و حداکثر می‌گردد.

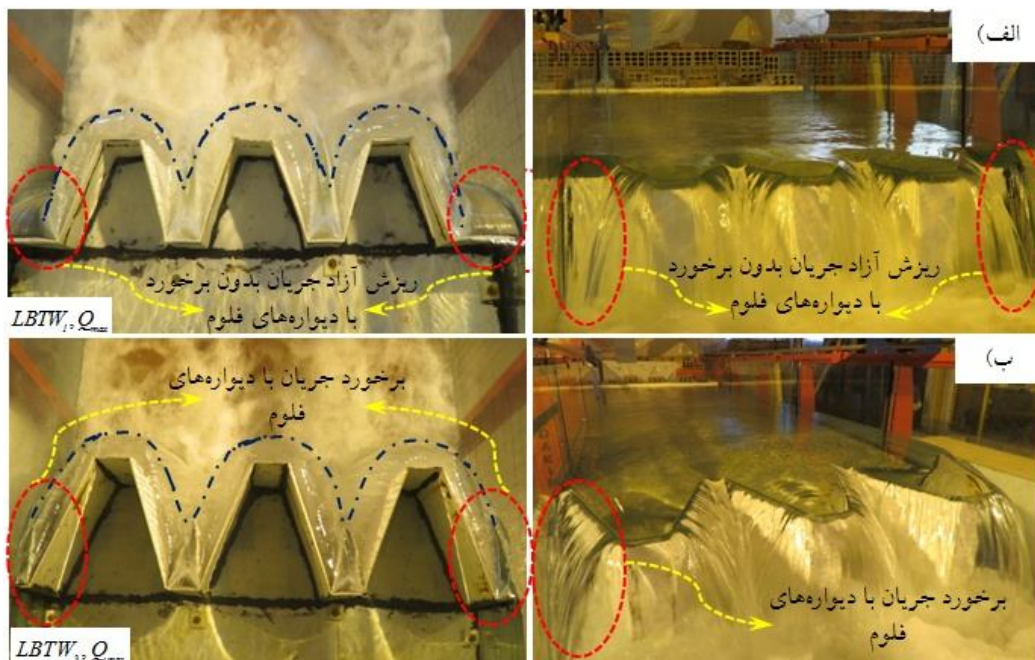
در هندسه‌های $LBTW_1$ و $LBTW_3$ که دارای تعداد و زاویه راس سیکل ثابت می‌باشند، انتظار می‌رود با افزایش عرض (w) و طول سیکل (B) به ترتیب از 26 و 30 به 41 و 40 سانتی‌متر، ضریب دبی جریان سرریز بهتر گردد، ولی به علت کم بودن فاصله دیواره‌های جانبی سرریز از دیواره‌های فلوم (L_s).



شکل 9 نمای بالای سفره‌های ریزشی جریان از روی تاج سرریز کنگره‌ای در تراز کف کانال 60 درصد برای هندسه‌های مختلف: الف) $LBTW_1$ ، ب) $LBTW_2$



شکل 10 نمای بالای سفره‌های ریزشی جریان از روی تاج سرریز کنگره‌ای در تراز کف کانال 60 درصد برای هندسه‌های مختلف: الف) $LBTW_3$ ، ب) $LBTW_4$

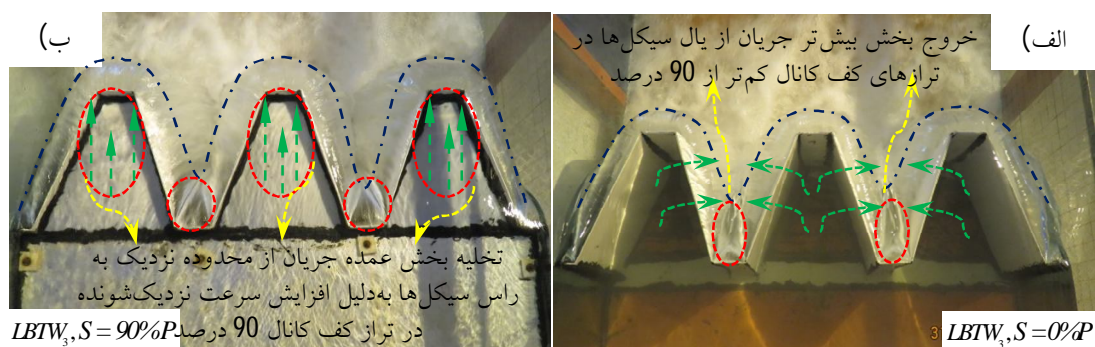


شکل 11 نمای بالا و روبرو از سفره‌های ریزشی جریان از روی تاج سرریز کنگره‌ای در تراز کف کانال 60 درصد برای دبی 88 لیتر بر ثانیه در هندسه‌های مختلف: (الف) $LBTW_1$ ، (ب) $LBTW_3$

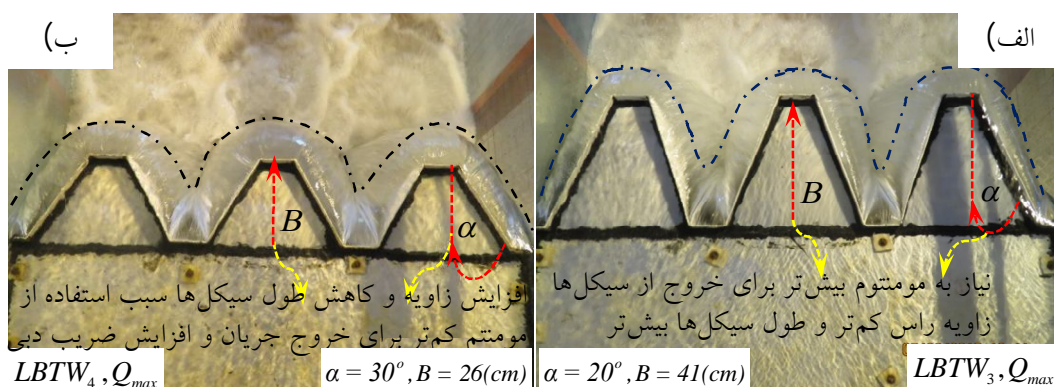
سیکل‌های ذوزنقه‌ای داشته و در نتیجه بخش بیشتری از جریان از محدوده نزدیک به راس خروجی سیکل‌ها تخلیه می‌گردد (شکل 12). از این رو انتظار می‌رود که در تراز کف کانال بالادست 90 درصد ارتفاع سرریز، کاهش زاویه سیکل‌ها و نیز افزایش طول آن‌ها در جهت جریان (B)، ضریب دبی جریان سرریزها را کاهش دهد (شکل 13). مقایسه نتایج حاکی از آن است که در تراز کف کانال بالادست 90 درصد، بین هندسه‌های سرریز کنگره‌ای مورد بررسی با ثابت ماندن تعداد و عرض سیکل‌ها، با افزایش زاویه راس سیکل‌ها (30 درجه) و به تبع آن کاهش طول آن‌ها در جهت جریان (B) هندسه‌های $LBTW_2$ ، $LBTW_4$ ، $LBTW_6$ ، نسبت به هندسه‌های متناظرشان با زاویه راس کمتر (20 درجه) و طول سیکل در جهت جریان (B) بیشتر یعنی $LBTW_1$ ، $LBTW_3$ و $LBTW_5$ ضریب دبی جریان بالاتری دارند. همچنین با ثابت ماندن تعداد و زاویه راس سیکل‌ها در بین هندسه‌های $LBTW_1$ و $LBTW_3$ (دارای سه سیکل و زاویه راس برابر با 20 درجه)، با افزایش عرض و به تبع آن طول سیکل در جهت جریان (B) در هندسه $LBTW_3$ (با عرض و طول سیکل در جهت جریان 40 و 41 سانتی‌متر) ضریب دبی جریان آن نسبت به هندسه $LBTW_1$ (با عرض و طول سیکل در جهت جریان 30 و 26 سانتی‌متر) کاهش یافت.

Kozak and Svab (1961) نیز در تحقیقات خویش در زمینه تأثیر تغییر هندسه بر ضریب دبی جریان سرریز کنگره‌ای - ذوزنقه‌ای در دامنه هد کم ($0/05 < H_T / P \leq 0/25$) بیان داشتند در محدوده هدای کم، تعداد زیادی از سیکل‌های کوچک، مؤثرتر و اقتصادی‌تر از یک سرریز کنگره‌ای متشکل از تعداد سیکل‌های کمتر و با طول مشابه است، زیرا در دامنه هد مورد مطالعه، ظرفیت تخلیه سرریزها به‌طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر زاویه دیواره جانبی سیکل‌ها و تداخل سفره‌های ریزشی جریان قرار نمی‌گیرند (Crookston, 2010).

همان‌طور که پیش از این بیان گردید در تراز کف کانال بالادست کمتر از 90 درصد، علاوه بر اثر زاویه راس سیکل‌ها، طول آن‌ها در جهت جریان (B) نیز نقش مهمی در ضریب دبی جریان سرریزهای کنگره‌ای دارد. مقایسه نتایج نشان داد با افزایش تراز کف کانال بالادست به 90 درصد ارتفاع سرریز، سرعت جریان نزدیک شونده به سرریز افزایش یافته و به تبع آن عمق جریان کاهش می‌یابد. مشاهدات آزمایشگاهی حاکی از آن بود که در نتیجه افزایش سرعت، طول پرتاب تیغه‌های ریزشی از لبه سرریزها افزایش می‌یابد. از سوی دیگر به علت افزایش سرعت جریان در محدوده سیکل‌های ورودی، خطوط جریان نیاز به مومنتوم بیشتری برای ریزش از طول یال



شکل 12 تصاویری از پلان سفره‌های ریزشی جریان از روی تاج سرریز کنگره‌ای- دوزنقه‌ای با هندسه $LBTW_3$ در دبی 88 لیتر بر ثانیه در ترازهای مختلف کف کانال بالادست: الف) عدم تغییر تراز کف، ب) تراز کف 90 درصد ارتفاع سرریز



شکل 13 تصاویری از پلان سفره‌های ریزشی جریان از روی تاج سرریز کنگره‌ای در تراز کف کانال 90 درصد برای دبی 88 لیتر بر ثانیه در هندسه‌های مختلف: الف) $LBTW_3$ ، ب) $LBTW_4$

درصد، می‌توان بیان نمود که در میان هندسه‌های مورد مطالعه، هندسه $LBTW_4$ (با سه سیکل، عرض سیکل 40 سانتی‌متر، طول سیکل در جهت جریان 26 سانتی‌متر و زاویه راس 30 درجه) بالاترین ضریب دبی جریان را در دامنه دبی‌های مورد مطالعه به خود اختصاص داد و هندسه $LBTW_5$ (با دو سیکل، عرض سیکل 60 سانتی‌متر، طول سیکل در جهت جریان 68 سانتی‌متر و زاویه راس 20 درجه) کمترین ضریب دبی جریان را داشت، به طوری که به ازای یک هد بالادست ثابت، دبی واحد طول سرریز در هندسه $LBTW_4$ در دبی‌های حداقل و حداکثر در حدود 30 درصد نسبت به هندسه $LBTW_5$ بیشتر می‌باشد.

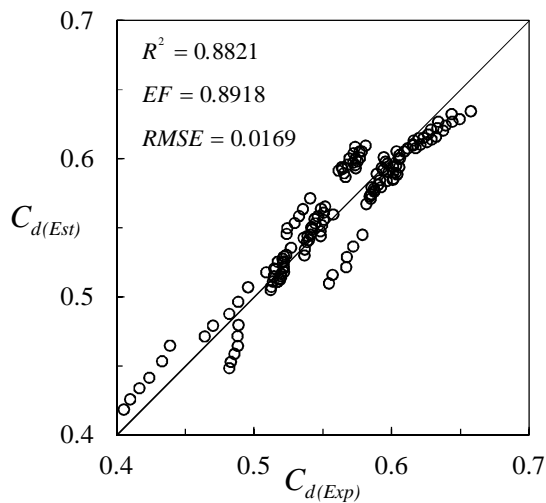
3-3- استخراج معادله رگرسیونی برای ضریب دبی

جریان سرریزهای پلان کنگره‌ای

همان‌طور که پیش از این بیان گردید، عملکرد سرریزهای

در بین هندسه‌های $LBTW_2$ و $LBTW_4$ با تعداد و زاویه راس سیکل برابر (دارای سه سیکل و زاویه راس 30 درجه)، با وجود افزایش عرض و به تبع آن طول سیکل در جهت جریان (B) در هندسه $LBTW_4$ (با عرض و طول سیکل در جهت جریان 40 و 26 سانتی‌متر) ضریب دبی جریان آن نسبت به هندسه $LBTW_2$ (با عرض و طول سیکل در جهت جریان 30 و 17 سانتی‌متر) بیشتر است، زیرا در هندسه $LBTW_2$ با افزایش دبی جریان، بخش بیشتری از سیکل‌ها در مقایسه با هندسه $LBTW_4$ دچار استغراق می‌گردند. مقایسه نتایج نشان داد که افت هد جریان در بالادست سرریز $LBTW_4$ به میزان دو برابر افت هد جریان در سرریز $LBTW_2$ می‌باشد. بنابراین پیشنهاد می‌شود برای کاهش اثر استغراق موضعی، طول سیکل در جهت جریان (B) باید بیشتر از نصف عرض سیکل (w) باشد.

به‌عنوان جمع‌بندی کلی در تراز کف کانال بالادست 90



شکل 14 ارزیابی عملکرد مدل رگرسیونی در برآورد ضریب دبی جریان در هندسه‌های مختلف سرریز پلان کنگره‌ای - ذوزنقه‌ای در مقابل داده‌های آزمایشگاهی برای ترازهای مختلف کف کانال بالادست

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر تغییر تراز کف کانال بالادست سرریز که می‌تواند ناشی از رسوب‌گذاری باشد، بر ضریب دبی سرریزهای پلان کنگره‌ای-ذوزنقه‌ای با هندسه‌های مختلف به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. هم‌چنین به منظور درک بهتر عملکرد سرریزهای کنگره‌ای در ترازهای مختلف کف کانال بالادست، سرریز خطی نیز مورد بررسی قرار گرفت. بررسی داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که در سرریز خطی در دامنه هد نسبی کل مورد بررسی در ترازهای مورد بررسی کف کانال بالادست، ضریب دبی این سرریز روند صعودی داشت.

افزایش تراز کف کانال بالادست تا 60 درصد ارتفاع سرریز در بالادست آن نسبت به شرایط عدم تغییر تراز کف کانال بالادست، تغییری در ضریب دبی جریان آن ایجاد نمی‌کند، ولی با افزایش بیشتر تراز کف کانال بالادست به 90 درصد ارتفاع سرریز، ضریب دبی جریان سرریز به طور متوسط 3/5 درصد افزایش می‌یابد.

رفتار سرریز کنگره‌ای به علت تداخل سفره‌های ریزشی و نیز اثر متقابل زاویه راس سیکل‌ها و طول آن‌ها در جهت جریان، متفاوت از سرریز خطی بود، به گونه‌ای که ضریب دبی جریان در تمامی هندسه‌های سرریز پلان کنگره‌ای-

کنگروه‌ای تحت تأثیر پارامترهای هندسی مختلفی نظیر زاویه و عرض راس سیکل‌ها، عرض، طول و تعداد سیکل‌ها در جهت جریان، شکل سرریزها در پلان و فاصله دیواره‌های جانبی سرریز از دیواره‌های کانال تحت شرایط هیدرولیکی مختلف، مانند رسوب‌گذاری در بالادست و به عبارت دیگر تغییر تراز کف کانال بالادست سرریز می‌باشد. بنابراین ارائه روابطی برای پیش‌بینی ضریب دبی جریان سرریزهای کنگره‌ای با هندسه‌های مختلف تحت شرایط هیدرولیکی یاد شده می‌تواند در مراحل اولیه طراحی این نوع سرریزها مفید باشد.

برای استخراج مدل رگرسیونی، تحلیل آماری بر روی پارامترهای هندسی مهم اثرگذار مورد مطالعه بر ضریب دبی جریان سرریزهای کنگره‌ای با افزایش رسوب‌گذاری در بالادست این سرریزها انجام پذیرفت. هم‌چنین برای تشریح بهتر هم‌بستگی میان نتایج آزمایشگاهی و مدل رگرسیونی در برآورد ضریب دبی سرریزهای پلان کنگره‌ای ذوزنقه‌ای، از آماره‌های ضریب تبیین (R^2)، راندمان مدل (EF) و میانگین مجذور مربعات خطا (RMSE) استفاده شد.

در استخراج معادله رگرسیونی، ترکیب‌های مختلف از پارامترهای اثرگذار که در معادله (7) آورده شده‌اند، در نرم‌افزار SAS 9 مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت رابطه (8) حاصل شد.

$$C_d = f(H_T/P, w/L_e, B/w, L_e/W, S/P, Fr) \quad (7)$$

$$C_{d(Est)} = -9.5619 + 11.0465(e^{\frac{H_T}{P}}) - 13.0238(\frac{H_T}{P}) - 0.00762(e^{\frac{L_e}{w}}) - 0.6228(e^{\frac{L_e}{w}}) - 0.1402(\frac{B}{w} \times e^P \times Fr^{1.3717}) \quad (8)$$

در نمودار شکل 14 مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و برآورد شده ضریب دبی جریان سرریز نشان داده شده است. با توجه به پارامترهای آماری بدست آمده می‌توان بیان داشت که معادله استخراج شده از مدل رگرسیونی در برآورد ضریب دبی جریان سرریزهای پلان کنگره‌ای-ذوزنقه‌ای در شرایط هیدرولیکی مختلف دارای دقت قابل قبولی می‌باشد.

5- فهرست علائم

A	عرض داخلی راس سیکل سرریز
B	طول سیکل در جهت جریان سرریز
C_d	ضریب دبی جریان در سرریز
Fr	عدد فرود جریان
g	شتاب گرانش
h_d	اختلاف رقوم سطح آب در دو طرف سرریز
H_0	هد بالادست جریان
H_T	هد کل بالادست جریان
l_c	طول خط مرکزی دیواره جانبی سرریز
$L_{c-cycle}$	طول خط مرکزی برای یک سیکل سرریز
L_e	طول مؤثر تاج سرریز
L_s	طول دیواره‌های جانبی سرریز
N	تعداد سیکل‌های سرریز
P	ارتفاع سرریز
P_d	تراز بستر پایاب
q	دبی واحد طول سرریز
Q	دبی جریان
Re	عدد رینولدز جریان
S	تراز کف کانال در بالادست سرریز (درصد)
T_w	تراز عمق پایاب
t_w	ضخامت دیواره سرریز
V	سرعت متوسط جریان در فلوم
w	عرض سیکل سرریز
W	عرض فلوم
W_e	عدد وبر جریان در فلوم
y	عمق جریان در کانال
CS	شکل تاج سرریز
NA	شکل ریزش تیغه آب
WP	مکان قرارگیری سرریز
α	راس سیکل سرریز (زاویه)
σ	کشش سطحی جریان
μ	لزجت دینامیک جریان

6- منابع

- اسمعیلی، م. و صفررضوی‌زاده، م. (1392). "بررسی مشخصات هیدرولیکی بر روی سرریزهای کنگره‌ای با پلان نیم‌دایره‌ای"، نشریه آب و خاک، جلد 27، شماره 1، ص.ص. 224-234.
- اژدری مقدم، م. و جعفری ندوشن، ا. (1392). "بهبودسازی

دوزنقه‌ای، با افزایش دبی جریان کاهش یافت، به طوری که متوسط کاهش آن در صورت عدم تغییر تراز کف کانال بالادست برای هندسه‌های مختلف $LBTW_1$ ، $LBTW_2$ ، $LBTW_3$ ، $LBTW_4$ ، $LBTW_5$ و $LBTW_6$ در دامنه دبی‌های مورد مطالعه به ترتیب 11، 3، 8، 5، 1 و 2 درصد بود. هم‌چنین مقایسه‌های صورت گرفته نشان داد، با افزایش تراز کف کانال بالادست به 90 درصد، به‌علت افزایش سرعت جریان نزدیک‌شونده به سرریز، ضریب دبی جریان هندسه‌های مختلف سرریز کنگره‌ای تغییر قابل ملاحظه‌ای می‌یابد، به طوری که متوسط کاهش آن برای هندسه‌های مختلف $LBTW_1$ ، $LBTW_2$ ، $LBTW_3$ ، $LBTW_4$ ، $LBTW_5$ و $LBTW_6$ در دامنه دبی‌های مورد مطالعه به ترتیب 14، 5، 16، 8، 15 و 3 درصد بود.

مقایسه نتایج حاصل از تغییر هندسه این سرریزها نشان داد که در ترازهای کف کانال بالادست کمتر از 90 درصد در صورت ثابت ماندن تعداد و عرض سیکل‌ها، افزایش زاویه راس سیکل‌ها و به تبع آن کاهش طول سیکل‌ها در جهت جریان سبب کاهش ضریب دبی جریان در این سرریزها می‌شود. هم‌چنین در ترازهای فوق با ثابت ماندن تعداد و زاویه راس سیکل‌ها، افزایش عرض سیکل‌ها و متعاقباً طول آن‌ها در جهت جریان منجر به افزایش ضریب دبی جریان در آن‌ها می‌گردد. در تراز کف کانال بالادست 90 درصد ارتفاع سرریز به‌علت افزایش سرعت جریان نزدیک‌شونده به سرریز، با ثابت ماندن تعداد و عرض سیکل‌ها، افزایش زاویه راس سیکل‌ها و متعاقباً کاهش طول سیکل‌ها در جهت جریان منجر به افزایش ضریب دبی جریان در این سرریزها می‌گردد. هم‌چنین در تراز یاد شده، در صورت ثابت ماندن تعداد و زاویه راس سیکل‌ها، افزایش عرض سیکل‌ها و متعاقباً طول آن‌ها در جهت جریان سبب کاهش ضریب دبی جریان در آن‌ها می‌شود. هم‌چنین تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد هندسه‌های با تعداد سیکل بیشتر ضریب دبی بیشتری نسبت به هندسه‌های با تعداد سیکل کمتر دارند. در نهایت معادله رگرسیونی، برای برآورد ضریب دبی جریان سرریزهای پلان کنگره‌ای دوزنقه‌ای در ترازهای مختلف کف کانال بالادست ارائه گردید.

- Crookston, B. M. and B. P. Tullis. (2013b). "Hydraulic design and analysis of labyrinth weirs. II: Nappe aeration, instability, and vibration". J. Irrig. Drain. Eng. 139(5): 371-377.
- Hay, N. and G. Taylor. (1970). "Performance and design of labyrinth weirs". J. Hyd. Div. Vol.96 (2): 2337-2357.
- Henderson, F. M. (1966). *Open channel flow*. New York, Macmillan Publishing Co. Inc.
- Khode, B. V., A. R. Tembhurkar, P. D., Porey and R., Ingle. (2012). "Experimental studies on flow over labyrinth weir". J. Irrig. Drain. Eng. 138(6): 548-552.
- Lux, F. and D. L. Hinchliff. (1985). "Design and construction of labyrinth spillways". 15th Congress of ICOLD, Lausanne, Switzerland, 249-274.
- Lux, F. (1993). "Design methodologies for labyrinth weirs". Proc. of Water Power and Dam Construction, ASCE. 93(2): 1379-1407.
- Taylor, G. (1968). "The performance of labyrinth weirs". PhD. Thesis, University of Nottingham, Nottingham, England.
- Savage, B., B. M. Crookston and S. Paxson. (2016). "Physical and numerical modeling of large headwater ratios for a 15° labyrinth spillway". J. Hydraul. Eng., [10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001186](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001186), 04016046.
- Subramanya, K. (1986). *Flow in open channel*. Second Edition, Tata McGraw-Hill, New Delhi.
- سرریز کنگره‌ای-ذوزنقه‌ای با استفاده از مدل فازی-عصبی و الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی سد *Ute* در ایالات متحده آمریکا)، نشریه عمران، سال 24، شماره 2، ص.ص. 129-138.
- دستورانی، م. و نصر آبادی، م. (1391). "اثر ته‌نشینی رسوبات در پشت سرریز اوجی بر شرایط جریان"، مجله پژوهش آب ایران، سال 6، شماره 10، ص.ص. 1-10.
- دیزجی، ن. و محمودخانی، ا.م. (1388). "بررسی تجربی تأثیر رسوبات بر ضریب تخلیه در سرریزهای مثلثی، مستطیلی، اوجی و روگذر در کانال باز"، مجله علمی-پژوهشی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، سال 3، شماره 8، ص.ص. 39-50.
- یاسی، م. و محمدی، م. (1386). "بررسی سرریزهای زیگزاگی با پلان قوسی"، مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه صنعتی اصفهان، سال یازدهم، شماره چهل و یک، الف، ص.ص. 1-12.
- Carollo, F. G., V. Ferro and V. Pampalone. (2012). "Experimental investigation of the outflow process over a triangular labyrinth weir". J. Irrig. Drain. Eng. 138(1): 73-79.
- Crookston, B. M. (2010) "Labyrinth weirs". Ph.D. dissertation, Utah State Univ., Logan, UT.
- Crookston, B. M. and B. P. Tullis. (2013a). "Hydraulic design and analysis of labyrinth weirs. I: Discharge relationships". J. Irrig. Drain. Eng. 139(5): 363-370.