

مقاله پژوهشی

شبیه‌سازی عددی جریان بر سرریزهای کنگره‌ای مثلثی و قوسی

محمد نظری شریفی^۱ و جواد مظفری^{۲*}

چکیده

سرریزهای کنگره‌ای طول مؤثر بیشتری نسبت به سرریزهای خطی دارند و می‌توانند دبی بیشتری را در مقایسه با سرریزهای خطی از خود عبور دهند. در این پژوهش به بررسی عددی و مقایسه راندمان سرریزهای کنگره‌ای مثلثی و قوسی با استفاده از نرم‌افزار Flow3D و مدل $k-\epsilon$ پرداخته شد. برای انجام این کار سرریزهای کنگره‌ای مثلثی و قوسی با نسبت بزرگ‌نمایی ۲، ۳ و ۴ شبیه‌سازی شد. بررسی‌ها نشان داد که با افزایش نسبت هد آب (H_T/P) و نسبت بزرگ‌نمایی (L/W)، تداخل تیغه‌های ریزشی و استغراق موضعی افزایش یافته و سبب کاهش ضریب دبی می‌شود؛ به‌طوری‌که به‌ترتیب در سرریز کنگره‌ای مثلثی و قوسی، با افزایش نسبت هد آب از ۰/۱ به ۱ حداکثر تا ۳۸ درصد و ۳۹ درصد و با افزایش نسبت بزرگ‌نمایی از ۲ به ۴ حداکثر تا ۲۹ درصد و ۳۷ درصد کاهش ضریب دبی به‌وجود می‌آید. از طرفی سرریزهای کنگره‌ای قوسی در نسبت بزرگ‌نمایی ثابت، ضریب دبی کمتری تا حداکثر ۱۴ درصد نسبت به سرریز کنگره‌ای مثلثی دارند. دلیل این مسئله زاویه کمتر سرریز کنگره‌ای قوسی با جدار کانال نسبت به سرریز کنگره‌ای مثلثی است که سبب برخورد تیغه‌های ریزشی به جدار کانال و همچنین ایجاد استغراق موضعی بیشتر در سرریز قوسی می‌شود. همچنین زاویه برخورد جت‌های جریان در رأس سرریز قوسی بیشتر از سرریز مثلثی است که سبب آشفتگی بیشتر جریان و کاهش ضریب دبی خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: ضریب دبی، سرریز کنگره‌ای مثلثی، سرریز کنگره‌ای قوسی، نرم‌افزار Flow3D.

ارجاع: نظری شریفی م و مظفری ج. ۱۴۰۳. شبیه‌سازی عددی جریان بر سرریزهای کنگره‌ای مثلثی و قوسی. ۵۲: ۱۱۱-۱۰۳. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2024.14648.2579>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه اراک.

۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه اراک دانشیار پژوهشکده آب، دانشگاه اراک.

* نویسنده مسئول: j-mozafari@araku.ac.ir

مقدمه

استفاده از سرریزهای کنگره‌ای در شرایطی که محل احداث سرریز با محدودیت در عرض و سطح آب در بالادست مواجه باشد، به‌عنوان یک راه‌حل مؤثر و اقتصادی مطرح می‌شود. محققان زیادی در زمینه سرریز کنگره‌ای کار کرده‌اند (تالیس و همکاران، ۱۹۹۵؛ نوری و عارف، ۲۰۱۷؛ سئو و همکاران، ۲۰۱۶ و ضمیری و همکاران، ۲۰۱۷). اما با توجه به پارامترهای متعدد مؤثر، نیاز به تحقیقات بیشتری است. با توجه به محدودیت‌های مدل فیزیکی استفاده از شبیه‌سازی کمک شایانی به حل مسائل مربوط به سرریزهای کنگره‌ای خواهد کرد. در پژوهشی پارامترهای جریان سرریز کنگره‌ای مثلثی با مدل عددی Flow3D توسط اژدري مقدم و همکاران (۲۰۱۱) محاسبه شد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که مدل عددی به‌خوبی رفتار هیدرولیکی سرریز کنگره‌ای مثلثی را شبیه‌سازی می‌کند. کولی‌زاده و همکاران (۲۰۱۶) در پژوهشی با استفاده از مدل عددی Flow3D تغییرات ضریب دبی سرریز کنگره‌ای قوسی با شکل تاج نیم‌دایره، ربع‌دایره، لبه‌تیز و صاف را شبیه‌سازی کردند و نشان دادند که استغراق موضعی یکی از عوامل نامطلوب بر عملکرد سرریز است. سئو و همکاران (۲۰۱۶) در مطالعه اثر شکل سرریز بر دبی جریان عبوری روی سرریز کنگره‌ای گزارش کردند که دبی عبوری از سرریز کنگره‌ای ۷۱ درصد بیشتر از سرریز اوجی خطی است. میرزایی و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهشی ضریب دبی سرریز کنگره‌ای دوزنقه با تغییر زاویه در امتداد جریان را با استفاده از مدل Flow3D بررسی و نشان دادند که افزایش زاویه سرریز، سبب افزایش ضریب دبی جریان می‌شود. در بررسی اثر سرریز پلکانی تجمعی و مسطح بر اتلاف انرژی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی توسط صالح و همکاران (۲۰۲۲) مشخص شد نتایج داده‌های مدل تجربی برای عمق جریان آب با نتایج آزمایشگاهی دقیقاً مطابقت دارد. نصیری و عمارلو (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای به شبیه‌سازی عددی سرریز لبه‌پهن با نرم‌افزار Flow3D و مقایسه نتایج آن با مدل آزمایشگاهی پرداختند. نتایج تحقیق نشان دهنده همبستگی مطلوب بین داده‌های آزمایشگاهی و عددی بود. در پژوهشی اتلاف انرژی جریان در سرریزهای کنگره‌ای توسط حق‌آبی و همکاران (۲۰۲۲) بررسی شد. نتایج نشان داد که انرژی جریان می‌تواند تا ۸۵ درصد

به‌وسیله سرریزهای کنگره‌ای کاهش یابد. آفریدگان و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهشی به بررسی سرریزهای نیمه‌استوانه‌ای اصلاح‌شده با استفاده از شبیه‌سازی پرداختند و نشان دادند که مدل استاندارد k-ε عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد. در مطالعات پیشین سرریزهای کنگره‌ای مثلثی و قوسی به‌صورت مجزا مورد بررسی قرار گرفته‌اند؛ بنابراین اطلاعات کاملی از مقایسه آن‌ها در شرایط جریان یکسان وجود ندارد؛ از همین‌رو در این پژوهش به بررسی سرریزهای کنگره‌ای قوسی و مثلثی و مقایسه آن‌ها به‌وسیله نرم‌افزار Flow3D پرداخته خواهد شد.

مواد و روش‌ها

آنالیز ابعادی

معادله (۱) پارامترهای مؤثر بر جریان عبوری از سرریز کنگره‌ای را نشان می‌دهد:

$$F(P, L, W, t, \theta, H, v, g, \sigma, \mu, \rho) = 0 \quad (1)$$

که در این معادله P ارتفاع سرریز، L طول تاج، W عرض کانال، t ضخامت سرریز، θ زاویه رأس، H ارتفاع آب روی سرریز، v سرعت، g شتاب ثقل، σ کشش سطحی، μ لزجت و ρ جرم مخصوص است. با انجام آنالیز ابعادی معادله زیر به‌دست می‌آید:

$$F\left(\frac{H}{P}, \frac{H}{L}, \frac{H}{W}, \frac{H}{t}, Fr, We, Re, \theta\right) = 0 \quad (2)$$

از معادله بالا می‌توان اثر لزجت در رفتار سیال را در زمانی که جریان روی سرریز ورقه‌ای نباشد حذف کرد که باعث می‌شود عدد بی‌بعد رینولدز از معادله فوق حذف شود. اگر مقدار محدودیت حداقل ارتفاع آب روی سرریز (۳ سانتی‌متر) رعایت شود، تأثیر کشش سطحی حذف شده و باعث می‌شود عدد بی‌بعد وبر نیز از فرمول بالا حذف شود؛ بنابراین، معادله (۲) را می‌توان به‌صورت معادله (۳) نوشت:

$$f\left(\frac{H}{P}, \frac{H}{L}, \frac{H}{W}, \frac{H}{t}, Fr, \theta\right) = 0 \quad (3)$$

با توجه به پارامترهای مؤثر معادله (۴) برای سرریز کنگره‌ای ارائه شده است (تالیس و همکاران، ۱۹۹۵):

$$Q = \frac{2}{3} C_d L \sqrt{2gH_T^3} \quad (4)$$

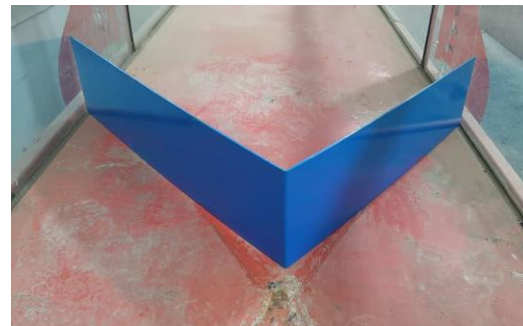
که در این معادله Q دبی عبوری از سرریز کنگره‌ای (m^3/s)، C_d ضریب دبی سرریز کنگره‌ای، L طول مؤثر سرریز کنگره‌ای (m)، H_T هد کل آب روی سرریز (m) و g شتاب ثقل (m/s^2) هستند.

کانال آزمایشگاهی

آزمایش‌های مدل هیدرولیکی مربوط به این تحقیق در آزمایشگاه تحقیقاتی هیدرولیک گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه اراک انجام شد که نمایی از آن در شکل ۱ نشان داده شده است. در این تحقیق مدل هیدرولیکی مورد نظر در داخل یک فلوم شیشه‌ای به طول ۱۰ متر و ارتفاع ۸۰ سانتی‌متر و عرض ۸۰ سانتی‌متر مورد آزمایش قرار گرفت. این فلوم دارای پمپ با حداکثر دبی ۹۰ لیتر در ثانیه است. دبی با استفاده از دبی‌سنج اولتراسونیک اندازه‌گیری می‌شود. برای اندازه‌گیری تراز سطح آب نیز از چند پوینت گیج ریلی که قابلیت حرکت در امتداد فلوم را دارد، استفاده می‌شود. شکل ۲ نمایی از سرریز آزمایشگاهی استفاده‌شده را نشان می‌دهد. این سرریز به‌صورت مثلی بوده و جنس آن آهن به ضخامت ۴ میلی‌متر و دارای ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر است. طول تاج مدل ۱۲۶ سانتی‌متر و نسبت L/W برابر با ۱/۵۸ است.



شکل ۱- نمایی از فلوم آزمایشگاهی دانشگاه اراک



شکل ۲- نمایی از سرریز کنگره‌ای مثلی استفاده‌شده در آزمایشگاه

در ابتدا مدل آزمایشگاهی سرریز کنگره‌ای مثلی با نسبت بزرگ‌نمایی ۱/۵۸ با مدل شبیه‌سازی‌شده با همین نسبت بزرگ‌نمایی، مقایسه شد. برای این کار ۹ دبی با نسبت هد ۰/۲ تا ۰/۷ در آزمایشگاه بررسی شد. هدف از این کار بررسی میزان دقت مدل مورد استفاده در شبیه‌سازی نسبت به مدل آزمایشگاهی بود. سپس سه مدل سرریز کنگره‌ای مثلی و سه مدل سرریز کنگره‌ای قوسی با بزرگ‌نمایی‌های ۲، ۳ و ۴ شبیه‌سازی شدند.

معادلات حاکم و شرایط مرزی

در این تحقیق برای شبیه‌سازی میدان جریان از نرم‌افزار Flow3D استفاده شد. این نرم‌افزار برای تحلیل سه‌بعدی جریان در حالت تراکم‌ناپذیر معادلات ناویراستوکس رینولدزی را با استفاده از روش حجم محدود روی یک میدان شبکه‌بندی‌شده حل خواهد کرد به‌طوری‌که:

$$V_f \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(pvA_x)}{\partial x} + \frac{\partial(pvA_y)}{\partial x} + \frac{\partial(pvA_z)}{\partial x} = R_{SOR} \quad (5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left(uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \quad (6)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left(uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \quad (7)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left(uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \quad (8)$$

که در آن (u, v, w) مؤلفه‌های سرعت، (A_x, A_y, A_z) کسری از مساحت مرتبط با جریان، (G_x, G_y, G_z) شتاب جرمی و (f_x, f_y, f_z) شتاب لزجت در جهت‌های (x, y, z) ، ρ چگالی سیال، R_{SOR} ترم چشمه، V_f کسری از حجم مرتبط با جریان و P فشار هستند (Ghasemzadeh, 2014). در نرم‌افزار Flow-3d برای شبیه‌سازی سطح آزاد از روش VOF استفاده می‌شود که در این روش با حل معادله (۹)، به‌عنوان جزء حجم سیال در یک سلول سطوح آزاد محاسبه می‌شود.

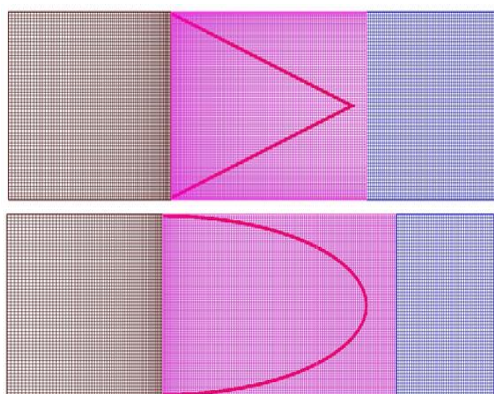
$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left(\frac{\partial}{\partial x} (FuA_x) + \frac{\partial}{\partial y} (FvA_y) + \frac{\partial}{\partial z} (FwA_z) \right) = 0 \quad (9)$$

در صورتی که $F=0$ باشد، سلول پر از هوا و اگر $F=1$ باشد، سلول پر از آب خواهد بود. سطح آزاد جایی مشخص

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - t_i)^2}{N}} \quad (10)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - t_i)^2 \quad (11)$$

که در آن O_i و t_i به ترتیب مقادیر مشاهداتی و خروجی مدل‌ها و p_i میانگین مقادیر مشاهداتی است. همچنین N تعداد کل رویدادهای لحاظ شده است.

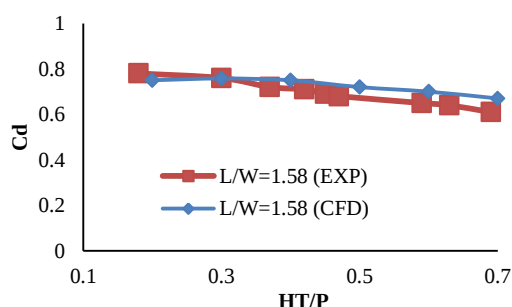


شکل ۳- نمونه مش‌بندی استفاده‌شده برای بزرگ‌نمایی

نتایج و بحث

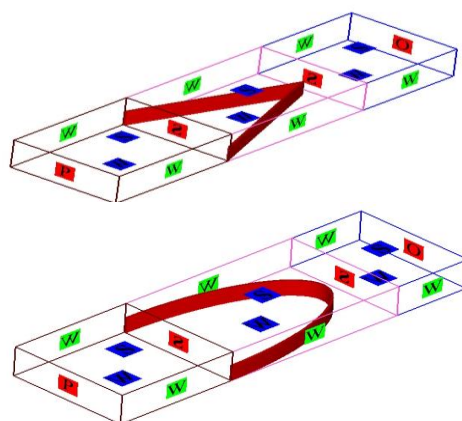
صحت‌سنجی مدل عددی سرریز مثلثی

به منظور صحت‌سنجی مدل از مقایسه داده‌های عددی و آزمایشگاهی ضریب دبی (C_d) استفاده شد که نتایج حاصل در شکل ۵ ارائه شده است. در این شکل H_T هد کل آب روی سرریز است که از مجموع هد آب و ارتفاع سرعتی به دست می‌آید. مطابق با شکل ۵، $RMSE$ برابر با $0.3/9\%$ و MSE برابر با 0.016% است؛ بنابراین خطا قابل قبول بوده و از مدل در شبیه‌سازی سرریزهای کنگره‌ای مثلثی و قوسی استفاده خواهد شد. باید توجه داشت که این میزان خطا برای مش نهایی مورد استفاده بوده و برای مش‌های بزرگ‌تر خطای شبیه‌سازی بیشتر از این مقدار شده است.



شکل ۵- مقایسه داده‌های عددی و آزمایشگاهی سرریز کنگره‌ای مثلثی با $L/W=1.58$

خواهد شد که در آن $F=0.5$ باشد. برای حل آشفتگی میدان جریان نیز از مدل آشفتگی K- ϵ از نوع RNG استفاده شد. این مدل یک ترم اضافی نسبت به سایر معادلات آشفتگی دارد که برای حل و گسسته‌سازی معادلات مربوط به آشفتگی جواب دقیق‌تری را به ما خواهد داد (کاهه و همکاران، ۱۳۹۴). در تحقیق حاضر در ورودی جریان از شرایط مرزی عمق جریان^۱، در مقاطع خروجی از شرایط مرزی جریان خروجی^۲، در دیواره‌ها و کف از شرایط مرزی دیواره^۳ و در سطح آب از شرایط مرزی تقارن^۴ استفاده شد (شکل ۳).



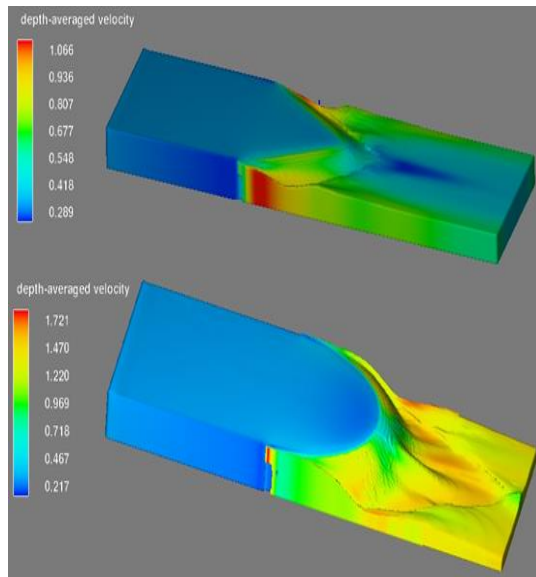
شکل ۳- شرایط مرزی سرریزهای کنگره‌ای شبیه‌سازی‌شده

بیشترین مش (تعداد سلول) مربوط به سرریز کنگره‌ای قوسی با بزرگ‌نمایی^۴ و هد ۱۵ سانتی‌متر به تعداد کل ۹۵۸۷۴۶ سلول و کمترین مش مربوط به سرریز کنگره‌ای مثلثی با بزرگ‌نمایی^۲ و هد ۱/۵ سانتی‌متر به تعداد کل ۳۰۱۴۲۴ سلول است (شکل ۴). این مش‌ها براساس کاهش میزان خطای شبیه‌سازی انتخاب شده‌اند. بدین ترتیب که آنقدر مش در سرریز کنگره‌ای مثلثی با بزرگ‌نمایی^{۱/۵۸}، کاهش پیدا کرد که به کمترین میزان خطا رسید. سپس با توجه به اندازه و تعداد سلول‌ها، تعداد سلول‌های مورد نظر در هر شبیه‌سازی انتخاب شد.

معیار ارزیابی مدل

عملکرد مدل‌های مورد استفاده در این تحقیق بر پایه محاسبه جذر میانگین مربعات خطا ($RMSE$) و میانگین مربعات خطا (MSE) ارزیابی شد:

- 1- Specified pressure
- 2- Out Flow
- 3- Wall
- 4- Symmetry



شکل ۷- سرعت برای سرریز کنگره‌ای مثلثی و قوسی با
بزرگ‌نمایی ۲ برای $H_T/P=0.6$

کروکستون و تالیس (۲۰۱۲) در پژوهش‌های خود نتیجه گرفتند که کاهش زاویه با جداره‌ها سبب افزایش تداخل تیغه‌های ریزشی و استغراق موضعی می‌شود و کاهش ضریب دبی را به دنبال خواهد داشت. این نتیجه‌گیری با کاهش راندمان سرریز قوسی نسبت به مثلثی همخوانی دارد؛ البته با افزایش هد آب، تیغه‌های ریزشی روی سرریز مثلثی نیز افزایش داشته و سبب کاهش راندمان بیشتری در آن می‌شود و نهایتاً سرریز مثلثی و قوسی راندمان مشابهی را پیدا خواهند کرد.

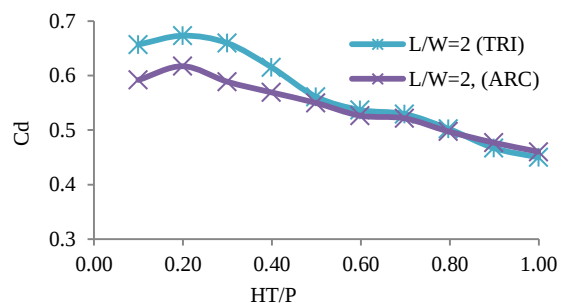
بررسی شبیه‌سازی جریان در سرریز کنگره‌ای مثلثی و قوسی در $L/W=3$

شکل ۸ مقادیر ضریب دبی را برای سرریز کنگره‌ای مثلثی و قوسی در نسبت بزرگ‌نمایی ۳ نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش نسبت H_T/P ، روند کاهشی ضریب دبی کاهش یافته است. با توجه به شکل ۸ مشاهده می‌شود که در سرریز کنگره‌ای قوسی مانند سرریز کنگره‌ای مثلثی با افزایش دبی میزان ضریب دبی کاهش یافته است. از H_T/P برابر با ۰/۲ تا ۱، برای سرریز مثلثی و قوسی به ترتیب ۳۸ درصد و ۳۹ درصد ضریب دبی کاهش یافته است؛ بنابراین میزان کاهش ضریب دبی برای دو نوع سرریز، یکسان است. مطابق با شکل ۸ برای سرریز کنگره‌ای با بزرگ‌نمایی ۳، ضریب دبی سرریز مثلثی نسبت به سرریز قوسی بیشتر است که در شکل ۶

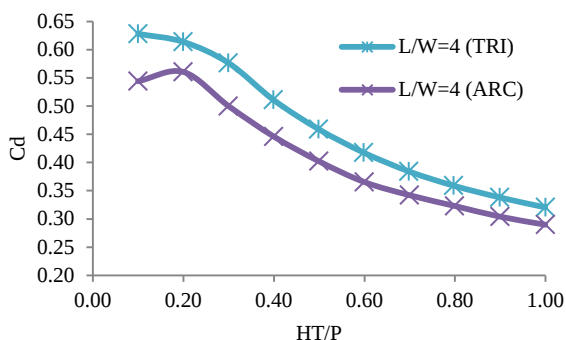
بررسی شبیه‌سازی جریان در سرریز کنگره‌ای

مثلثی و قوسی در $L/W=2$

شکل ۶ مقادیر ضریب دبی و شکل ۷ سرعت جریان را برای سرریز کنگره‌ای مثلثی و قوسی در نسبت بزرگ‌نمایی ۲ نشان می‌دهد. ضریب دبی برای سرریز کنگره‌ای مثلثی در نسبت H_T/P ۰/۱ تا ۰/۲ افزایش ۱/۵ درصد داشته و پس از آن از نسبت H_T/P برابر با ۰/۲ تا ۱، ۳۲ درصد کاهش داشته است. برای سرریز کنگره‌ای قوسی نیز، ضریب دبی در ابتدا در حدود ۳ درصد افزایش و پس از آن ۲۵ درصد کاهش می‌یابد. در ابتدا به تدریج با افزایش جریان عبوری از روی سرریزها از مقدار هوای محبوس در زیر تیغه‌های ریزشی کاسته می‌شود. این موضوع سبب کاهش مقدار مومنوم وارده توسط هوای چرخشی در زیر تیغه و نیز کاهش فشار منفی موجود در آن ناحیه شده و در نتیجه افزایش ضریب دبی جریان را در پی داشته است (اسمعیلی ورکی و صفررضوی‌زاده، ۲۰۱۳). با افزایش دبی عبوری، به تدریج مقدار تداخل تیغه‌های ریزشی افزایش یافته و ضریب دبی کاهش پیدا می‌کند. مطابق با شکل ۶، کارایی سرریز مثلثی نسبت به قوسی بهتر است؛ به طوری که ضریب دبی سرریز قوسی در H_T/P برابر با ۰/۳، در حدود ۱۲ درصد کمتر از سرریز کنگره‌ای مثلثی است. این روند به صورت کاملاً یکنواخت دیده نمی‌شود و دارای کمی نوسان است. سرریز کنگره‌ای قوسی زاویه کمتری با جداره پایین دست کانال نسبت به سرریز مثلثی دارد (شکل ۷). این مسئله سبب برخورد بیشتر تیغه‌های ریزشی با جدار کانال و ایجاد استغراق موضعی بیشتر در سرریز قوسی می‌شود و راندمان آن را کاهش می‌دهد.



شکل ۶- تغییرات ضریب دبی سرریز کنگره‌ای مثلثی و قوسی
برای بزرگ‌نمایی ۲



شکل ۹- تغییرات ضریب دبی سرریز کنگره‌ای مثلثی و قوسی برای بزرگ‌نمایی ۴

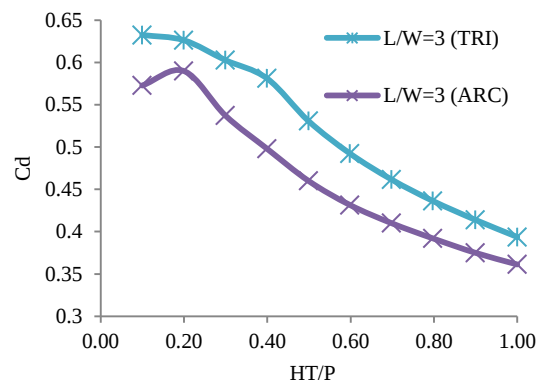
مقایسه ضریب آبگذری سرریز کنگره‌ای مثلثی و قوسی در نسبت‌های طولی مختلف

شکل ۱۰ تغییرات ضریب دبی C_d در مقابل نسبت هد آب H_T/P در سرریز کنگره‌ای مثلثی و در نسبت‌های بزرگ‌نمایی مختلف نشان می‌دهد. مطابق با شکل، L/W برابر با ۲، بیشترین راندمان را دارد و با افزایش L/W مقدار ضریب دبی کاهش یافته است. در H_T/P برابر با ۰/۳، ضریب دبی سرریز کنگره‌ای مثلثی در نسبت‌های بزرگ‌نمایی ۲، ۳ و ۴ به ترتیب برابر با ۰/۶۰، ۰/۶۶ و ۰/۵۸ است؛ بنابراین ضریب دبی از نسبت بزرگ‌نمایی ۲ تا ۴، ۱۲ درصد کاهش داشته است. همچنین در ۱ $H_T/P =$ ضریب دبی سرریز کنگره‌ای در نسبت‌های بزرگ‌نمایی ۲، ۳ و ۴ به ترتیب ۰/۴۵، ۰/۳۹ و ۰/۳۲ است و از نسبت بزرگ‌نمایی ۲ تا ۴، ۲۹ درصد کاهش یافته است؛ بنابراین در هد آب بیشتر، افزایش نسبت بزرگ‌نمایی سبب کاهش بیشتری در ضریب دبی نسبت به هد آب کم خواهد شد. کاهش ضریب دبی در نسبت‌های بزرگ‌نمایی بالاتر نشان‌دهنده کاهش میزان دبی عبوری نیست، بلکه نشان می‌دهد با افزایش طول سرریز میزان دبی عبوری به همان اندازه افزایش نخواهد یافت (شکل ۱۱).

شکل ۱۱ که نمودار افقی آن H_T/P و نمودار عمود آن دبی (Q) است، نشان می‌دهد که در H_T/P ثابت، افزایش بزرگ‌نمایی سرریز با افزایش دبی عبوری از سرریز همراه بوده است.

با توجه به شکل در H_T/P برابر ۰/۳ دبی از نسبت بزرگ‌نمایی ۲ تا ۳ و از نسبت بزرگ‌نمایی ۳ تا ۴، به ترتیب ۳۳/۳ درصد و ۲۵ درصد افزایش یافته است؛ علاوه بر این در H_T/P برابر با ۰/۶، دبی از نسبت

نیز برای سرریز کنگره‌ای با بزرگ‌نمایی ۲ این مسئله صادق بود. میزان کاهش ضریب دبی در سرریز قوسی برای H_T/P برابر با ۰/۴، ۱۴ درصد و برای H_T/P برابر با ۱، برابر با ۷ درصد است؛ بنابراین ضریب دبی هر دو سرریز مثلثی و قوسی با بزرگ‌نمایی ۳، همانند بزرگ‌نمایی ۲ و با افزایش نسبت هد آب، به یکدیگر نزدیک‌تر می‌شوند.

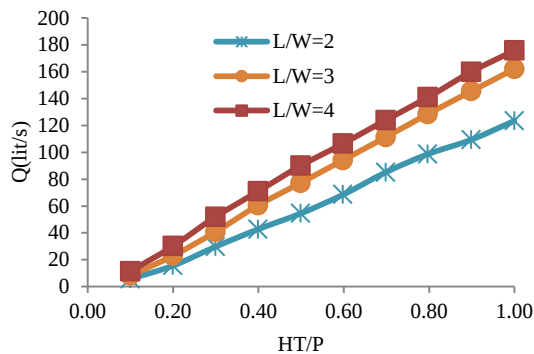


شکل ۸- تغییرات ضریب دبی سرریز کنگره‌ای مثلثی و قوسی برای بزرگ‌نمایی ۳

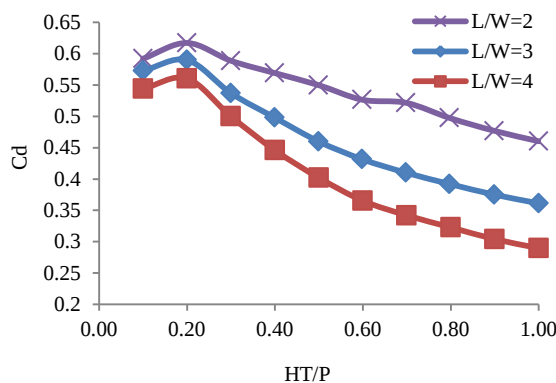
بررسی شبیه‌سازی جریان در سرریز کنگره‌ای

مثلثی و قوسی در $L/W = 4$

شکل ۹ مقادیر ضریب دبی را برای سرریز کنگره‌ای مثلثی و قوسی در نسبت بزرگ‌نمایی ۴ نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۹ مشاهده می‌شود که ضریب دبی سرریز کنگره‌ای قوسی مانند سرریز کنگره‌ای مثلثی با افزایش دبی کاهش یافته است. همچنین شکل نشان می‌دهد، مدل قوسی دارای ضریب آبگذری پایین‌تری نسبت به مدل مثلثی است؛ به طوری که در H_T/P برابر با ۰/۴، ۱۲ درصد و در H_T/P برابر با ۱، ۹ درصد کاهش را نشان می‌دهد؛ بنابراین همانند نسبت بزرگ‌نمایی ۲ و ۳، در نسبت بزرگ‌نمایی ۴ سرریز قوسی دارای ضریب دبی کمتری نسبت به سرریز مثلثی است که با افزایش هد آب و در نتیجه افزایش تداخل تیغه‌های ریزشی و استغراق موضعی، راندمان سرریز مثلثی کاهش بیشتری نشان می‌دهد و در نسبت‌های هد بیشتر آب، راندمان دو سرریز به هم نزدیک می‌شوند.



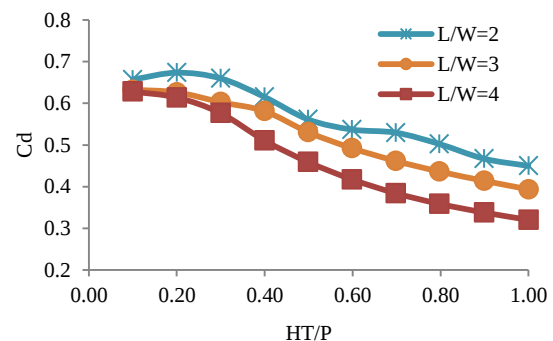
شکل ۱۱- منحنی تغییرات Q نسبت به H/P در سرریز کنگره‌ای



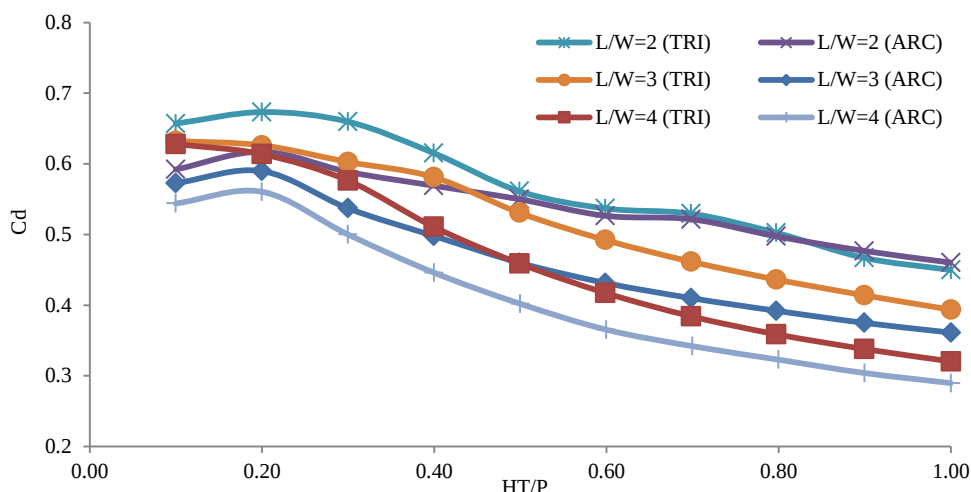
شکل ۱۲- تغییرات ضریب دبی در سرریز کنگره‌ای قوسی در نسبت‌های بزرگ‌نمایی مختلف

شکل ۱۳ سرریزهای کنگره‌ای شبیه‌سازی شده در همه نسبت‌ها را نشان می‌دهد. بررسی شکل‌های پیشین نشان داد که در بزرگ‌نمایی یکسان، سرریزهای کنگره‌ای مثلثی راندمان بالاتری نسبت به سرریز کنگره‌ای قوسی دارند؛ اما شکل ۱۳ نشان می‌دهد که سرریزهای قوسی در بزرگ‌نمایی متفاوت از سرریز کنگره‌ای مثلثی، می‌توانند ضریب دبی بیشتری داشته باشند. برای سرریز قوسی در L/W برابر با ۲ ضریب دبی دارای راندمان بیشتری نسبت به سرریز کنگره‌ای مثلثی با L/W برابر ۳ و ۴ است. همچنین برای سرریز قوسی در L/W برابر با ۳ راندمان بیشتری نسبت به سرریز کنگره‌ای مثلثی در L/W برابر با ۴ در H_T/P بیشتر از ۰/۵، وجود دارد؛ بنابراین در هر حالتی نمی‌توان سرریز کنگره‌ای مثلثی را بهتر از سرریز کنگره‌ای قوسی دانست. باید توجه داشت که افزایش بزرگ‌نمایی تأثیر بسزایی بر کاهش ضریب دبی دارد و تداخل تیغه‌های ریزشی و استغراق موضعی را افزایش خواهد داد.

بزرگ‌نمایی ۲ تا ۳ و از نسبت بزرگ‌نمایی ۳ تا ۴، به ترتیب ۲۱ درصد و ۲۶ درصد افزایش داشته است؛ بنابراین در نسبت بزرگ‌نمایی بالاتر، سرریز دبی بیشتری از خود عبور می‌دهد، اما از راندمان سرریز نیز با کاهش ضریب دبی کاسته شده است. بدین معنی که با دو برابر شدن طول سرریز ظرفیت عبور دبی دو برابر نخواهد شد. شکل ۱۲ تغییرات ضریب دبی C_d در مقابل نسبت هد آب H_T/P در سرریز کنگره‌ای قوسی را در نسبت‌های بزرگ‌نمایی مختلف نشان می‌دهد. مطابق با شکل، همانند سرریز کنگره‌ای مثلثی با افزایش L/W مقدار ضریب دبی کاهش می‌یابد. در H_T/P برابر با ۰/۳، ضریب دبی سرریز کنگره‌ای مثلثی در نسبت‌های بزرگ‌نمایی ۲، ۳ و ۴ به ترتیب برابر با ۰/۵۹، ۰/۵۴ و ۰/۵۰ است؛ بنابراین ضریب دبی از نسبت بزرگ‌نمایی ۲ تا ۴، ۱۵ درصد کاهش داشته است. همچنین در $H_T/P = ۱$ ، ضریب دبی سرریز کنگره‌ای در نسبت‌های بزرگ‌نمایی ۲، ۳ و ۴ به ترتیب ۰/۴۶، ۰/۳۶ و ۰/۲۹ می‌باشد و از نسبت بزرگ‌نمایی ۲ تا ۴، ۳۷ درصد کاهش یافته است. مطابق با شکل‌های ۱۰ و ۱۲ با افزایش نسبت هد آب، فاصله بین L/W برابر با ۲ تا ۴ افزایش می‌یابد. این مسئله نشان می‌دهد که میزان کاهش ضریب دبی در L/W برابر با ۴ بیشتر بوده است. به نظر می‌رسد کاهش زاویه در رئوس و همچنین کاهش زاویه بین سرریز و جدار کانال برای L/W برابر با ۴، سبب شده است در نسبت هد آب زیاد، استغراق موضعی و همچنین تداخل تیغه‌های ریزشی به شدت افزایش یابد. در نتیجه راندمان سرریز در بزرگ‌نمایی ۴ کاهش زیادی داشته باشد.



شکل ۱۰- تغییرات ضریب دبی در سرریز کنگره‌ای مثلثی در نسبت‌های بزرگ‌نمایی مختلف



شکل ۱۳. تغییرات ضریب دبی نسبت به هد آب برای سرریزهای کنگره‌ای شبیه‌سازی شده

نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر پارامترهای هندسی سرریز کنگره‌ای مثلثی و قوسی بر ضریب دبی جریان با استفاده از نرم‌افزار Flow3D و مدل آشفتگی $k - \varepsilon$ RNG بررسی شد. نتایج نشان داد افزایش نسبت هد آب (H_T/P)، باعث کاهش ضریب دبی تا حداکثر ۳۹ درصد در سرریز کنگره‌ای مثلثی و قوسی می‌شود. دلیل این امر افزایش استغراق موضعی و همچنین تداخل بیشتر تیغه‌های ریزشی است. استغراق موضعی سبب می‌شود طول مؤثر سرریز کاهش یابد. همچنین تداخل تیغه‌های ریزشی سبب ایجاد مقاومت در مقابل حرکت جریان شده و ضریب دبی را کاهش می‌دهد. در نسبت‌های بزرگ‌نمایی یکسان، سرریز کنگره‌ای قوسی راندمان کمتری نسبت به سرریز کنگره‌ای مثلثی تا حداکثر ۱۴ درصد داشته است. کاهش زاویه با جداره‌ها در سرریز کنگره‌ای قوسی سبب افزایش استغراق موضعی در کناره‌ها می‌شود و کاهش ضریب دبی را به دنبال خواهد داشت. از طرفی افزایش زاویه رأس سرریز در سرریز کنگره‌ای قوسی نسبت به سرریز کنگره‌ای مثلثی، سبب برخورد جت‌های جریان با زاویه بیشتر در رأس سرریز قوسی شده و در نتیجه آشفتگی بیشتر و راندمان کمتری را ایجاد می‌کند؛ البته با افزایش هد آب، تیغه‌های ریزشی روی سرریز مثلثی نیز افزایش داشته و سبب کاهش راندمان بیشتری در آن می‌شود و نهایتاً سرریز مثلثی و قوسی راندمان مشابهی را پیدا خواهند کرد. درکل، نتایج نشان می‌دهد که مدل $k - \varepsilon$ RNG قابلیت مناسبی برای شبیه‌سازی سرریزهای کنگره‌ای با

جزئیات مناسب دارد و می‌توان از آن برای شبیه‌سازی شکل‌های مختلف سرریز کنگره‌ای استفاده کرد. همچنین سرریزهای کنگره‌ای مثلثی کارایی بهتری را نسبت به سرریز کنگره‌ای قوسی دارند.

منابع

۱. اسمعیلی ورکی م. صفروضی‌زاده م. ۱۳۹۲. بررسی مشخصات هیدرولیکی جریان بر روی سرریزهای کنگره‌ای با پلان نیم‌دایره‌ای، نشریه آب و خاک. ۲۷(۱): ۲۲۴-۲۳۴.
۲. اژدری مقدم م. و امانیان ن. ۱۳۹۰. بررسی تأثیر طول دماغه و زاویه دیواره سرریز با امتداد جریان در سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای به روش CFD. ششمین کنگره ملی مهندسی عمران. دانشگاه سمنان.
۳. ضمیری ا. کرمی ح. و فرزین س. ۱۳۹۶. مطالعه عددی عوامل مؤثر بر عملکرد هیدرولیکی جریان عبوری از سرریز کنگره‌ای. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۱(۵): ۸۶۵-۸۷۵.
۴. قاسم‌زاده ف. و کوچک‌زاده ص. ۱۳۹۴. شبیه‌سازی مسائل هیدرولیکی در Flow3D. انتشارات نوآور. تهران.
۵. قلی‌زاده ع. قدسیان م. و پناهی ر. ۱۳۹۵. بررسی عددی تأثیر شکل تاج بر ضریب آبگذری سرریزهای کنگره‌ای قوسی با پلان دوزنقه‌ای. مهندسی عمران مدرس. ۱۶(۴): ۲۲۵-۲۳۸.

۶. کاهه م. دهقانی ا. کاهه م. و ظهیری ع. ۱۳۹۴. شبیه سازی هیدرولیک جریان در سازه ترکیبی سرریز - دریچه با استفاده از نرم افزار Flow3D. پژوهش های حفاظت آب و خاک. ۲۲(۱): ۱۱۱-۱۲۹.

۷. میرزائی ن. اسدی او عباسپور ا. ۱۴۰۰. بررسی عددی ضریب دبی سرریز کنگرهای ذوزنقه با تغییر زاویه در امتداد جریان با استفاده از مدل Flow3D. پژوهش آب ایران. ۱۵(۳): ۶۱-۶۹.

۸. نساری م. و عمارلو م. ۱۴۰۱. شبیه سازی عددی سرریز لبه پهن دارای رمپ های بالادست و پایین دست با نرم افزار Flow3D. صحت سنجی و مقایسه با مدل آزمایشگاهی. نهمین کنفرانس ملی توسعه پایدار در مهندسی عمران. تهران.

9. Afaridegan E. Amanian N. Haghiabi A. Passaei A. and Goodarzi A. 2023. Numerical Investigation of Modified Semi-Cylindrical Weirs. Water Resource Management. 37: 3715-3728.
10. Crookston B. M. and Tullis B. P. 2012. Hydraulic design and analysis of labyrinth weirs. Journal of Hydraulic Engineering. 363-370.
11. Haghiabi A. H. Rashki Ghaleh Nou M. and Parsaie A. 2022. The energy dissipation of flow over the labyrinth weirs. Alexandria Engineering Journal. 61(5): 3729-3733.
12. Noori B. M. and Aaref N. T. 2017. Hydraulic Performance of Circular Crested Triangular Plan Form Weirs. Arabian Journal for Science and Engineering. 11(4): 1-10.
13. Saleh S. Hamarrahim Muhammad S. and Abo A. 2022. Effect of Pooled and Flat Stepped Spillway on Energy Dissipation Using Computational Fluid Dynamics. Tikrit Journal of Engineering Sciences. 29(2): 75-79.
14. Seo I.W. Do Kim Y. Park Y.S. and Song C.G. 2016. Spillway discharges by modification of weir shapes and overflow surroundings. Environmental Earth Sciences. 75(6): 1-13.
15. Tullis B. P. Amanian N. and Waldron D. 1995. Design of labyrinth weir spillways. American Society of Civil Engineering. Journal of Hydraulic Engineering. 121(3): 247-255.

