تأثیر پارامترهای هندسی سرریزهای کنگره‌ای بر مشخصات هیدرولیکی و هیدرودینامیکی جریان

سجاد سمیعی[1]، امیر حمزه حقی‌آبی[2*]، منوچهر حیدرپور[3] و بابک شاهی نژاد[4]

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران.

۲*- نویسنده مسئول، استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم آباد،ایران Haghiabi.a@lu.ac.ir

۳- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

۴- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران.

دریافت: بازنگری: پذیرش:

چکیده

در این مطالعه، از سه مدل هندسی سرریز کنگره‌ای، از جمله سرریز لبه تیز، سرریز سیلندری و سرریز ربع سیلندری استفاده شد. همچنین برای مشخص کردن تأثیر سیکل سرریز کنگره‌ای بر مشخصات هیدرولیکی و هیدرودینامیکی، دو سیکل از مدل سرریزها مورد آزمایش قرار داده شد. برای بررسی تأثیر پارامترهای هندسی سرریز کنگره‌ای بر هیدرودینامیک جریان از ابزار سرعت سنج صوتی استفاده شد. در شبکه‌بندی در نظر گرفته شده در بالادست سرریز، میزان آشفتگی در بالادست سرریز در مدل‌های مختلف آزمایشگاهی محاسبه شد. نتایج نشان داد، در بالادست سرریز ربع سیلندری برگشت جریان (سرعت منفی) کمترین مقدار نسبت به دیگر مدل‌های آزمایشگاهی است و سریزهای کنگره‌ای سیلندری و لبه تیز به‌ترتیب در رده‌های بعدی قرار می‌گیرند. همچنین بررسی نمودارهای آشفتگی در ارتفاع مختلف در سرریز های کنگره‌ای به ازای بیشترین دبی در حالت جریان آزاد نشان داد، به خاطر برگشت جریان در بالادست سریز ربع سیلندری میزان شدت آشفتگی در بالادست این سرریز به مراتب تا متوسط ۲۱/۱و ۲۸/۸ درصد کمتر از سرریز کنگره‌ای سیلندری و لبه تیز می‌باشد. همچنین نتایج آنالیز کوادرانت در بالادست مدل‌های آزمایشگاهی سرریز کنگره‌ای نشان داد، که انتقال اشفتگی در بالادست سرریز لبه به خاطر تغییرات سرعت است که پدیده‌های هیدردینامیکی Sweep و Ejection مقادیر بیشتر را به‌دست می‌آورند. در حالی که بررسی نتایج این آنالیز نشان داد که آشفتگی در بالادست سرریز سیلندری و ربع سیلندری بیشتر حاصل از تغییرات مومنتم است که از بالا بودن مقادیر پدیده‌های هیدردینامیکی Inward و Outward می‌باشد.

کلید واژه ها: سرریز کنگره‌ای، هیدرودینامیک جریان، جریان آزاد، آشفتگی، کوادرانت.

مقدمه

به‌منظور کنترل سطح آب در کانال‌های آبیاری از دریچه‌ها و سرریزها استفاده می‌شود. انواع مختلفی از سرریزها در شبکه‌های آبیاری مورد استفاده قرار می‌گیرد که می‌توان به سرریزهای لبه تیز، لبه پهن، نوک اردکی و ... اشاره نمود. سرریز کنگره‌ای یکی از سرریزهای است که با توجه به طول زیاد آن تغییرات ارتفاع آب بالادست نسبت به دبی در آن کمتر می‌باشد و برای استفاده در شبکه‌های آبیاری مناسب است. همچنین با درخواست افزایش آب ذخیره مخازن، حداکثر باران محتمل و نیاز مداوم به امنیت سد اکثر سرریزهای موجود کوچک بوده و نیاز به اصلاح دارند. چون دبی سرریزهای آزاد تابعی از طول تاج، ارتفاع آب بالادست و شکل تاج سرریز است و محدودیت در ارتفاع آب بالادست وجود دارد. به سه روش افزایش عرض سرریز، کاهش ارتفاع تاج سرریز و افزایش طول در جای سرریز موجود به وسیله جایگزینی سرریز خطی موجود با سرریز غیرخطی می‌توان راندمان دبی را افزایش داد. افزایش عرض سرریز به دلیل هندسه سد و هزینه غیرعملی است، همچنین با کاهش ارتفاع کل سرریز ارتفاع نرمال مخزن و در نتیجه حجم ذخیره مخزن کاهش می‌یابد. بنابراین این دو روش برای افزایش راندمان دبی مناسب نیستند اما در یک عرض ثابت با جایگزینی سرریز غیرخطی با سرریز طول تاج سرریز و درنتیجه دبی افزایش می‌یابد. یک نوع از سرریزهای غیرخطی سرریز کنگرهای می‌باشد که در پلان دارای خطوط شکسته و دیوارهای پیوسته است و به‌طور کلی به‌صورت ذوزنقه‌ای، مثلثی و مستطیلی ساخته می‌شوند. .اولین بار Taylor (1968) به‌طور گسترده‌ای رفتار هیدرولیکی سرریز کنگره‌ای با شکل تاج نیم‌دایره‌ای و لبه تیز را بررسی کرد. نتایج نشان داد که بازده سرریز کنگره‌ای در ارتفاع‌های کم آب بالادست، بهتر است و دبی بیشتری نسبت به سرریزهای خطی عبور می‌دهد (Taylor, 1968).

Hay و Taylor (1970) نسبت دبی سرریز کنگره‌ای به سرریز خطی را معرفی کردند که بر این اساس روشی برای

طراحی سـرریز کنگـره ای ذوزنقه‌ای و مثلثی ارائه کردنـد. همچنـین پیشـنهاد کردنـد در شـرایط استغراق از سرریز کنگره‌ای استفاده نشود، چون فضـای هـوادهی زیـر جت آب از بین می‌رود.

Lux (1985) بـا اسـتفاده از نتـایج تجربـی و تحلیـل ابعادی روش طراحی ساده‌تری با نسبت عرض سیکل به ارتفاع سرریز بزرگتر از دو ارائه کردند.

نتایج Cassidy et al. (1985) نشـان داد کـه راندمان سرریزهای کنگره‌ای در مقادیر بالای ارتفاع آب بالادسـت بـه‌طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از مقادیری است که مطالعه‌های دیگر نشـان می‌دهد.

Tullis et al. (1995a) ، سرریزهای خطی و کنگره‌ای مثلثی بـا تـاج نـیم دایره‌ای را بررسی کرد. نتایج نشان داد که راندمان دبی سرریز کنگره‌ای با افزایش ارتفاع کل آب بالادست کاهش می‌یابد و راندمان شـکل تاج نیم دایره‌ای بیشتر از شکل تاج ربع دایره‌ای، صاف و لبه تیز اسـت.

Magalhães و Lorena (1989) ، منحنی‌های شـبیه منحنـی‌هـای داروا‌س بـرای شکل تاج اوجی را توسعه دادند و رابطه‌ای بی‌بعـد بـرای ضـریب دبـی ارائه کردند

نتایج Tacail et al. (1990)، نشان دادکه در عـرض‌هـای مشابه در سرریز کنگره‌ای، سرریزهای کنگره‌ای دو سیکلی نسبت به سرریزهای کنگـره‌ای سه سیکلی بهتر عمل می‌کنند و سرریزهای کنگره‌ای با دو سیکل دارای ضرایب دبی بیشتری نسبت به سررزهای با سه سیکل می‌باشند. آن‌ها همچنین نشان دادند کـه جریـان عبوری از روی سرریزهای کنگره‌ای نسبت بـه سـرریزهای دریچـه‌دار ایمن‌تر و اقتصادی‌تر است.

Waldron (1994) ، مـدل فیزیکـی سـرریزهای کنگره‌ای ذوزنقه‌ای و خطی را آزمایش کـرد و نشـان داد کـه ضـریب دبی مستقل از تعداد سیکل کنگـره‌ای اسـت و حـداکثر ضـریب دبـی جایی است که حداکثر مقدار هوادهی وجود داشته باشد. پیشـنهاد کـرد از متوسط ضریب دبی برای طراحی استفاده شود.

Tullis et al. (1995b) آزمایش‌هایی روی سرریز کنگره‌ای بـا زاویـه‌هـای کنـاری مختلـف انجام داده و رابطه (۱) را برای ضریب دبی به‌دست آوردند.

$$C_d = A_1 + A_2\left(\frac{H}{P}\right) + A_3\left(\frac{H}{P}\right)^2 + A_4\left(\frac{H}{P}\right)^3 + A_5\left(\frac{H}{P}\right)^4 \qquad (۱)$$

در این رابطه A_1، A_2، A_3، A_4 و A_5 ضرایب ثابت هستند. این پژوهشگران اظهار داشتند با استفاده از رابطه (۱) و رابطـه (۲)که فرمول دبی سرریز خطی است، می‌توان مقدار دبی سرریز کنگـره ای را تخمین زد.

$$Q = C_d \frac{2}{3}\sqrt{2g}LH^{\frac{3}{2}} \qquad (۲)$$

در این رابطه Q دبی سرریز، L طول تاج سرریز، H ارتفاع آب روی تاج سرریز و Cd ضریب دبی سریز می باشد.

Khode et al. (2012)، آزمایش‌هایی روی سرریز کنگره‌ای ذوزنقه‌ای با زاویه کناری مختلف انجام دادنـد. نتـایج نشان داد ضریب دبی واحد عرض سرریز در ابتدا با افزایش ارتفـاع آب به مقدار حداکثر خود می‌رسد و بعد به سرعت کاهش می‌یابد.

Javaheri و Kabiri Samani (2011) ، با استفاده از مـدل فیزیکـی بـه بررسـی سرریز کنگره‌ای مستطیلی پرداختند. نتایج نشان داد کـه ضـریب دبـی سرریز کنگره‌ای مستطیلی به میـزان قابـل توجـه ای افـزایش یافتـه و نسبت به سرریز مستقیم لبه تیز و کنگـره ای مثلثـی بـه‌ترتیـب دو و پنج برابر شده است و رابطه‌ای را بـرای محاسـبه ضـریب دبـی پیشـنهاد کردند.

در بسیاری از مطالعه‌ها، بررسی آشفتگی به‌عنوان هدف پژوهش در نظر گرفته شده است. در ادامه به تعدادی از این مطالعه‌ها اشاره شده است.

Ota et al. (2017) ، در رابطه با تأثیر جریان گردابه‌ای تشکیل شده درپشت سرریز در انتقال رسوبات مطالعه‌هایی را انجام داد، نتایج آن‌ها نشان داد تغییر شرایط هیدرولیکی باعث کاهش یا افزایش قدرت این جریان گردابه تشکیل شده در بالادست سرریز ها می گردد. همچنین در این تحقیق با مقایسه مدل نرم‌افزاری با مدل آزمایشگاهی سرریز لبه تیز بیان شد که بیشترین مقدار آبشستگی بالادست در ناحیه ای اتفاق می‌افتد که بیشترین شدت آشفتگی وجود داشته باشد. پروفیل گودال آبشستگی در بالادست سد های بتنی برداشت شد و در نهایت با ترسیم پروفیل در زمان‌های مختلف، تأثیر شرایط جریان بر افزایش آبشستگی بیان شد.

Guan et al. (2014) ، مطالعه‌ای در رابطه با تأثیر عدد رینولدز و شدت آشفتگی بر گودال آبشستگی سرریزها لبه تیز مستغرق در پایین و بالادست سرریز ارایه نمود. این مطالعه به تأثیر پارامتر های جریان از جمله شدت آشفتگی و تنش های رینولدز بر افزایش ارتفاع آبشستگی در سرریزهای لبه تیز می پردازد. در این تحقیق با استفاده از داده‌های سرعت سنجی ADV ، اجزای سرعت، اندازه‌گیری و محاسبه شد. در ادامه با استفاده از این پارامترها، مشخصه‌های جریان از جمله تنش رینولدز جریان و شدت آشفتگی از روابط ارایه شده در مراجع حساب شد. با مقایسه این نتایج با ارتفاع گودال آبشستگی حاصل از جریان مشخص شد، که آشفتگی و تنش رینولدز در مکانی که بیشترین مقدار باشند بیشترین عمق آبشستگی رخ می‌دهد. با توجه به تحقیق حاضر می‌توان این موضوع را برداشت کرد که شدت آشفتگی تأثیر زیادی بر افزایش آبشستگی دارد و در مکان‌هایی که نیاز به آبشستگی

است مثل خروجی سد، می‌توان از این راهکار بهره برد (Guan et al., 2014; Guan et al.,2015; Guan et al.,2016).

Guan et al., (2015) با توجه به تأثیر آشفتگی بر انتقال رسوبات در پایین دست و بالادست سرریز ها، گودال آبشستگی در پایین دست و بالا دست سرریز را با استفاده از داده‌های سطح سنجی برداشت کرد و روابطی برای تخمین آبشستگی بالادست و پایین‌دست سرریزهای لبه تیز ارایه داد. این مطالعه‌ها در دو بخش مستغرق و غیر مستغرق پیگیری شد. که در حالت مستغرق به‌علت کاهش شدت آشفتگی در پایین‌دست و بالادست شرایط جریان باعث کاهش رسوب‌شویی در بالادست می‌گردد. همچنین رو ابط تخمین عمق آبشستگی در پایین‌دست و بالادست سرریزها با استفاده از روش آنالیز ابعادی مورد ارزیابی قرار گرفت و روابطی برای تخمین این عمق از پارامترها و شرایط هیدرولیکی جریان ارایه شده است.(Guan et al., 2015 and 2016)

مطالعه‌ها بر روی سرریزهای سینوسی و کسینوسی در یک سیکل نشان از تأثیر شکل هندسی سرریز بر آشفتگی در بالادست سرریزهای دارد، (Salehi and Azimi, 2022; Salehi et al., 2022a; Azimi and Salehi, 2022; Salehi et al., 2021a; Salehi et al., 2021b; Salehi et al., 2019)

Oreizi et al. (2015) ، با استفاده از داده‌های سرعت‌سنجی در پشت سرریز آشفتگی جریان و تأثیرات آن بر ضریب دبی جریان، بررسی شد. در این پژوهش ضریب دبی این نوع سرریز محاسبه شد و روابطی با توجه به عمق بالادست سرریز برای جریان آزاد ارایه شد. نتایج ارایه شده متوسط ضریب دبی را تقریباً برابر با مقدار ۰/۵۷ پیشنهاد می کند. همچنین نتایج بررسی اغتشاش و آشفتگی روی سرریز سینوسی نشان داد که این نوع سرریز نسبت به سرریز لبه تیز مستطیلی در حدود ۱۵ درصد میزان شدت آشفتگی را افزایش می‌دهند. این امر باعث جلوگیری از رسوب‌گذاری در پشت بدنه بالادست سرریز می‌شود. فرق این نوع سرریز با سرریز مورد مطالعه در تحقیق حاضر تفاوت در تابع استفاده شده در فشردگی سرریز می باشد. بدین صورت که در سرریز سینوسی از تابع سینوس در بازه صفر تا ۳۶۰ درجه از تاج سرریز تا ارتفاع بالای سرریز، استفاده شده است.

Salehi et al., (2018) ، از تابع کسینوس با بازه صفر تا ۱۸۰ درجه در دیواره‌های سرریز برای اعمال فشردگی استفاده شد. همچنین شدت تلاطم در بالادست سرریز در شبکه پشت سرریز محاسبه شد. Oreizi et al. (2015) در مطالعه سرریز سینوسی از نقطه‌های تصادفی برای برداشت شدت آشفتگی استفاده می شد. تعداد این نقاط ۱۵ نقطه پیشنهادی در مطالعه‌ها می‌بود ولی در تحقیق سرریز کسینوسی برای مقایسه شدت آشفتگی تعداد حداقل ۶۶ نقطه برای ترسیم منحنی های شدت آشفتگی استفاده شد.

Crookston و Tullis (2012) ، وضعیت جریان را روی سرریزهای نوک اردکی خم دار بررسی و ارزیابی نمودند. در این تحقیق چندین سرریز نوک اردکی بر عکس جریان و به‌صورت متوالی در مدل آزمایشگاهی ساخته شدند. این مجموعه سرریزها به‌صورت خط صاف بر جریان بعنوان مدل‌های شاهد در نظر گرفته شدند و مدل‌هایی به‌صورت قوس دار(ساخته شده بر روی کمانی از دایره) به عنوان مدل‌های آزمایشی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. نتایج این تحقیق نشان داد با ساختن این سرریزها بر روی کمانی از دایره باعث کاهش آشفتگی و جدایش جریان می‌شود که به خودی خود این مسئله باعث افزایش ضریب جریان و همچنین طول مؤثر می‌شد. همچنین نتایج حاصل از تحلیل آشفتگی در دماغه‌ی این سرریزها نشان می‌دهد جدایش جریان در نوک سرریز و قسمت حمله باعث کاهش ضریب جریان می‌شود. با تغییر شکل این سرریز به‌صورت کمانی از دایره این مشکل بهبود پیدا کرد. همچنین با توجه به تعداد سرریزهای نوک اردکی و طول موازی بر جریان این نوع سرریزها، آزمایش‌ها پیگیری شد. و بهترین طول و تعداد این سرریز ها مشخص شد. با توجه به اینکه در مطالعه‌ها بر روی سرریز کنگره‌ای، پارامترهای هیدرودینامیکی مورد بررسی قرار داده نشده است، تحقیق حاضر با استفاده از طرح آزمایشگاهی، به بررسی میزان آشفتگی در طول سرریز و بالادست سرریزهای کنگره‌ای با هندسه مختلف می‌پردازد. همچنین با استفاده از روش‌های هیدرولیکی، ضرایب هیدرولیکی و هیدرودینامیک برای سرریزهای کنگره‌ای لبه تیز، ربع سیلندری و سیلندری در دو سیکل مورد بررسی و آزمایش قرار داده شده است.

مواد و روش‌ها

در این بخش مبانی تئوری و تجهیزات آزمایشگاهی ارائه می‌گردد.

فلوم آزمایشگاهی

آزمایش‌های سرریزهای کنگره‌ای در فلوم آزمایشگاهی استاندارد، واقع در دانشگاه صنعتی اصفهان انجام پذیرفت. عرض این کانال ۴۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۵۰۰ میلی‌متر می‌باشد. دبی حداکثر این کانال برابر با ۳۲ لیتر بر ثانیه می‌باشد. برای ایجاد شرایط استغراقی مختلف، از یک دریچه لولایی در پایین‌دست فلوم استفاده شد (شکل۱).

مدل آزمایشگاهی سرریز کنگره‌ای

درشکل (۲)، شمایی از مدل‌های آزمایشگاهی سرریزهای کنگره‌ای مورد استفاده در این پژوهش، نمایش داده شده است. در ردیف اول، دوم و سوم به‌ترتیب سرریزهای کنگره‌ای لبه تیز، سیلندری و ربع سیلندری نمایش داده شده است. همچنین به ازای ستون‌های شکل (۲)، دو سیکل از سرریزهای کنگره‌ای مورد آزمایش قرار داده شد. روند آزماش‌ها بدین صورت بود که به ازای شرایط آزاد، عمق آب روی تاج سرریز با استفاده از پوینت گیج اندازه‌گیری می‌شد. همچنین با استفاده از دریچه تعبیه شده در انتهای کانال آزمایشگاهی، به ازای اعمال شرایط استغراق مختلف

در پایین‌دست سرریزهای کنگره‌ای، عملکرد این سرریز در زمان استغراق مورد ارزیابی قرار داده شد. شایان ذکر است که برای پیگیر آزمایش‌های هیدرولیکی از پنج دبی به‌ترتیب ۶/۵، ۱۱/۲، ۱۶/۶، ۱۹/۹ و ۲۴/۲ لیتر بر ثانیه استفاده شد. همچنین استغراق پایین‌دست سرریز در ده تراز ارتفاعی در طول آزمایش‌ها در نظر گرفته شد و به ازای این شرایط ضریب دبی جریان در حالت آزاد و همچنین ضریب کاهش دبی به ازای نرخ استغراق برآورد شد.

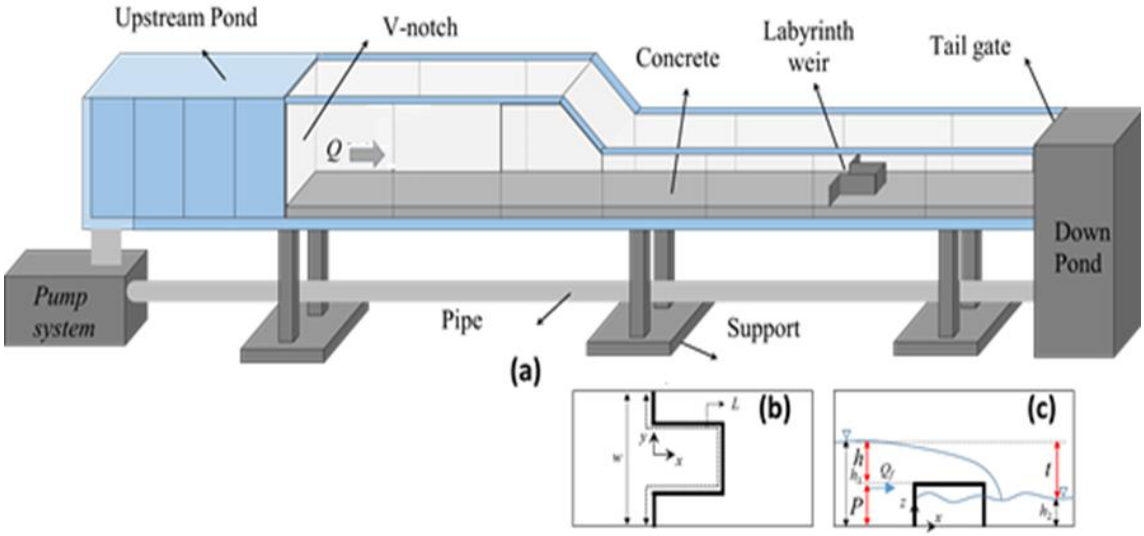


Fig.1-Experimental models and Flume: a) Sketch of experimental flume and equipment, b) plan of considered parameters, c) side view of considered parameters

شکل ۱- فلوم و مدل‌های آزمایشگاهی، الف) شمایی از کانال آزمایشگاهی و تجهیزات آن، ب) نمای قائم پارامترهای در نظر گرفته شده در پژوهش، ج) نمای افقی پارامترهای در نظر گرفته شده در پژوهش

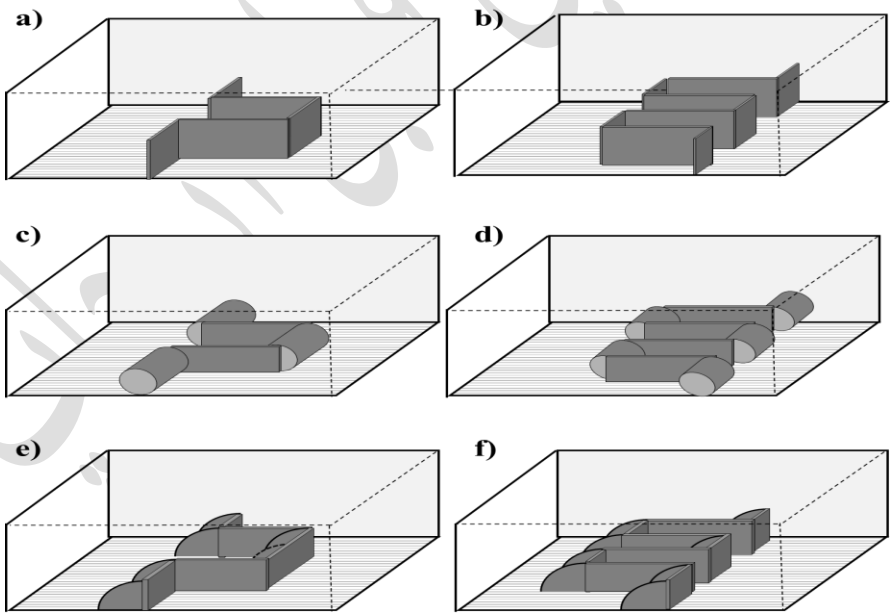


Fig.2- Experimental labyrinth weirs: a) one-cycle sharp crested labyrinth weir, b) two-cycle sharp crested labyrinth weir, c) one-cycle cylindrical labyrinth weir, d) two-cycle cylindrical labyrinth weir, e) one-cycle quarter cylindrical labyrinth weir, f) two-cycle quarter cylindrical labyrinth weir

شکل ۲- مدل آزمایشگاهی سرریز کنگره‌ای، الف) سرریز کنگره‌ای لبه تیز تک سیکل، ب) سرریز کنگره‌ای لبه تیز دو سیکل، ج) سرریز کنگره‌ای سیلندری تک سیکل، د) سرریز کنگره‌ای سیلندری دو سیکل، و) سرریز کنگره‌ای ربع سیلندری تک سیکل، ه) سرریز کنگره‌ای ربع سیلندری دو سیکل

برآورد پارامترهای دبی ، تراز آب، سرعت و آشفتگی

اندازه‌گیری دبی جریان توسط دبی سنج الکترومغناطیس در بالادست سرریز نصب شده روی لوله خروجی پمپ و همچنین به روش حجمی در پایین دست جریان انجام می شد. تراز سطح آب توسط عمق سنج با دقت ±۱ میلی‌متر برداشت شد. تحلیل میدان جریان و بردارهای سرعت در بالادست سرریز با استفاده از داده-های اندازه گیری شده سرعت سنج سه بعدی (ADV) انجام شد (شکل ۳).

ویژگی‌های دستگاه‌های ۲۰۰ مگا هرتزی عبارتند از:

۱- تعداد قرائت ۲۰۰ داده در هر ثانیه

۲- حجم کنترل= ۰/۰۹ میلی متر مکعب

۳- فاصله فرستنده پالس تا موقعیت حجم نمونه پنج سانتی‌متر

۴- محدودهٔ سرعت قابل برنامه ریزی

۳ – ۱۲ – ۳۲ – ۱۲۲ – ۲۵۲ Cm/s

جریان در فاصله ۴/۵ متری از ابتدای کانال (با توجه به بررسی پروفیل سرعت و یکسان شدن پروفیل در طول کانال) توسعه یافته است. از این رو، سرریزها تقریباً در وسط کانال آزمایشی و در فاصله ۴/۵ متری از ابتدای کانال نصب گردیده شد. برای بررسی شدت آشفتگی در بالادست سرریزهای کنگره‌ای از شبکه‌بندی برای برداشت داده‌های سرعت با توجه به شکل (۴- الف) استفاده شد. کلیه آزمایش‌ها در شرایط زیر بحرانی انجام گرفت. لازم به ذکر است، برای برداشت مقادیر سرعت و بررسی جریان در بالادست مدل‌های آزمایشگاهی از خط ممتد در مرکز کانال و در فواصل مشخص (با توجه به شکل(۴-ب)) استفاده شد.، در مقاطع مختلف (z_1 تا z_6) در راستای قائم در نقاط ارتفاعی مختلف، اجزا سرعت افقی، عرضی و قائم برداشت شد. در نهایت با استفاده از نرم‌افزار WinADV و انجام پروسه فیلتر داده‌های برداشتی (SNR>5 و CORR>75%) کانتورهای مختلف سرعت در صفحه X-Z ترسیم شد.

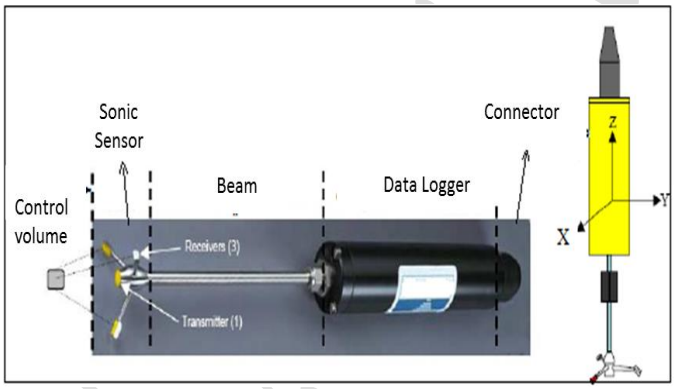


Fig.3- Acoustic velocity doppler probe 200 Hz

شکل۳- تصویر دستگاه اندازه گیری سرعت سنج بروش صوتی انعکاسی ۲۰۰ مگا هرتز

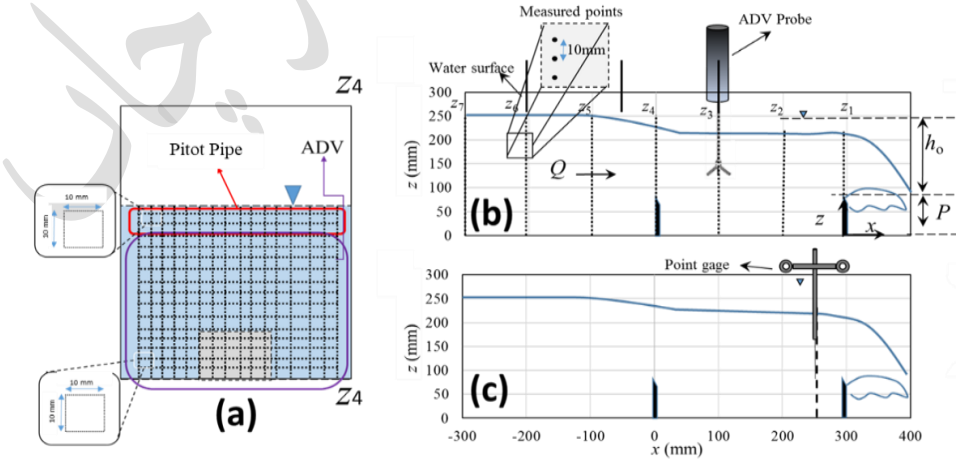


Fig.4- Position of Grid screen at the upstream of labyrinth weirs: a) grid screen, b) x-z plate location for velocity measuring, c) Measurment of the water surface level

شکل٤-محل برداشت سرعت در بالادست سرریزهای کنگره‌ای، الف) شبکه‌بندی در نظر گرفته شده برای برداشت سرعت در بالادست سرریزهای کنگره‌ای، ب) برداشت سرعت در صفحه*x-z*، ج) برداشت پروفیل سطح آب با استفاده از پوینت‌گیج.

نحوه انجام آزمایش‌ها

در این پژوهش ابتدا مدل‌های آزمایشگاهی سرریز کنگره‌ای با هندسه لبه تیز، سیلندری و ربع سیلندری در تعداد تک و دو سیکل، مورد بررسی هیدرولیکی قرار داده شد. از این جهت به ازای دبی در حالت جریان آزاد، ارتفاع آب بر روی سرریزهای کنگره‌ای با استفاده از پوینت‌گیج قرائت شد. با استفاده از فرمول کلی سرریزها رابطه (۲)، مقادیر ضریب دبی در حالت جریان آزاد، برای سرریزهای آزمایشگاهی مورد پژوهش اندازه‌گیری شد. در نهایت، با استفاده از روش برازش منحنی، معادله‌هایی در جهت تخمین ضریب دبی ارایه شد. در ادامه با در نظر گرفتن دبی جریان، با استفاده از دریچه‌ی انتهایی فلوم آزمایشگاهی، ارتفاع تراز آب در پایین‌دست سرریز افزایش داده شد. با در نظر گرفتن رابطه (۳)، مقادیر ضریب کاهش دبی به ازای میزان استغراق مختلف، برای سرریزهای کنگره‌ای مورد آزمایش، برآورد شد و به ازای سرریزهای مختلف کنگره‌ای مورد آزمایش ضریب (a) برآورد و تخمین زده شد. در ادامه با استفاده از سرعت سنج صوتی، مقادیر سرعت افقی و قائم در صفحه x-z در بالادست سرریزهای مورد آزمایش به ازای حداکثر دبی، اندازه‌گیری و ترسیم شد و شرایط مختلف و عوامل تأثیرگذار بر تغییرات سرعت در بالادست سرریز کنگره‌ای مورد بحث و بررسی قرار داده شد. همچنین در صفحه بالادست سربزهای کنگره‌ای ، میزان آشفتگی با استفاده از معادله ویلککس معادله (۴) به ازای حداکثر دبی در حالت جریان آزاد، برآورد شد. در ادامه، در نقطه بالادست سرریز کنگره‌ای در نزدیکی بستر آنالیز کوادرانت مورد بررسی قرار داده شد. در ادامه به این مورد پرداخته شده است. (Wilcox 1988; Salehi and Azmi 2019; Slehi et al., 2021b).

$$\psi = 1 - \left(\frac{t}{h}\right)^{a} \qquad (۳)$$

$$TKE = \frac{(v_x{}'^2 + v_y{}'^2 + v_z{}'^2)^{1/2}}{3v_{ave}} \qquad (۴)$$

در رابطه (۴) ، مقادیر v'_x ، v'_y و v'_z به‌ترتیب نوسانات سرعت در جهت‌های منحنی مختصات و v_{ave} سرعت متوسط طولی جریان در بالادست اطلاق می گردند.

آنالیز کوادرانت

به‌طور متعارف روش کوادرانت شامل مطالعه رابطه بین نوسانات زمانی اجزای سرعت u' و w' (به‌ترتیب نوسان سرعت در راستای جریان و در راستای عمق جریان) و به‌ویژه رابطه آن‌ها با سیستم مثلثاتی چهارگانه می‌باشد. آنالیز کوادرانت سهم هر رخداد در تعیین تنش رینولدز را مشخص می‌کند و همبستگی این دو پارامتر حضور ساختار جریان‌های منسجم را تأیید می‌کند. در این چهار کوادرانت :ربع اول: رویداد جریان بیرونی(Outward interactions) که در آن $u' > 0$ و $w' > 0$. ربع دوم: رویداد جریان پسزنی (Ejections) که در آن $u' < 0$ و $w' > 0$ ، ربع سوم: رویداد جریان درونی (Inward interactions) که در آن $u' < 0$ و $w' < 0$. ربع چهارم: رویداد جریان رفت و برگشتی (Sweep) که در آن $u' > 0$ و $w' < 0$.

سیکلی که شامل چهار رویداد ذکر شده در بالا می‌باشد، پدیده ترکشی یا انفجاری نامیده می‌شود. خصوصیات این رخداد با استفاده از خصوصیات آماری مقادیر نوسانات سرعت در جهت x و در جهت عمق z برآورد می‌شود. برای این کار اجزای نوسانات سرعت u' و w' در مقابل یکدیگر رسم می‌شوند و صفحه چهارگانه کوادرانت را تشکیل می‌دهند. در شکل (۵) چهار نوع واقعه ترکشی و نوسانات مؤلفه‌های سرعت در چهار ربع سیستم مختصات نشان داده شده است. حرکت در جهت جریان اندازه حرکت زیاد سیال و حرکت در خلاف جهت جریان اندازه حرکت کم سیال را نشان می‌دهد. رخداد جریان پس‌زنی حرکت سیال با سرعت کم از دیواره‌ها و رخداد جریان رفت و برگشتی حرکت سیال با سرعت زیاد به سمت دیواره‌ها را توصیف می‌کند. برای متمایز کردن عامل بزرگتر ایجاد کننده $-u'w'$ در هر کوادرانت و خارج کردن u' و w' با افزایش زمان نمونه‌برداری، پارامتری به نام H تعریف می‌گردد. ناحیه هایپربولیک هاشور خورده در شکل (۵) ناحیه چاله یا هول نامیده می‌شود.(Mahmudi Moghadm et al., 2022; Salehi et al., 2022a; Salehi and Azimi, 2024; Salehi et al., 2023; Salehi et al., 2018).

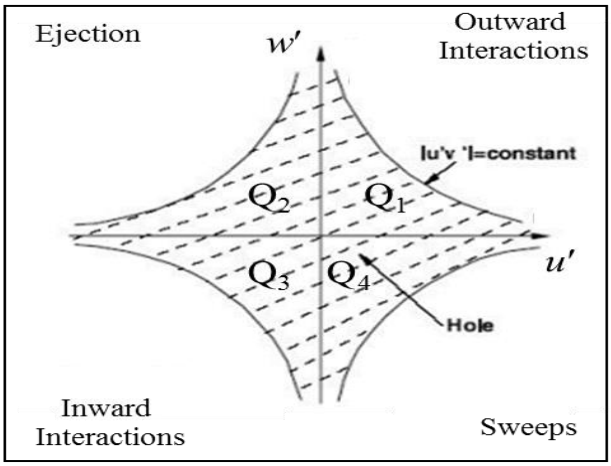


Fig.5- Quadrant analysis

شکل۵- چهار نوع واقعه ترکشی و خصوصیات نوسانات سرعت

نتایج و بحث

در این بخش، نتایج به‌دست آمده از این پژوهش مورد بحث و بررسی قرار داده شده است. ابتدا، به بررسی پارامترهای هیدرولیکی روی سرریزهای کنگره‌ای پرداخته شده است. در ادامه، به بررسی تغییرات سرعت در بالادست سرریزهای کنگره‌ای پرداخته شده است. همچنین نتایج آنالیزهای آشفتگی در صفحه بالادست سرریزهای کنگره‌ای بررسی شد. با در نظر گرفتن نتایج آنالیز کوادرانت در نقطه واقع در بالادست سرریز کنگره‌ای (فاصله-ای مماس با لبه‌ی سرریز و در نزدیکی کف کانال)، رخدادهای هیدرولیکی به ازای سرریزهای کنگره‌ای مورد بحث و بررسی قرار داده شد.

ضریب دبی جریان

در شکل (۶)، مقادیر ضریب دبی جریان به ازای جریان آزاد ترسیم شده است. با در نظر گرفتن مقادیر دبی در مقادیر مختلف و اندازه‌گیری با استفاده از دبی سنج مغناطیسی نصب شده در ابتدای کانال، مقدار ارتفاع آب بر روی تاج سرریزهای کنگره‌ای اندازه-گیری شد. در نهایت با در نظر گرفتن رابطه دبی بر روی سرریز رابطه (۲)، مقدار ضریب دبی اندازه‌گیری و در شکل (۶-ب) ترسیم شد. همچنین با توجه روش برازش منحنی، روابطی برای برآورد ضریب دبی ارایه شد. این روابط در جدول یک نمایش داده شده است. همچنین در جهت مقایسه مقایسه‌ها نشان می‌دهد، که با افزایش ارتفاع آب بر روی تاج سرریز کنگره‌ای بر عکس سریز لبه تیز مستطیلی، دبی جریان روند کاهشی خواهد داشت. همچنین ضریب دبی برای سرریز سیلندری، بیشترین مقادیر را برای ارتفاع آب یکسان بر روی تاج سرریز به‌دست آورده شده است. این امر می‌تواند نشان دهنده‌ی تأثیر بدنه‌ی سیلندری سرریز کنگره‌ای بر افزایش ضریب دبی باشد. همچنین در جدول (۱) مقادیر ضرایب a و b برای رابطه زیر ارایه شده است. شایان بیان است، با توجه به شماره روابط در جدول (۱)، روابط در شکل (۶) ترسیم شدند و میانگین مربعات خطا برآورد شد. که نتایج این بررسی نشان داد که روابط ارایه شده، تخمین قابل قبولی برای مقادیر ضریب دبی را برای سرریزهای کنگره‌ای ارایه می‌دهد.

$$C_d = a\left(\frac{h}{P}\right)^b \qquad (۵)$$

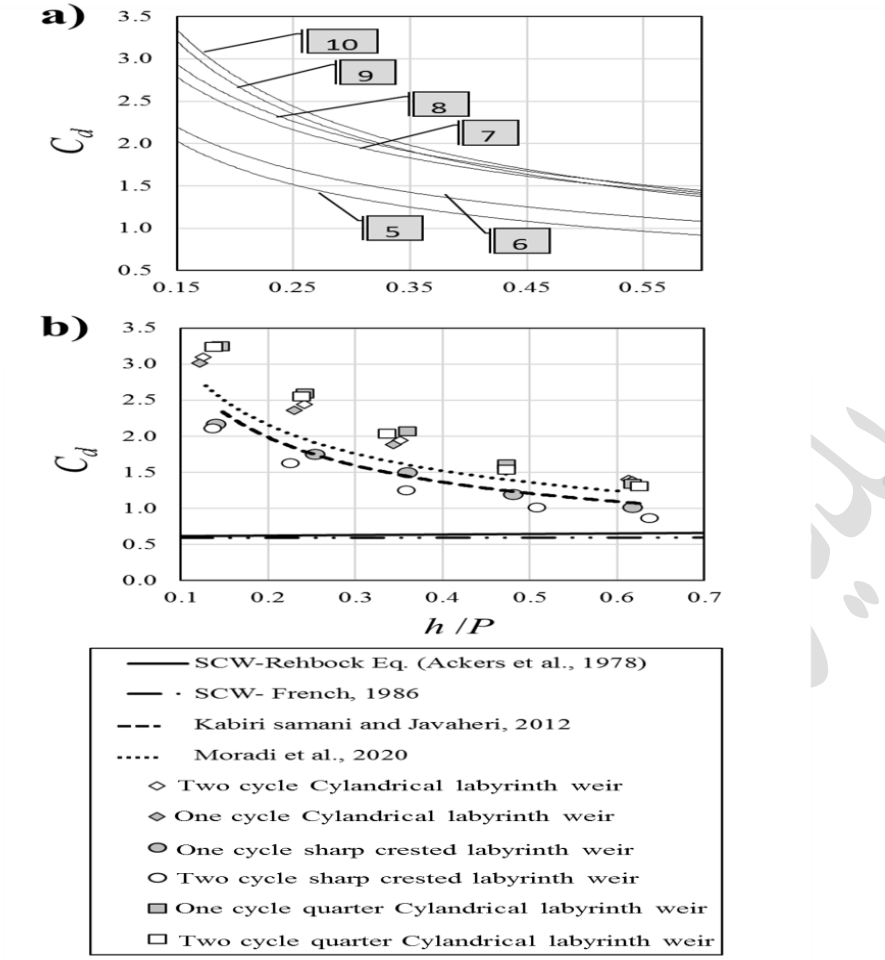


Fig.6- Discharge coefficent for free flow: a) Proposed equations, b) Coefficent dicahrge values

شکل٦- برآورد ضریب دبی جریان در حالت آزاد، الف) روابط ارایه شده، ب) ضرایب دبی آزمایشگاهی

جدول ۱-مقادیر ضریب a و b برای معادله (۵)

Table 1- Values of the *a* and *b* for equation (5)

Eq. No.	Weir Type	a	b	R^2
5	One-cycle sharp crested labyrinth weir	0.657	-0.572	0.98
6	Two-cycle sharp crested labyrinth weir	0.832	-0.511	0.96
7	One-cycle cylindrical labyrinth weir	1.035	-0.618	0.98
8	Two-cycle cylindrical labyrinth weir	1.004	-0.613	0.97
9	One-cycle quarter cylindrical labyrinth weir	1.08	-0.496	0.97
10	Two-cycle quarter cylindrical labyrinth weir	1.113	-0.-511	0.98

ضریب کاهش دبی

در جهت تعیین تأثیر استغراق بر کاهش دبی بر روی سرریز کنگره‌ای، مقادیر ضریب کاهش دبی با استفاده از رابطه (۱۱) برآورد شد، شکل (۷–الف). همچنین به ازای نرخ استغراق مختلف در پایین‌دست سرریز مقدار ضریب a در معادله (۳) برای برآورد ضریب کاهش دبی برای انواع سرریزهای کنگره‌ای مورد آزمایش، محاسبه شد. در جدول (۲) این مقادیر نمایش داده شده است. این روابط در شکل (۷–ب) نمایش داده شده‌اند.

$$Q_S = \psi Q_f \qquad (۱۱)$$

Q_S دبی مستغرق، Q_f دبی در حالت جریان آزاد و ψ ضریب کاهش دبی می‌باشد. در نهایت، با استفاده از ضریب کاهش دبی و محاسبه دبی مستغرق براساس روابط جران آزاد، مقدار دبی در حالت مستغرق محاسبه می‌گردد.

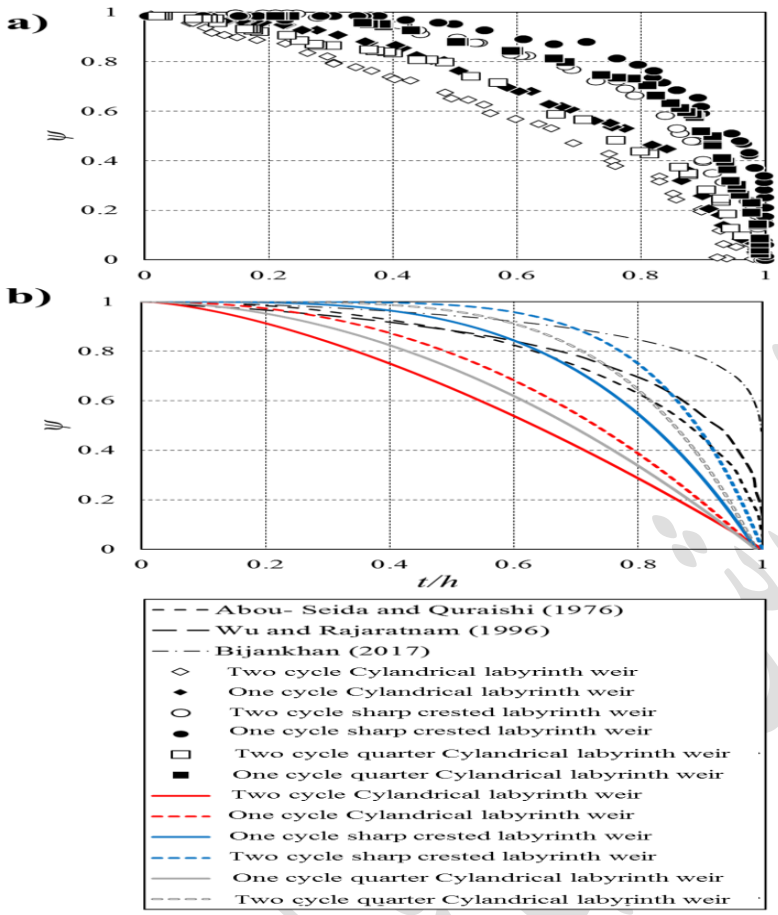


Fig.7- Discharge reduction factor for submerged condition: a) Propsed equations, b) Coefficent dicahrge values

شکل۷- ضریب کاهش دبی به ازای استغراق، الف) ضریب کاهش دبی با توجه به داده‌های آزمایشگاهی، ب) معادلات ارایه شده

جدول۲- مقادیر ضریب a و b برای معادله (۱۱)

Table 2- Values of the a and b for equation (11)

Eq. No.	Weir Type	a	R^2
12	One-cycle sharp crested labyrinth weir	3.75	0.89
13	Two-cycle sharp crested labyrinth weir	6.21	0.91
14	One-cycle cylindrical labyrinth weir	2.32	0.88
15	Two-cycle cylindrical labyrinth weir	1.51	0.86
16	One-cycle quarter cylindrical labyrinth weir	1.95	0.90
17	Two-cycle quarter cylindrical labyrinth weir	4.91	0.89

ضرایب معادلات انرژی و مومنتوم

در این تحقیق، با استفاده از روابط (۱۸) و (۱۹) مقادیر ضرایب معادله‌های انرژی و مومنتوم برای پروفیل‌های سرعت (اندازه‌گیری شده توسط سرعت سنج (ADV) . نتایج این بررسی در جدول (۳)، شکل (۸) و شکل (۹) نمایش داده شده است. همان‌طور که مشخص است، به ازای فاصله گرفتن مقادیر ضرایب انرژی و مومنتوم از عدد یک، میزان آشفتگی در پروفیل و یا مقطع مورد بررسی بیشتر خواهد شد. همان‌طور که در شکل (۹) مشخص

است، با نزدیک شدن به تاج سرریز پایین‌دستی و ورود به کنگره‌های سرریز، مقادیر ضریب انرژی و مومنتوم به‌صورت محسوسی افزایش پیدا خواهند کرد. نتایج این مقایسه‌ها نشان می‌دهد، بیشترین میزان افزایش این ضرایب متعلق به سرریز کنگره‌ای تک سیکل لبه‌تیز مستطیلی است و حداقل مقادیر این ضرایب به سرریز کنگره‌ای ربع سیلندری دو سیکل اختصاص داده می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد که با ورود به درون کنگره‌ها، می‌توان بیان داشت که مقدار آشفتگی جریان در این مکان به‌صورت محسوسی افزایش پیدا کرده هست. همچنین مقایسه‌ها بین تعداد سیکل‌ها سرریزهای کنگره‌ای با هندسه و شرایط تاج یکسان، حاکی از این مطلب دارد که به ازای افزایش تعداد سیکل برای سرریز کنگره‌ای، میزان آشفتگی سرریز کاهش پیدا خواهد کرد.

$$\alpha = \frac{\int_{o}^{h} u^3 dA}{AV^3_{ave}} \qquad (۱۸)$$

$$\beta = \frac{\int_{o}^{h} u2dA}{AV^2_{ave}} \qquad (۱۹)$$

Table 3- Vaules of energy and momentum indexes

جدول۳- مقادیر ضریب معادله انرژی و مونتوم

Weir Type	α (x= -300 mm)	α (x=0mm)	β (x= -300mm)	β (x=0mm)
One-cycle sharp crested labyrinth weir	2.12	3.12	2.12	3.24
Two-cycle sharp crested labyrinth weir	1.74	4.15	1.74	4.32
One-cycle cylindrical labyrinth weir	1.82	2.79	1.80	2.80
Two-cycle cylindrical labyrinth weir	1.70	2.31	1.70	2.62
One-cycle quarter cylindrical labyrinth weir	2.42	2.91	2.42	3.20
Two-cycle quarter cylindrical labyrinth weir	1.99	2.11	2.22	2.80

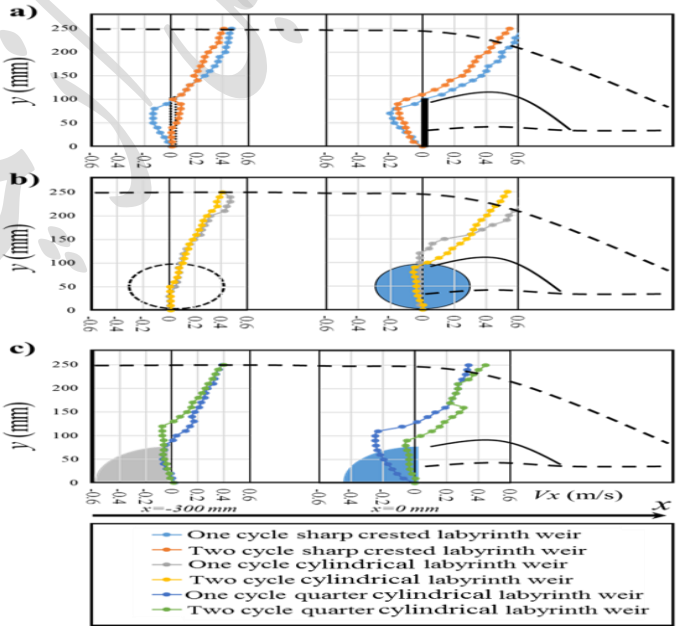


Fig.8- Vertical velocity profile at the upstream

شکل۸- پروفیل قائم سرعت افقی در بالادست سرریز

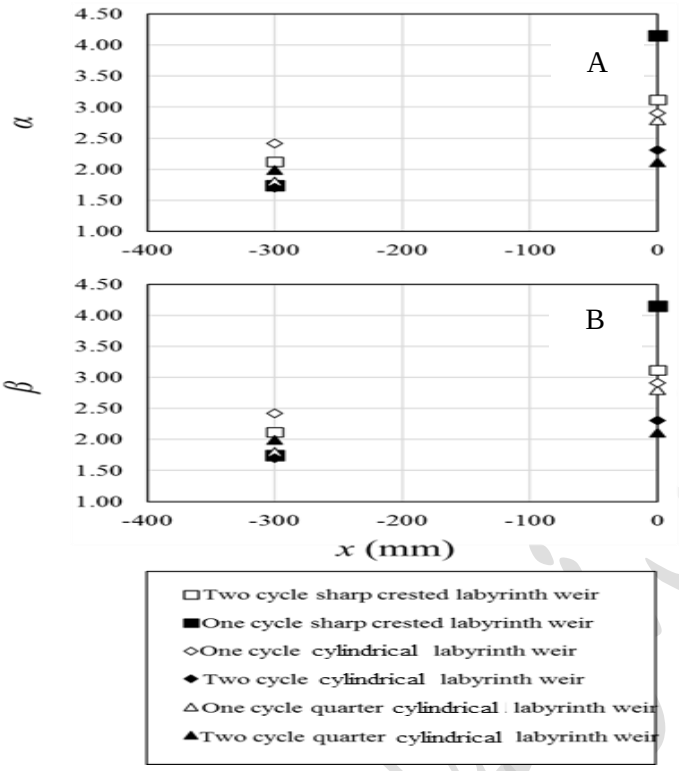


Fig.9- Energy and momentum at the upstream
شکل۹- ضرایب معادله انرژی و مونتوم در بالادست سرریز

سرعت افقی و قائم

در شکل (۱۰)، کنتورهای افقی و همچنین برآیند سرعت افقی و قائم در صفحه x-z در بالادست مدل‌های آزمایشگاهی سرریزهای کنگره‌ای مورد آزمایش، ترسیم شده است. همان‌طور که در شکل (۱۰) مشخص است، هر سطر شکل مخصوص به یک سیکل از سرریزهای مورد آزمایش می‌باشد. سطر اول شکل، مربوط به سرریزهای کنگره‌ای تک سیکل. شکل (۲) ستون اول مشاهده شود و سطر دوم مربوط به سرریزهای کنگره‌ای دو سیکل شکل (۲)، ستون دوم مشاهده شود. اختصاص دارد. نکته حایز اهمیت از مقایسه بین سطرهای شکل (۱۰) مقایسه بین سرریزهای کنگره‌ای با سیکل‌های متفاوت، نمایان‌گر این مطلب است که با افزایش تعداد سیکل‌های سرریزهای کنگره‌ای، سرعت منفی در زیر ارتفاع تاج سرریز به‌صورت محسوسی برای سرریزهای کنگره‌ای کاهش پیدا خواهد. این کاهش سرعت منفی افقی در زیر تاج سرریز، به‌ترتیب برای سرریزکنگره‌ای لبه تیز، بیشترین تأثیر را خواهد داشت، در حالی که افزایش تعداد سیکل بر کاهش سرعت منفی در زیر تاج سرریز برای دیگر مدل‌های تاج سرریز از جمله سرریز سیلندری و سرریز ربع سیلندری به مراتب تأثیر کمتری خواهد داشت. مقایسه بین شکل (۱۰–الف) و (۱۰–ب) برای سرریز کنگره‌ای لبه تیز نشان می‌دهد که سرعت در بالادست سرربز کنگره‌ای لبه‌تیز در بین کنگره‌های سرریز به‌صورت منفی می‌باشد، (برای مثال x=300 mm تا x=0 mm). همچنین نتایج بررسی برآیند سرعت افقی و قائم در این محدوده حاکی از آن است که جهت قالب جریان به جز محدوده‌ی تاج سرریز، مقادیر ناچیزی می‌باشد و یا به عبارت دیگر جهت جریان به سمت بالا نیست. همچنین با تغییر سیکل سرریز، سرعت منفی افقی در دیواره سمت پایین‌دست سرریز کنگره‌ای تغییر وضعیت خواهد داد و از شدت سرعت منفی در بالادست دیواره سرریز (x=0 mm) می‌کاهد. به نظر می‌رسد، این سرعت منفی تشکیل شده در بالادست سرریز کنگره‌ای باعث برگشت جریان می‌گردد و این امر در زمانی که بار رسوبی جریان مقادیر قابل قبول باشد، امکان رسوب‌گذاری در کنگره‌های سرریز کنگره‌ای لبه تیز را افزایش خواهد داد. همچنین، نتایج بررسی برآیند سرعت‌های قائم و افقی نشان می‌دهد که سرعت قائم در بالادست سرریز کنگره‌ای لبه تیز در حالت ساخت تک سیکل و دو سیکل، همواره مقادیری قابل اغماض و نزدیک به صفر می‌باشد و عدم وجود جریان قائم قوی به سمت بالا، می‌تواند احتمال رسوب‌گذاری در این مناطق را افزایش دهد. مقایسه‌ی شکل (۱۰–و) و (۱۰–ه) برای سرریز کنگره‌ای سیلندری، نشان می‌دهد که سرعت افقی منفی بوجود آمده در بالادست سرریز، به مراتب کمتر از مقادیر سرریز لبه تیز می‌باشد که متوسط این کاهش می‌تواند به‌ترتیب به ازای مساحت مناطق طرعت منفی، در مقایسه با سرریز کنگره‌ای لبه تیز به‌ترتیب برای حالت‌های

تک سیکل و دوسیکل ۳۳/۳ و ۵۱/۲ درصد کاهش پیدا کرده است. این امر نشان دهنده‌ی این مطلب می‌باشدکه با تغییر سرریز کنگره‌ای لبه تیز با سرریز ربع سیلندری، احتمال رسوب-گذاری در بالادست سرریز کنگره‌ای می‌تواند به‌صورت محسوسی کاهش پیدا کند. همچنین، نتایج سرعت افقی در لبه تاج سرریز سیلندری (x=0 mm) نشان می‌دهد که در بالادست بدنه بالایی، احتمال رسوب‌گذاری در این محدوده کمتر می‌باشد، چرا که وجود سرعت افقی در بالادست این منطقه عاملی بر رسوب‌شویی می‌گردد. همچنین مقایسه‌ها بین ستون اول (سرریز کنگره‌ای لبه تیز) با ستون آخر (سرریز کنگره‌ای ربع سیلندری) می‌تواند باعث ایجاد سرعت منفی با دامنه بیشتری شود به‌طوری که سرعت منفی افقی به مناطق بالادست سرریز و حتی خارج از کنگره‌ی سرریز (x=-300 mm) نیز کشیده شود. این عامل به تنهایی می‌تواند در زمان وجود بار رسوبی قابل قبول، باعث نهشت رسوبات به خاطر سرعت منفی و برگشت جریان شود. همچنین نتایج مورد مقایسه در شکل‌های (۱۰-و) و (۱۰-ه) نشان می‌دهد، در سرریز کنگره‌ای ربع سیلندری عملا تعداد سیکل بر محدوده سرعت منفی تشکیل شده در بالادست سرریز کنگره‌ی ربع سیلندری به مراتب تأثیر کمتر نسبت به دیگر مدل‌های آزمایشگاهی سرریز کنگره‌ای مورد آزمایش در این پژوهش می‌باشد.

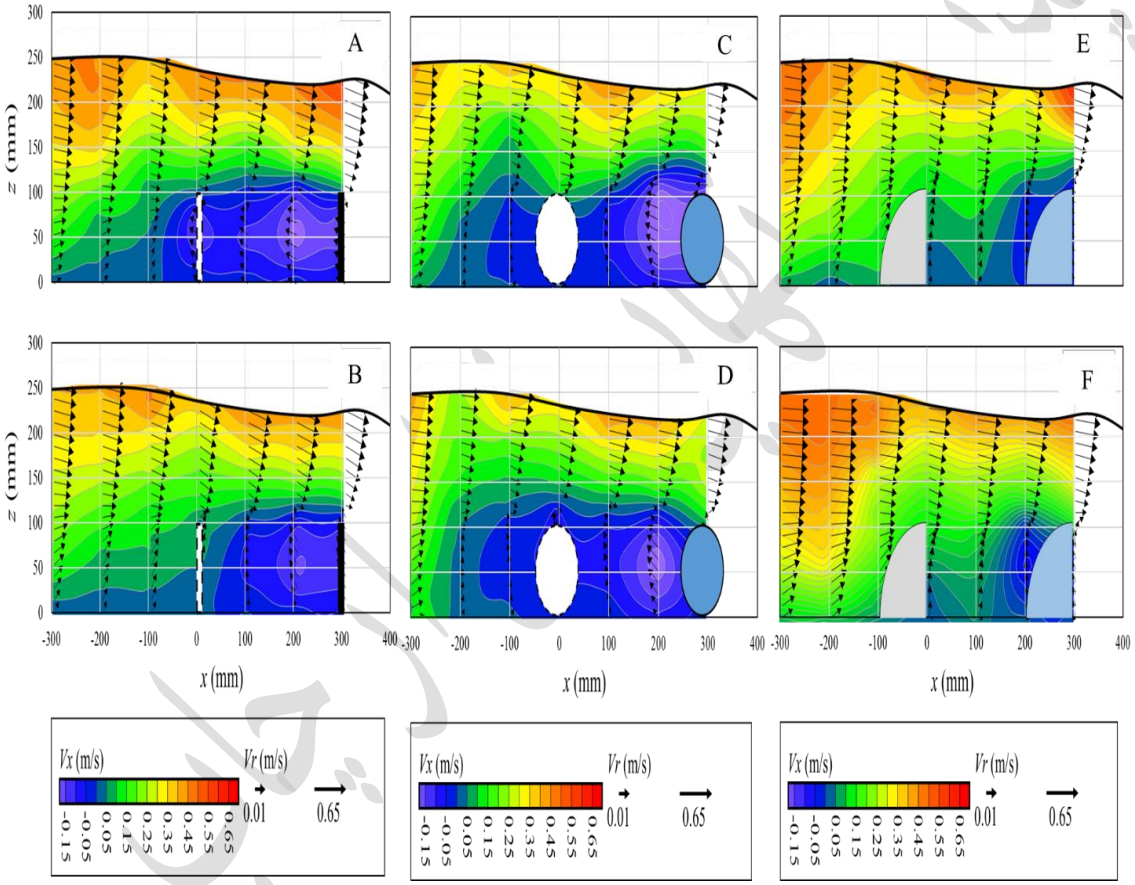


Fig. 10- horizontal and vertical velocity at X-z plate at the upstream of the labyrinth weir: a) one-cycle sharp crested labyrinth weir, b) two-cycle sharp crested labyrinth weir, c) one-cycle cylindrical labyrinth weir, d) two-cycle cylindrical labyrinth weir, e) one-cycle quarter cylindrical labyrinth weir, f) two-cycle quarter cylindrical labyrinth weir

شکل ۱۰- سرعت افقی و قائم در صفحه x-z در بالادست سریزهای کنگره‌ای با سیکل متفاوت، الف) سرریز کنگره‌ای مستطیلی لبه تیز تک سیکل، ب) سرریز کنگره‌ای مستطیلی لبه تیز دو سیکل ج) سرریز کنگره‌ای سیلندری تک سیکل، د) سرریز کنگره-ای سیلندری دو سیکل، و) سرریز کنگره‌ای ربع سیلندری تک سیکل، ه) سرریز کنگره‌ای ربع سیلندری دو سیکل.

شدت آشفتگی

در شکل (۱۱)، مقادیر شدت آشفتگی با استفاده از رابطه (۴) برای شبکه بالادست سرریزهای کنگره‌ای (شکل۴- الف مشاهده شود) برآورد شد. نتایج مطالعه‌ها انتقال رسوب نشان می‌دهد که در مکان‌های از جریان که شدت آشفتگی افزایش پیدا کند، احتمال رسوب‌شویی و عدم انباشت رسوبات بوجود خواهد آمد. از این رو، از خاصیت هیدرولیک بوجود آمده، می‌تواند در جهت بررسی وضعیت رسوب‌گذاری و رسوب‌شویی استفاده کرد. با در نظر گرفتن این مطلب شکل (۱۱) بر اساس عدد ارتفاعی بی‌بعد z/h (z رقوم ارتفاع نسبت به تاج سرریز و h ارتفاع آب از تاج سرریز) ترسیم شد. از این رو، در صورتی که این عدد منفی باشد، نمایان‌گر قرار گرفتن منحنی آشفتگی در زیر تاج سرریز می‌باشد و اگر این مقدار مثبت باشد، این منحنی متعلق به ترازهای بالای تاج سرریز می‌باشد. همچنین، y فاصله عرضی از وسط کانال آزمایشگاهی و b عرض کانال آزمایشگاهی می‌باشد. مقایسه بین مدل‌های آزمایشگاهی سرریز کنگره‌ای تک سیکل نشان می‌دهد که در سرریز کنگره‌ای لبه تیز مستطیلی شکل (۱۱-الف) ماکزیمم مقادیر آشفتگی، مربوط به رقوم ارتفاعی z/h=-0.286 می‌باشد، این امر نشان می‌دهد که در بالادست سرریزهای کنگره‌ای، سرریز لبه تیز مستطیلی به خاطر ساختاری که در لبه‌ی تاج خود دارد و باعث به هم‌ریختگی جریان می‌شود، بیشترین مقدار آشفتگی را در بالادست سرریز کنگره‌ای بوجود می‌آورد. همچنین بررسی میزان آشفتگی بر روی تاج سرریز کنگره‌ای مورد آزمایش، نشان می‌دهد که در روی تاج سرریز (z/h=0.00)، سرریز کنگره‌ای ربع سیلندری شکل (۱۱-ج))کمترین مقدار آشفتگی را بر روی تاج خود دارد. این عامل می‌تواند باعث افزایش ضریب دبی باشد، چرا که کاهش آشفتگی تأثیر مستقیم بر افزایش دبی عبوری جریان از روی سرریز دارد. این امر به خودی خود باعث افزایش ضریب دبی می‌گردد. همچنین بررسی نتایج آشفتگی در بالادست سرریز کنگره‌ای تک سیکل سیلندری نشان می‌دهد که ماکزیمم آشفتگی این سرریز، نسبت به سرریز لبه‌تیز مستطیلی در رقوم ارتفاع بالاتر قرار می‌گیرد، (z/h=-0.143)، شکل (۱۱-ج). شایان ذکر است که به نظر می‌رسد که اثر دیواره باعث افزایش آشفتگی در نزدیکی دیواره‌های می‌گردد و با نزدیک‌شدن به مرکز کانال و یکنواخت‌تر شدن جریان تا حد زیادی باعث کاهش آشفتگی در مناطق مرکزی کانال آزمایشگاهی می‌گردد.

آنالیز کوادرانت

در شکل (۱۲)، با توجه به توضیحات بخش مواد و روش‌ها و در نقطه‌ای در مرکز کانال در بالادست سرریزهای کنگره‌ای تک سیکل در صفحه در نظر گرفته شده در بالادست سرریزهای کنگره‌ای (شکل ۴- الف) در نزدیکی کف کانال، نتایج آنالیز کوادرانت ارایه شده است. به ازای دو دقیقه داده‌برداری و و با در نظر گرفتن هرتز دستگاه که ۲۰۰ هرتز می‌باشد (یا به عبارتی دستگاه ADV در هر ثانیه ۲۰۰ مرتبه، اجزا سرعت را اندازه‌گیری می‌کند)، تعداد تقریبی ۲۴۰۰۰ داده، از آزمایشگاه برای نقطه مورد نظر، برداشت شد. لازم به ذکر است که ایت تعداد داده به‌صورت سری مقدار سرعت در جهت‌های مختلف- زمان بیان می‌گردد. نتیجه این آنالیز نشان می‌دهد (مقایسه مقادیر درصدهای کوادرانت در شکل۱۲) که رخدادهای Sweeps و Ejections برای سرریز کنگره‌ای لبه تیز نسبت به رخدادهای ناحیه اول و سوم بیشتر است و این نشان‌گر این مطلب است که انتقال مومنتوم انرژی در سرریز کنگره‌ای لبه تیز حاصل از آشفتگی در بالادست این سرریز کنگره‌ای لبه تیز می‌باشد، شکل(۱۲-الف)، این مورد نیز تا حدودی برای سرریز سیلندری سیلندری صادق است شکل(۱۲-ب)، اما وضعیت رخدادهای در یالادست سرریز ربع سیلندری به نسبت به سمت رخدادهای Inwared Interactions و Outward Interactions می‌باشد، (شکل۱۲-ج) که بیانگر این مطلب است که انتقال مومنتوم در جریان بالادست سرریز ربع سیلندری بیشتر حاصل از انتقال مومنتوم جریان به خاطر تغییرات سرعت می‌باشد و عوامل آشفتگی در اولویت نمی باشد. شایان ذکر است که در صورتی که در آنالیز کوادرانت، مقادیر کوادرانت‌ها در هر ربع برابر با ۲۵ درصد گردد، بدین معناست که جریان در حالت ایده‌آل میباشند یا به عبارت دیگر اختلال و بهم خوردگی خطوط جریان در حجم مشخصی از سیال رخ نخواهد داد.

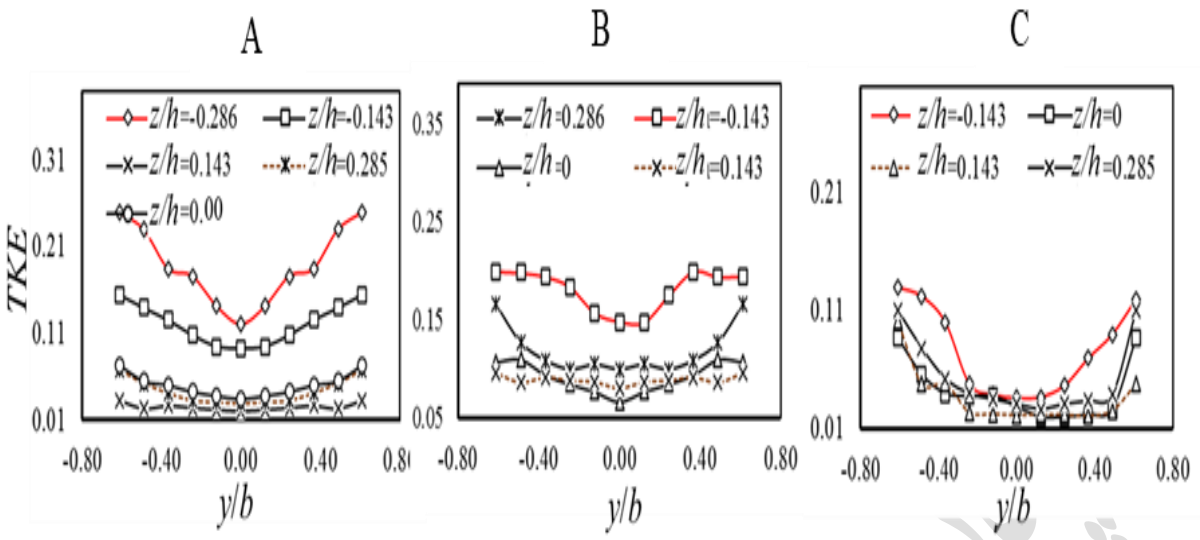


Fig. 11- TKE at the upstream of the labyranith weir with one cycle: a) one-cycle sharp crested labyrinth weir, b) one-cycle cylindrical labyrinth weir, c) one-cycle quarter Cylindrical labyrinth weir

شکل ۱۱- آشفتگی در صفحه بالادست سرریز های کنگره‌ای تک سیکل، الف) سرریز کنگره ای مستطیلی لبه تیز تک سیکل، ب) سرریز کنگره ای سیلندری تک سیکل، ج) سرریز کنگره ای ربع سیلندری تک سیکل

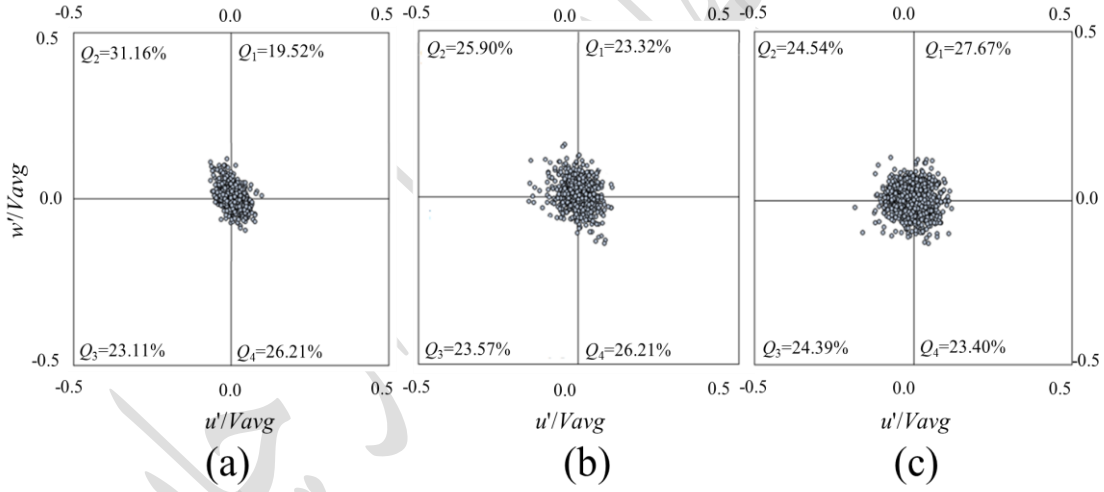


Fig.12- Quadrant analysis at the vicinity of the bed surface at the upstream of the weir: a) one-cycle sharp crested labyrinth weir, b) one-cycle cylindrical labyrinth weir, c) one-cycle quarter cylindrical labyrinth weir

شکل۱۲- آنالیز کوادرانت در نقطه نزدیک به کف کانال در لبه بالادست سرریز تک سیکل، الف) سرریز کنگره‌ای مستطیلی لبه‌تیز تک سیکل، ب) سرریز کنگره‌ای سیلندری تک سیکل، ج) سرریز کنگره‌ای ربع سیلندری تک سیکل

نتیجه‌گیری

در زیر بخشی از نتایج به‌دست آمده از این پژوهش بیان شده است.

– ضریب دبی برای سرریز ربع سیلندری، بیشترین مقادیر را برای ارتفاع آب یکسان بر روی تاج سرریز به‌دست آورده شده است. این امر می‌تواند نشان دهنده‌ی تأثیر بدنه‌ی ربع سیلندری سرریز کنگره‌ای بر افزایش ضریب دبی باشد. برآورد مقادیر ضرایب a و b برای رابطه ارایه شده نشان داد که رابطه ارایه شده تخمین قابل‌قبولی برای ضریب دبی سرریزهای مورد مطالعه را دارد.

– با نزدیک شدن به تاج سرریز پایین‌دستی و ورود به کنگره-های سرریز، مقادیر ضریب انرژی و مومنتوم به‌صورت محسوسی افزایش پیدا خواهند کرد. نتایج این مقایسه‌ها نشان می‌دهد،

بیشترین میزان افزایش این ضرایب متعلق به سرریز کنگره‌ای تک سیکل لبه‌تیز مستطیلی است و حداقل مقادیر این ضرایب به سرریز کنگره‌ای ربع سیلندری دو سیکل اختصاص داده می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد که با وورد به درون کنگره‌ها، می‌توان بیان داشت که مقدار آشفتگی جریان در این مکان به‌صورت محسوسی افزایش پیدا کرده هست. همچنین مقایسه‌ها بین تعداد سیکل‌ها سرریزهای کنگره‌ای با هندسه و شرایط تاج یکسان، حاکی از این مطلب دارد که به ازای افزایش تعداد سیکل برای سرریز کنگره‌ای، میزان آشفتگی سرریز کاهش پیدا خواهد کرد.

– نتایج بررسی مقادیر سرعت منفی در سرریزهای کنگره‌ای نشان می‌دهد که برای سرریز کنگره‌ای ربع سیلندری دو سیکل، سرعت افقی منفی به‌وجود آمده در بالادست سرریز، به مراتب کمتر از مقادیر سرریز لبه تیز می‌باشد که متوسط این کاهش می-تواند به‌ترتیب به ازای مساحت مناطق سرعت منفی، در مقایسه با سرریز کنگره‌ای لبه تیز به‌ترتیب برای حالت‌های تک سیکل و دوسیکل به‌ترتیب ۳۳/۳ و ۵۱/۲ درصد کاهش پیدا کرده است. این امر نشان دهنده‌ی این مطلب می‌باشدکه با تغییر سرریز کنگره‌ای لبه تیز با سرریز ربع سیلندری احتمال رسوب‌گذاری در بالادست سرریز کنگره‌ای می‌تواند به‌صورت محسوسی کاهش پیدا کند.

– نتیجه آنالیز کوادرانت نشان می‌دهد که رخدادهای Sweeps و Ejections برای سرریز کنگره‌ای لبه تیز نسبت به رخدادهای ناحیه اول و سوم بیشتر است و این نشان‌گر این مطلب است که انتقال مومنتوم انرژی در سرریز کنگره‌ای لبه تیز حاصل از آشفتگی در بالادست این سرریز کنگره‌ای لبه تیز می‌باشد، شکل(۱۲–الف)، این مورد نیز تا حدودی برای سرریز کنگره‌ای سیلندری صادق است شکل(۱۲–ب)، اما وضعیت رخدادهای در یالادست سرریز ربع سیلندری به نسبت به سمت رخدادهای Inwared Interactions و Outward Interactions می‌باشد (شکل(۱۲–ج) که بیانگر این مطلب است که انتقال مومنتوم در جریان بالادست سرریز سیلندری بیشتر حاصل از انتقال مومنتوم جریان به خاطر تغییرات سرعت می‌باشد و عوامل آشفتگی در اولویت نمی باشد.

تقدیر و تشکر

بدینوسیله از حمایت گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه صنعتی اصفهان و کلیه عزیزانی که به‌نحوی در انجام این پژوهش همکاری داشته‌اند، تشکر و قدردانی می‌شود.

References

1- Azimi, A.H. and Salehi, S., 2022. Hydraulics of flow over full-cycle cosine and rectangular sharp-crested weirs. *Canadian Journal of Civil Engineering*, *49*(6), pp.954-968.Doi: 10.1139/cjce-2021-0387.

2- Cassidy, J.J., Gardner, C.A. and Peacok, R.T., 1985. Boardman labyrinth crest. ASCE. *J. Hyd. Eng*, *111*(3), pp.247-255.Doi: 10.1061/ (ASCE) 0733-9429(1987)113:6(808.2).

3- Crookston, B.M. and Tullis, B.P., 2012. Arced labyrinth weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, *138*(6), pp.555-562. Doi: 10.1061/ (ASCE) HY.1943-7900.0000555.

4- Hay, N. and Taylor, G., 1970. Performance and design of labyrinth weirs. *Journal of the Hydraulics Division*, *96*(11), pp.2337-2357..Doi: 10.1061/JYCEAJ.0002766

5- Guan, D., Melville, B.W. and Friedrich, H., 2014. Flow patterns and turbulence structures in a scour hole downstream of a submerged weir. *Journal of Hydraulic Engineering*, *140*(1), pp.68-76.Doi: 10.1061/(ASCE) HY.1943-7900.0000803.

6- Guan, D., Melville, B.W. and Friedrich, H., 2015. Live-bed scour at submerged weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, *141*(2), p.04014071.Doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000954.

7- Guan, D., Melville, B. and Friedrich, H., 2016. Local scour at submerged weirs in sand-bed channels. *Journal of Hydraulic Research*, *54*(2), pp.172-184. Doi: 10.1080/00221686.2015.1092945.

8- Khode, B.V., Tembhurkar, A.R., Porey, P.D. and Ingle, R.N., 2012. Experimental studies on flow over labyrinth weir. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, *138*(6), pp.548-552. Doi: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000336.

9- Lux, F., 1985. Design and construction of labyrinth spillways. *15th Commission Internationale des Grands Barrages*, pp.249-274.

10- Mahmudi Moghadam, A., Salehi, S. and Sadeghigar, T., 2022. Turbulence structures and sediment transport of different countermeasure roughness of the squire bridge pier. *Sharif Journal of Civil Engineering*, *38*(2.1), pp.17-26. Doi: 10.24200/j30.2022.57666.2925.

11- Magalhães, A. & Lorena, M. (1989) Hydraulic design of labyrinth weirs. *Report No. 736*. Lisbon, Portugal: National Laboratory of Civil Engineering.

12- Oreizi, Z., Heidarpour, M. and Bagheri, S., 2015. Hydraulic characteristics of flow over sinusoidal sharp-crested weirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, *141*(3), p.06014003..Doi: 10.1061/JYCEAJ.0000828.

13- Ota, K., Sato, T., Arai, R. and Nakagawa, H., 2017. Local scour upstream of a slit weir: Ordinary differential equation–based model under steady and unsteady flow conditions. *Journal of Hydraulic Engineering*, *143*(1), p.04016073.Doi: 10.1061/JHENGC.0000903.

14- Salehi, S. and Azimi, A.H., 2024. Hydraulic characterization of turbulent flow through and over a porous media. *Flow Measurement and Instrumentation*, *96*, p.102533.Doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2024.102533.

15- Salehi, S. and Azimi, A.H., 2022. Effects of spoiler and piggyback on local scour under single and twin submerged pipes. *Ocean Engineering*, *261*, p.112137. Doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.112137.

16- Salehi, S. and Azimi, A.H., 2019. Discharge characteristics of weir-orifice and weir-gate structures. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, *145*(11), p.04019025.Doi: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001421.

17- Salehi, S., Azimi, A. H. & Bonakdari, H. 2021a. Hydraulics of sharp-crested weir culverts with downstream ramps in free-flow, partially, and fully submerged-flow conditions, *Irrigation Science*.*39*.pp. 191-207. Doi: 10.1007/s00271-020-00695-y.

18- Salehi, S., Esmaili, S. A., Sadeghi Namaghi, N. & Esmaili, K. 2022a. Overflow and underflow within the broad-crested gabion weir in free flow with sand bed conditions, *Sharif Journal of Civil Engineering*. *37(4.2).* pp. 3-13. Doi: 10.24200/J30.2021.57425.2907.

19- Salehi, S., Esmaili, K. & Azimi, A. H. 2019. Mean velocity and turbulent characteristics of flow over half-cycle cosine sharp-crested weirs, *Flow Measurement and Instrumentation*.*66*, pp. 99-110. Doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2019.02.002.

20- Salehi, S., Moghadam, A. M. & Esmaili, K. 2022b. Flow regimes of submerged rectangular sharp-crested weirs in sand bed channel, *Sādhanā*. *48(1).* p. 6. Doi: 10.1007/s12046-022-02053-4.

21- Salehi, S., Moghadam, A. M. & Soori, S. 2023. Effect of the pipe bend of the morning glory spillway on the cavitation number, *Flow Measurement and Instrumentation*. *92*. p. 102375. Doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2023.102375.

22- Salehi, S., Mostaani, A. & Azimi, A. H. 2021b. Experimental and numerical investigations of flow over and under weir-culverts with a downstream ramp, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. *147(7).* p. 04021029. Doi: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001576.

23- Tacail, F. G., Evans, B., & Babb, A. 1990. Case study of a labyrinth weir spillway. *Canadian Journal of Civil Engineering*. *17*(1).pp.1-7. Doi:١٠,١١٣٩/l٠٠١-٩٠.

24- Taylor, G. 1968. *The performance of labyrinth weirs*. Doctoral dissertation, University of Nottingham.

25- Tullis, J. P., Amanian, N. & Waldron, D. 1995a. Design of labyrinth spillways, *Journal of Hydraulic Engineering.121(3).*pp.247-255.Doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:3(247).

26- Tullis, J. P., Amanian, N., & Waldron, D. 1995b. Design of labyrinth spillways. *Journal of Hydraulic Engineering.121 (3).*pp.247-255.Doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:3(247).

27- Waldron, D. R. 1994. *Design of labyrinth weirs*. Utah State University.

28- Wilcox, D. C. 1988. Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models, *AIAA Journal.26 (11),* pp. 1299-1310. Doi: 10.2514/3.10041.

29- Salehi, S., Esmaili, K., & Azimi, A. H. 2018. New sharp-crest weir with purpose of increasing flow rate accurate and decreasing sediment in irrigation channels. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, *12*(5). pp.1016-1028. (In Persian).

30- Javaheri A., and Kabiri Samani A. 2011. Presentation of Formula for Discharge Coefficient of Crinkle Weirs by Using Experimental Data. *10th Iranian Hydraulic Conference*. (In Persian).

پذیرش نهایی قبل از چاپ

Experimental Investigation of the Effect of the Geometric Parameters of Labyrinth Weirs on the Hydraulic and Hydrodynamic Characteristics of Flow

S. Samiee[1], A.H. Haghiabi[2*], M. Heidarpour[3] and B. Shahinejad[4]

1- PhD Student of Hydraulic Structures, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khoramabad, Iran.
2- Corresponding Author, Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khoramabad, Iran (haghiabi.a@lu.ac.ir).*
3- Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
4- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khoramabad, Iran.

Keywords: Labyrinth weirs, Discharge coefficient, Flow reduction factor, Submergence, Turbulence, Quadrant analysis.

Introduction

This study investigates the hydraulic characteristics of three geometric models of labyrinth weirs—sharp-crested, quarter-cylindrical, and cylindrical. Additionally, to assess the impact of labyrinth weir geometry on hydraulic and hydrodynamic properties, experiments were conducted using two cycles of labyrinth weir models. An Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) was employed to measure velocity components in various coordinate directions (Wilcox et al., 1988), and turbulence levels were calculated upstream of the labyrinth weirs across different models.

Materials and Methods

A tailgate at the end of the experimental flume was adjusted to evaluate the performance of these weirs under various submergence ratios downstream. Five flow rates (6.5, 11.2, 16.6, 19.9, and 24.2 liters per second) were used in the hydraulic experiments. Submergence downstream of the weirs was tested at ten different vertical levels, and the discharge coefficient was estimated for each submergence rate (Salehi et al., 2018, 2019, 2022b). The weirs had different lengths in the single-cycle construction (1200 millimeters) and the two-cycle construction (2000 millimeters). The discharge coefficient values under free-flow conditions were measured based on the weir equation (Oreizi et al., 2015; Salehi et al., 2021a), and curve-fitting methods were applied to present predictive equations. By adjusting the tailgate, the downstream water level was raised to evaluate discharge reduction and the coefficient *a* across different weir geometries.
Using the ADV, horizontal and vertical velocities in the x-z plane upstream of the weirs were measured, and contour graphs of velocity components were created for peak discharge conditions. Variations in velocity components were assessed under differing hydraulic conditions upstream and downstream. Additionally, turbulent kinetic energy (TKE) variations upstream of the weirs were analyzed using Wilcox's equation (Wilcox, 1988) at maximum flow rates in free-flow conditions. Quadrant analysis was conducted near the channel bed upstream of the weirs to determine the dominant hydrodynamic quadrant affecting flow.

Results

Hydraulic parameters—including discharge coefficient, discharge reduction coefficient related to weir submergence, energy and momentum coefficients, horizontal and vertical velocities, turbulence intensity, and quadrant coefficients—were evaluated for different models. Graphical analyses under varying hydraulic conditions were discussed to assess the performance of weirs with distinct geometries.

Conclusion

Our findings indicate that the quarter-cylindrical labyrinth weir achieved the highest discharge coefficient for a given water depth over the weir crest, highlighting the geometry's effectiveness in enhancing discharge. The coefficients *a* and *b* provided an accurate estimation for the discharge coefficient of the studied weirs. Results also show that the energy and momentum coefficients significantly increase as flow approaches the downstream crest and enters the labyrinth weirs. Comparing labyrinth weirs of similar geometry and crest conditions, it was found that turbulence decreased with the addition of a second cycle. Specifically, in the quarter-cylindrical labyrinth weir, negative horizontal velocity upstream of the crest was reduced by an average of 33.3% in single cycles and 51.2% in double cycles compared to the sharp-crested labyrinth weir, suggesting reduced sediment deposition. Quadrant analysis revealed that sweep and ejection events were more frequent in the sharp-crested labyrinth weir, indicating higher turbulence-induced momentum transfer. In contrast, the quarter-cylindrical labyrinth weir showed a greater tendency toward inward and outward interactions, implying that momentum transfer in the upstream flow was mainly driven by velocity changes, with turbulence playing a lesser role.

Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge the support of the Water Science and Engineering Department at Isfahan University of Technology and extend their thanks to all contributors to this research.

References

1- Oreizi, Z., Heidarpour, M. and Bagheri, S., 2015. Hydraulic characteristics of flow over sinusoidal sharp-crested weirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, *141*(3), p.06014003..Doi: 10.1061/JYCEAJ.0000828.

2- Salehi, S., Esmaili, K. & Azimi, A. H. 2019. Mean velocity and turbulent characteristics of flow over half-cycle cosine sharp-crested weirs, *Flow Measurement and Instrumentation.66*, pp. 99-110. Doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2019.02.002.

3- Salehi, S., Esmaili, S. A., Sadeghi Namaghi, N. & Esmaili, K. 2021a. Overflow and underflow within the broad-crested gabion weir in free flow with sand bed conditions, *Sharif Journal of Civil Engineering*. *37(4.2).* pp. 3-13. Doi: 10.24200/J30.2021.57425.2907.

4- Salehi, S., Moghadam, A. M. & Esmaili, K. 2022b. Flow regimes of submerged rectangular sharp-crested weirs in sand bed channel, *Sādhanā. 48(1).* p. 6. Doi: 10.1007/s12046-022-02053-4.

5- Wilcox, D. C. 1988. Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models, *AIAA Journal.26 (11)*, pp. 1299-1310. Doi: 10.2514/3.10041.

6- Salehi, S., Esmaili, K., & Azimi, A. H. 2018. New sharp-crest weir with purpose of increasing flow rate accurate and decreasing sediment in irrigation channels. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, *12*(5). pp.1016-1028. (In Persian).