



بررسی آزمایشگاهی و عددی روابط ضریب دبی سرریزهای لبه تیز کنگره ای U شکل در پلان

فیروز محمدی^{۱*}، یوسف حسن زاده^۲، کیومرث روشننگر^۲

۱- آموزشکده فنی پسران اهر، اهر، ایران

۲- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۳۰

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۴/۳۱

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۲۷

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۶/۲۰

کلمات کلیدی:

افزایش ارتفاع

راندمان آب‌گذری

سرریزهای کنگره ای

ضریب دبی

طول قوس

خلاصه: در این تحقیق، روابط ضریب دبی سرریزهای لبه تیز کنگره ای U شکل در پلان (تک سیکل) به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی شده است. همچنین از ۳ گروه سرریز به ارتفاع های ۱۰، ۱۲/۵ و ۱۵ سانتی متر و در هر ارتفاع، طول قوس های متفاوت به مقادیر ۴۰/۸۲، ۴۵ و ۴۸/۱۰ سانتی متر آزمایش شده است. هدف اصلی تحقیق حاضر، تعیین دبی عبوری از روی سرریز با ارائه روابطی برای ضریب دبی به صورت آزمایشگاهی می باشد. برای استخراج رابطه از آنالیز ابعادی به روش پی باکینگهام استفاده گردید. ضریب دبی به صورت بی بعد تابعی از نسبت طول قوس به عرض سرریز و نسبت هد روی سرریز به ارتفاع سرریز به دست آمد. شبیه سازی سه بعدی سرریزها به صورت عددی و با معادلات حاکم بر روش حجم محدود با استفاده از نرم افزار *FLOW-3D* انجام گردید، سپس با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج تحقیق حاضر نشان می دهد که رابطه پیشنهادی قابلیت پیش بینی مقادیر دبی را با دقت بسیار بالا و خطا ۴/۷۹ درصد در بازه نسبت هد به ارتفاع سرریز ۰/۱ تا ۱/۲ را دارا می باشد. با افزایش طول قوس سرریزها، تداخل جریان افزایش و راندمان دبی کاهش می یابد، با اینکه با افزایش یافتن طول قوس سرریزها طول تاج افزایش می یابد راندمان آب‌گذری سرریز روند کاهشی می گیرد، حداکثر کاهش راندمان آب‌گذری در این حالت ۷/۰۱ درصد می باشد. با ثابت بودن طول قوس و افزایش در ارتفاع سرریزها مشاهده گردید که راندمان آب‌گذری به طور محسوس کاهش می یابد که حداکثر حجم جریان عبوری از روی سرریز ۴/۸۲ درصد کاهش را نشان می دهد.

۱- مقدمه

سرریزها سازه هایی هستند که در کانال، رودخانه و دریاچه ها برای اندازه گیری جریان، کنترل دبی در مواقع پیک سیلاب و اندازه گیری سطح پایاب تاج سرریز در شرایط جریان آزاد به کار می روند. سرریز کنگره ای نمونه ای از سرریزهای چند وجهی است که به دلیل وجود شکستگی در پلان باعث افزایش طول مؤثر سرریز در یک طول مستقیم می شوند [۱]. بهبود عملکرد هیدرولیکی سرریزهای نرمال با معرفی سرریزهای کنگره ای، گام موثری بود که با افزایش طول آب‌گذری سرریز با عرض ثابت کانال تحقق یافت. یک سرریز کنگره ای می تواند دبی بیشتری را در بار آبی نسبتا پایین در مقایسه

* نویسنده عهده دار مکاتبات: firouzm1979@gmail.com

با سرریزهای خطی با عرض یکسان کانال، از خود عبور دهد [۲].

مورفی (۱۹۰۹) اولین سرریز کنگره ای را به شکل ذوزنقه با ۷ سیکل ساخت. مورفی محل ساخت سرریز را در پهن ترین محل رودخانه در نظر گرفت و در یک عرض رودخانه ۱۸ متری توانست طول تاج سرریز کنگره ای را به ۶۰ متر افزایش دهد [۳]. جنیتیلینی (۱۹۴۰) اولین تحقیق هیدرولیکی برای سرریزهای کنگره ای را انجام داد. او خصوصیات سرریزهای کنگره ای مورب و زیگزاک را با تاج لبه تیز استاندارد آزمایش کرد [۴]. جنیتیلینی (۱۹۴۱) یک رابطه ی هد-دبی مستقل از تعداد سیکل ارائه کرد [۵]. هی و تیلور (۱۹۷۰) اولین افرادی بودند که جامع ترین تحقیق را بر روی سرریزهای کنگره ای مثلثی و ذوزنقه ای (با شکل تاج لبه تیز) انجام دادند.

آنان برای نشان دادن عملکرد سرریزهای کنگره ای از نسبت دبی سرریز کنگره ای به دبی سرریز خطی استفاده کردند. در منحنی های طراحی ارائه شده توسط آن ها ارتفاع هیدرواستاتیک جریان به عنوان بار موثر بر روی سرریز لحاظ شده بود [۶]. ایندکلوفر و روو (۱۹۷۵) ناحیه تداخل جریان در رؤس سرریزهای مثلثی لبه تیز را بررسی کردند و یک طول برای نواحی تداخل جریان تعریف کردند [۷]. مگالاس (۱۹۸۵) و مگالاس و لورنا (۱۹۸۹) منحنی هایی شبیه منحنی های دارواس (۱۹۷۱) برای شکل تاج اوجی توسعه دادند و رابطه ای بی بعد برای ضریب دبی ارائه کردند [۸-۱۰]. تویس و همکاران (۱۹۹۵) سرریز کنگره ای دوزنقه ای با ۴ سیکل و ۵ شکل تاج مختلف را کار کردند و دریافتند که ظرفیت سرریز کنگره ای دوزنقه ای تابعی از بار هیدرولیکی کل، طول تاج موثر و ضریب آبگذری است. ضریب آبگذری تابعی از ارتفاع سرریز، بار هیدرولیکی کل، ضخامت دیواره سرریز، شکل تاج، شکل راس و زاویه دیواره های جانبی سرریز می باشد. با بررسی تاثیر این پارامترها بر عملکرد سرریزهای کنگره ای نمودارهای جدیدی را ارائه دادند [۱۱]. وارمیلتون و تسانگ (۲۰۰۰) مطالعات خود را بر روی هوادهی سرریزهای کنگره ای انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که سرریز کنگره ای مستطیلی در مقایسه با شکل مثلثی و آن نیز در مقایسه با سرریز خطی از کارایی بالاتری برای هوادهی جریان برخوردار است. دلیل هوادهی بیشتر جریان در سرریزهای کنگره ای بالا بودن مومنتم جریان، افزایش طول تاج و ارتفاع آزاد سقوط جریان می باشد. این محققین همچنین اعلام کردند که با بالا رفتن دبی، برتری شکل مستطیلی نسبت به شکل مثلثی فزونی می یابد که این امر به دلیل افزایش تداخل لایه های ریزشی جریان در سرریز مثلثی می باشد [۱۲]. حیدرپور و همکاران (۲۰۰۷) سرریزهای چند وجهی با پلان مستطیلی و U شکل را بررسی کردند و برای سرریزهای مستطیلی و U شکل در پلان پارامترهای تاثیر ارتفاع سرریز بر ضریب دبی، تاثیر طول موازی جهت جریان بر ضریب دبی، تاثیر طول دماغه نسبت به طول گوشواره بر ضریب دبی، همچنین مقایسه سرریزهای چند وجهی با پلان مستطیلی و U شکل را با سرریزهای خطی بررسی کردند. این محققین اظهار داشتند در صورتی که گوشه های سرریز انحنادار شوند و سرریز به صورت U شکل ساخته شود، تداخل سفره های ریزشی کاهش یافته و عملکرد سرریز بهبود می یابد [۱۳]. قدسیان

(۲۰۰۷) مطالعات آزمایشگاهی بر روی سرریز کنگره ای مثلثی با شکل تاج های متفاوت انجام داد و ابتدا با آنالیز ابعادی پارامترهای مربوطه را به صورت بی بعد استخراج نمود، سپس با داده های آزمایشگاهی رابطه ای منظم برای ضریب دبی و هد- دبی معرفی کرد در مطالعات قدسیان ضریب دبی تابعی از نسبت هد روی سرریز به ارتفاع سرریز، نسبت طول سرریز به پهنای سرریز و شکل تاج به دست آمد [۱۴]. خوده و همکاران (۲۰۱۰) و (۲۰۱۱) ارزیابی و آنالیز ضرایب تاج سرریزهای کنگره ای دوزنقه ای را بررسی کردند، آنالیزهای مقایسه ای آن ها نشان داد که ماکزیمم تفاوت ضریب دبی بر واحد عرض، در مقادیر ضریب تاج متفاوت حدود ۵ درصد می باشد [۱۵ و ۱۶]. کومار و همکاران (۲۰۱۱) ضریب آبگذری سرریز لبه تیز مثلثی در پلان را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که با کاهش زاویه راس، برای مقادیر زیاد نسبت بار آبی روی سرریز به ارتفاع سرریز به دلیل تداخل جت های ریزشی ضریب آبگذری کاهش می یابد و برای مقادیر کم نسبت بار آبی روی سرریز به ارتفاع سرریز ضریب آبگذری افزایش می یابد [۱۷]. استفانو و فرو (۲۰۱۳) سرریز مثلثی در پلان با تاج لبه تیز را بررسی کردند، آن ها از نتایج و داده های آزمایشگاهی کومار و همکاران (۲۰۱۱) برای کالیبره کردن نتایج خود استفاده کردند و روابطی برای دبی و ضریب دبی ارائه نمودند [۱۸]. کراکستون و تویس (۲۰۱۳) یک روش برای طراحی هیدرولیکی و آنالیز سرریزهای کنگره ای بر پایه ی نتایج آزمایشگاهی به صورت مدل سازی فیزیکی ارائه کردند. نتایج آزمایش ها نشان می دهد که افزایش در راندمان دبی به وسیله ی یک تاج نیم دایره ای شکل قابل ملاحظه تر برای $0.4 \leq \frac{H_T}{P}$ است [۲]. کارولو و همکاران (۲۰۱۷) یک رابطه دبی-هد بی بعد برای سرریزهای کنگره ای مثلثی با تغییر در جهت جریان رؤس مثلث ها ارائه کردند. در این رابطه نسبت های h/w برای شکل تاج لبه تیز و لبه پهن مقایسه شده و نمودارهای مربوطه برای این متغیرها بررسی شده است [۱۹]. بی جن خان و کوچک زاده (۲۰۱۷) در یک بررسی آزمایشگاهی، روابط ضریب دبی برای سرریزهای لبه تیز کنگره ای مثلثی تک سیکل را در حالت جریان آزاد و مستغرق ارائه کردند [۲۰]. سنگ سفیدی و همکاران (۲۰۱۷) عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کنگره ای- قوسی را مورد بررسی قرار دادند. همچنین علاوه بر بررسی عملکرد و پدیده های هیدرولیکی، ظرفیت آبگذری سرریز کنگره ای- قوسی را حدود ۴/۵

متفاوت سرریزهای کنگره ای دوزنقه ای را بررسی شده است، اما وجود تاثیر طول قوس های مختلف، ارتفاع های متفاوت سرریز در شرایط جریان آزاد به صورت آزمایشگاهی در سرریزهای کنگره ای لبه تیز U شکل در پلان (تک سیکل) بررسی نشده است. بنابراین مطالعه در مورد سرریزهای کنگره ای لبه تیز U شکل در پلان (تک سیکل)، انجام نشده، به همین منظور مطالعه این سرریزها ضرورت دارد. در این پژوهش نتایج آزمایشگاهی سرریزهای کنگره ای لبه تیز U شکل در پلان (تک سیکل) با طول قوس و ارتفاع های مختلف، همچنین شبیه سازی عددی سه بعدی جریان روی سرریز، در حالت جریان آزاد بررسی شده است. با استفاده از آنالیز ابعادی و تئوری π ، پارامترهای موثر بر روابط انتخاب و روابط بی بعد ضریب دبی توسعه یافته و تحلیل هیدرودینامیکی پارامترهای موثر بر ضریب دبی انجام شد. دقت نتایج آزمایشگاهی و روابط پیشنهادی به صورت آنالیز آماری نیز مقایسه و ارزیابی گردیده است.

۲- مبانی هیدرولیک سرریزهای کنگره ای در شرایط جریان آزاد

جریان روی سرریزهای کنگره ای سه بعدی بوده و به آسانی به صورت ریاضی تشریح نمی شود و تابع دبی به صورت مطالعه آزمایشگاهی و بر اساس تحلیل ابعادی به دست می آید. ظرفیت سرریز کنگره ای دوزنقه ای تابعی از هد کل، طول تاج مؤثر و ضریب دبی است. ضریب دبی تابعی از هد کل، ارتفاع سرریز، ضخامت سرریز، شکل تاج، شکل نوک و زاویه لبه های کناری می باشد. برای ساده سازی آنالیز، از تأثیر ویسکوزیته و کشش سطحی، چشم پوشی شده است [۱۱].

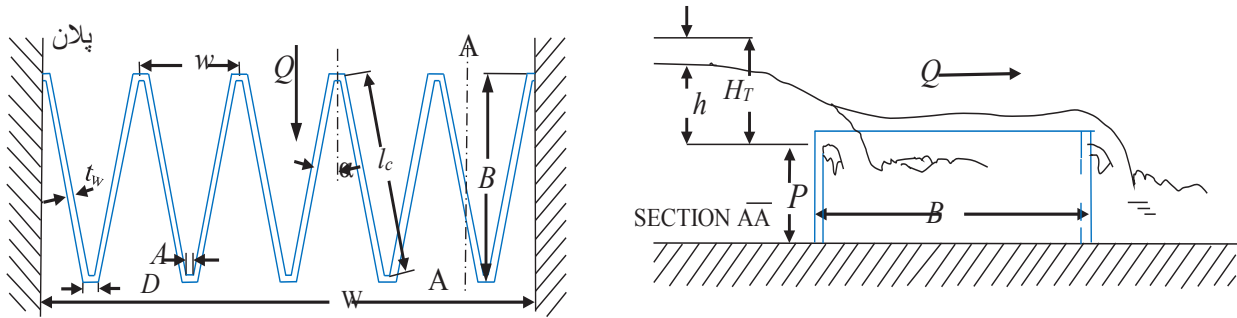
تولیس و همکاران (۱۹۹۵) برای طراحی سرریز کنگره ای یک معادله ی توسعه یافته برای سرریزهای کنگره ای دوزنقه ای ارائه دادند. بیشترین تأثیر ضریب دبی وابسته به پارامترهای موثر یکسان، نسبت به سرریز خطی می باشد، دماغه سرریز کنگره ای دوزنقه ای در رأس و زاویه کنگره نیز از پارامترهای تأثیرگذار به شمار می رود. رابطه دبی برای سرریزهای کنگره ای را می توان به صورت زیر بیان کرد [۱۱]

$$Q = \frac{2}{3} C_{d(\alpha)} \sqrt{2g} L_c H_T^{3/2} \quad (1)$$

برابر بیشتر از سرریز خطی گزارش کردند [۲۱]. مشکواتی تروجنی و همکاران (۲۰۱۷) ضریب دبی سرریزهای کنگره ای دوزنقه ای شکل را مطالعه کردند، در این مطالعه سرریزهای کنگره ای دوزنقه ای با دبی ثابت و ۳ ارتفاع و ۳ طول متفاوت سرریز را بررسی کردند، همچنین راندمان آگذری سرریزهای دوزنقه ای مورد مطالعه را با سرریزهای خطی مورد مقایسه قرار دادند [۲۲].

عباسی و صفرزاده (۲۰۱۸) بررسی هیدرودینامیکی ساختار سه بعدی جریان در سرریز کنگره ای دوزنقه ای تحت زاویه ۱۵ درجه را بررسی کردند و به تشریح ساختار سه بعدی جریان روی سرریز با استفاده از خطوط جریان، الگوی عبوری جریان از روی سرریز، تشکیل جریان چرخشی و گرده ماهی، بالازدگی سطح آب، همچنین به صحت نتایج شبیه سازی عددی (CFD) با مدل فیزیکی پرداختند [۲۳]. بیلهان و همکاران (۲۰۱۸) به صورت آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی (CFD) سرریزهای کنگره ای نیم دایره ای ۳ سیکل در دو حالت با و بدون شکننده تداخل جریان در راس کنگره را بررسی کردند، همچنین این محققین در نتایج شان اظهار داشتند استفاده از شکننده های تداخل جریان کاهش ضریب دبی را در حدود (۳/۱-۲/۲ درصد) بهبود می دهد که قابل نظر کردن می باشد [۲۴]. صفرزاده و عباسی (۲۰۱۹) همگرایی لایه های جریان در پایین دست سرریز کنگره ای دوزنقه ای تحت زاویه ۱۵ درجه را بررسی کردند، همچنین پدیده های هیدرولیکی موثر بر راندمان آگذری را تحلیل و مکانیزم افزایش بار هیدرولیکی در بار آبی های پایین تداخل جریان و استغراق موضعی در بار آبی های متوسط به بالا که نرخ کاهش راندمان آگذری سرریز را افزایش می دهند، را در سرریز مورد تحقیق، تشریح کردند [۲۵]. قادری و همکاران (۲۰۲۰) در این تحقیق تأثیر شیب کانال بستر و همگرایی دیواره ها در کانال غیرمنشوری بر ضریب دبی سرریزهای کنگره ای با استفاده از روش عددی (نرم افزار ۳D-FLOW) بررسی شده است. همزمان استفاده از شیب بستر و زاویه همگرایی تخلیه را به میزان قابل توجهی افزایش می دهد، ضرایب دبی ۲۸/۶۴ و ۳۰/۴۲ درصد بیشتر در مقایسه با مدل مشابه کانال بدون تغییرات هندسی بود [۲۶].

در مطالعه های پیشین با توجه به مدل های هندسی متعددی که در مورد سرریزهای کنگره ای به صورت آزمایشگاهی توسط محققان مختلف مورد بررسی قرار گرفته است، همچنین تاثیر ارتفاع و طول



شکل ۱. طرح کلی سرریز کنگره ای دوزنقه ای شامل پارامترهای هندسی [۲]

Fig. 1. Overview of trapezoidal labyrinth weirs including geometric parameters [2]

۳- مبانی هیدرودینامیک سرریزهای کنگره ای در شرایط جریان آزاد

معادلات حاکم بر شبیه سازی عددی تحقیق حاضر، معادلات بقای جرم و اندازه حرکت می باشد. این معادلات در جریان های دو فازی در سیستم مختصات کارتزین (X,Y,Z) با مولفه های سرعت (u,v,w) به صورت روابط (۴ و ۵) بیان می شوند.

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x + f_x$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + G_y + f_y \quad (5)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + G_z + f_z$$

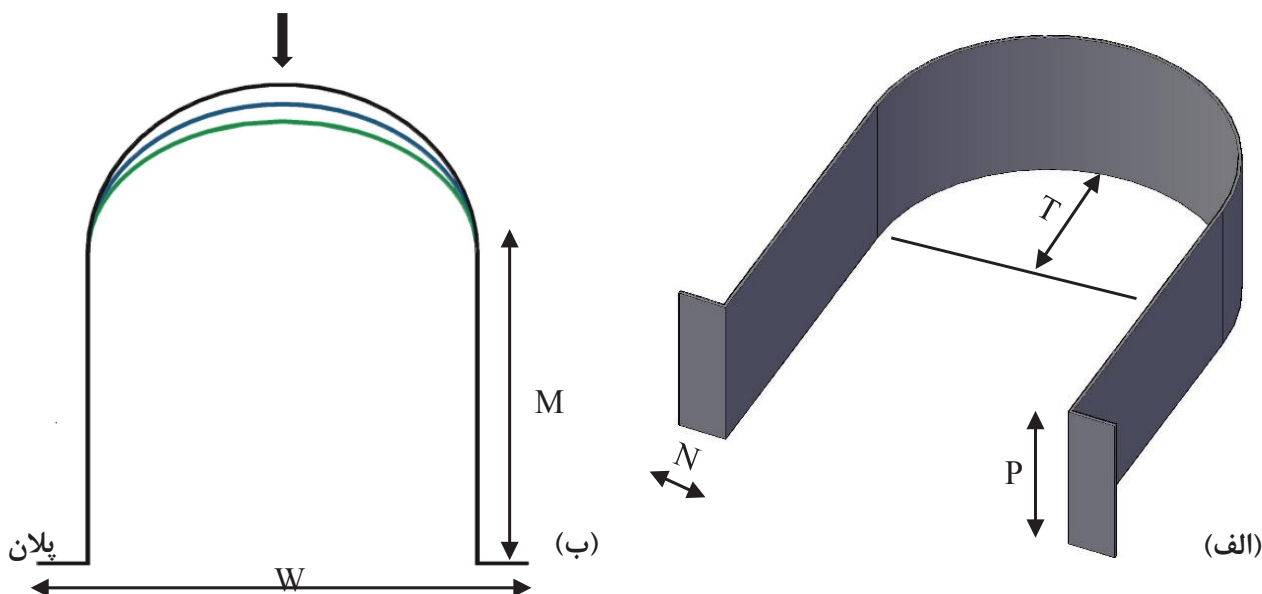
در معادلات فوق، V_F جزء حجم باز برای برقراری جریان در الگوریتم FAVOR می باشد که در ادامه جزئیات آن ارائه شده است. A_x جزء سطح باز برای برقراری جریان در جهت X بوده و A_y و A_z جزء سطوح متناظر در راستای محورهای Y و Z می باشند. در معادلات بقای اندازه حرکت، P بیانگر فشار بوده و (G_x, G_y, G_z) و (f_x, f_y, f_z) به ترتیب بیانگر مولفه های شتاب کالبدی و شتاب ناشی از لزجت می باشند. مولفه های شتاب ناشی از لزجت در برگیرنده

که در آن: Q دبی عبوری از سرریز، g شتاب ثقل، C_d ضریب دبی سرریز، L_C طول موثر سرریز، H_T انرژی کل بالای سرریز می باشد. با توجه به شکل ۱ پارامترهای مؤثر بر ضریب دبی شامل انرژی کل بالای سرریز (H_T)، طول موثر سرریز (L_C)، ارتفاع سرریز (P)، عرض سرریز (W)، زاویه بین دیواره سرریز (α)، ضخامت دیواره سرریز (t_w) و عمق جریان (Y) می باشد. بنابراین بر اساس تحلیل ابعادی، ضریب دبی تابعی از پارامترهای بدون بعد به دست می آید.

$$C_d = f(\mu, \sigma, g, H_T, L_C, P, W, \alpha, t_w, y) \quad (2)$$

$$C_d = f\left(R_e, w_b, \frac{H_T}{P}, \frac{L_C}{P}, \frac{H_d}{W}, \frac{t_w}{W}, \alpha, \frac{y}{P}, \frac{y}{W}, \frac{L_C}{W}\right) \quad (3)$$

با توجه به اینکه تاثیر ویسکوزیته منجر به عدد رینولدز و تاثیر کشش سطحی منجر به عدد وبر می شود، و این دو عامل در هد به ارتفاع سرریز کوچکتر از ۰/۱ (در ارتفاع های پایین) تاثیر دارد و با نظر به اینکه در بازه نقطه پیک به پایین تر مدنظر طراحان نمی شود، همچنین در نظر گرفتن این دو عامل در روابط طراحی دشوار می باشد، بنابراین از تاثیر این دو عامل صرف نظر می شود. تحلیل ابعادی انجام گرفته و تحقیقات مختلف مانند تولیس و همکاران (۱۹۹۵) و هی و تیلور (۱۹۷۰) نشان می دهد که پارامتر بدون بعد نسبت هد کل به ارتفاع سرریز H_T/P به عنوان مهم ترین پارامتر در روابط ضریب دبی مطرح شده است [۱۱ و ۶].



شکل ۲. سرریز کنگره ای U شکل مورد تحقیق الف) پارامترهای هندسی ب) طول قوس های مختلف
Fig. 2. The U-shaped labyrinth weir in the present study a) Geometric parameters b) Length of different arches

۴- مواد و روش ها

۴-۱- تحلیل ابعادی

با توجه به اینکه پارامترهای مختلف هندسی، هیدرولیکی و مشخصات سیال در مسئله مورد نظر تاثیرگذار می باشند، پارامترهای موثر بر ضریب دبی به طور کامل انتخاب شده و سپس در ابتدا با استفاده از آنالیز پی باکینگهام پارامترهای تاثیرگذار به صورت بی بعد درآمده و با انجام آزمایش و تغییر متغیرهای ورودی، ارتباط بین پارامتر هدف با پارامترهای تاثیرگذار تعیین شده است.

با توجه به شکل ۲ در حالت عمومی، رابطه بین پارامترهای تاثیرگذار بر هیدرولیک سرریزهای غیرخطی انحنادار تک سیکل به صورت زیر می باشد:

$$\varphi(\rho, g, \mu, \sigma, Q, h, P, L_T, L_R, W) = 0 \quad (6)$$

که در آن، ρ ، g ، μ و σ به ترتیب بیانگر، دانسیته سیال، شتاب ثقل، ویسکوزیته سیال و کشش سطحی سیال می باشد. با توجه به اینکه سه بعد اصلی در مسئله مورد نظر دخالت دارند، لذا طبق قضیه پی باکینگهام، تعداد ۷ پارامتر بی بعد می توان با استفاده از متغیرهای مسئله به صورت زیر تعیین نمود

اثرات هر دو لزجت مولکولی و لزجت ناشی از آشفتگی است. برای مدل سازی آشفتگی در مسائل هیدرولیک، عمدتاً از مدل های دو معادله ای استفاده می شود.

برای حل عددی از نرم افزار FLOW-3D استفاده شده و معادلات غیردائم حاکم با روش حجم محدود، حل عددی شده اند. در این نرم افزار الگوریتم جزء سطح/حجم بیانگر مانع (FAVOR) برای تعریف هندسه در روش حجم محدود به کار رفته است. این الگوریتم موانع داخل میدان را در سلول های محاسباتی به صورت مقدار جزئی بین صفر و ۱ در نظر می گیرد به نحوی که اگر کل سلول توسط مانع پر شده باشد، مقدار جزء حجم یا سطح برابر ۱ خواهد بود. سطح آزاد جریان با استفاده از الگوریتم جزء حجم سیال (VOF) تعیین می شود.

ترم های سرعت و فشار به صورت ضمنی و با استفاده از مقادیر فشار و سرعت در زمان های ماقبل در معادلات پیوستگی و مومنتم کویل می شوند. در این نرم افزار، معادلات شبه ضمنی حاصله به صورت تکراری و با استفاده از تکنیک های تخفیف حل می شوند که در این تحقیق از تکنیک GMRES به عنوان حل گر ضمنی فشار استفاده شده است. در ادامه جزئیات بیشتر از انفصال مکانی میدان حل، شرایط مرزی و همچنین روند همگرایی ارائه شده است.



شکل ۳. نمایشی از تجهیزات و مدل فیزیکی الف) فلوم آزمایشگاهی تحقیق حاضر ب) مدل فیزیکی سرریز به ارتفاع ۱۵ سانتی متر
 Fig. 3. scheme of equipment and physical model a) experimental flume of the present study b) Physical model of weir with a height of 15 cm

جدول ۱. مشخصات پارامترهای هندسی مدل‌های فیزیکی و بازه آزمایش‌ها در تحقیق حاضر

Table 1. Characteristics of geometric parameters of physical models and experimental ration in the present study

Model	P(cm)	T(cm)	L _R (cm)	L _t /W	Q _{free} (lit/s)	H _{free} (mm)
۱	۱۰	۱۳	۴۰/۸۲	۲/۸۱	۲/۶۲-۶۷/۵۹	۵/۱۲۰-۵
۲	۱۰	۱۵	۴۵	۲/۹۴	۲/۵۹-۳۳/۱۷	۷/۱۱۹-۵
۳	۱۰	۱۷	۴۸/۱۰	۳/۰۳	۲/۵۶-۳۳/۹۴	۶/۱۲۰-۳۱
۴	۱۲/۵	۱۳	۴۰/۸۲	۲/۸۱	۲/۴۹-۱۲/۳۸	۹/۱۱۹-۵/۵
۵	۱۲/۵	۱۵	۴۵	۲/۹۴	۲/۴۷-۰۳/۰۸	۷/۱۱۹-۶/۲
۶	۱۲/۵	۱۷	۴۸/۱۰	۳/۰۳	۱/۴۳-۹۶/۸۸	۷/۱۲۰-۶
۷	۱۵	۱۳	۴۰/۸۲	۲/۸۱	۱/۳۲-۰۸/۸۱	۱۱/۱۲۰-۴۵
۸	۱۵	۱۵	۴۵	۲/۹۴	۱/۳۳-۴۵/۹۶	۱۲۰-۷
۹	۱۵	۱۷	۴۸/۱۰	۳/۰۳	۰/۳۸-۹۴/۳۷	۷/۱۲۰-۳۳

که در آن، R_e بیانگر عدد رینولدز می باشد.
 با ترکیب گروه‌های بی بعد ۴ و ۲ داریم:

$$\pi_{4,2} = \frac{\pi_4^2}{\pi_2} = \frac{h^2}{P^2} \frac{P^2 g \rho}{\sigma} = \frac{h^2 g \rho}{\sigma} = We_e \quad (9)$$

که در آن، We بیانگر عدد وبر می باشد. با ترکیب گروه‌های بی بعد ۵ و ۷ داریم:

$$\pi_{5,7} = \frac{\pi_7}{\pi_5} = \frac{L_R}{W} = \frac{L_R}{P} \quad (10)$$

$$\pi_1 = \varphi(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7) \quad (7)$$

که در آن، π_1 الی π_7 گروه‌های بی بعد می باشند و از طریق آنالیز ابعادی با انتخاب P ، g و ρ به عنوان متغیرهای تکراری و به شرح ذیل به دست می آیند.
 با ترکیب گروه‌های بی بعد ۱، ۳ و ۶ داریم:

$$\pi_{1,3,6} = \frac{\pi_3}{\pi_1 \pi_6} = \frac{Q}{P^{5/2} g^{1/2}} \frac{P g \rho}{\mu} \frac{P}{L_T} = \frac{QP}{\mu L_C} = R_e \quad (8)$$

جهت اندازه گیری دقیق عمق جریان از عمق سنج نقطه ای با دقت ($\pm 0/1$) میلی متر استفاده شد که این عمق سنج قادر بود در طول و عرض کانال حرکت کرده و ارتفاع تاج سرریز و عمق جریان در کل کانال را اندازه گیری کند. خط کش مدرج جهت اندازه گیری هد روی سرریز در حالت جریان یکنواخت از محل شروع رمپ (سطح شیب دار) به اندازه ۶ برابر ارتفاع سرریز به سمت بالادست قرار داشت. شیب فلوم مورد آزمایش با استفاده از جک قابل تغییر بوده که در این تحقیق شیب فلوم برای تمامی آزمایش ها در صفر درجه (افقی) ثابت قرار گرفت. تمامی مدل ها بر روی یک سکوی افقی مسطح به ارتفاع ۱۰ سانتی متر، طول ۱ متر نصب گردیده و یک صفحه شیب دار با زاویه ۵ درجه نسبت به افق و طول ۱/۰۶ متر، کف فلوم را به صفحه سکوی مسطح متصل کرده تا خطوط جریان به طور موازی از کف کانال به صفحه افقی جریان یابد. بر مبنای یافته های ویلمور (۲۰۰۴) که اثرات صفحه شیب دار بالادست سرریزهای کنگره ای را مورد آزمون قرار داده است، نصب و هندسه این صفحه شیب دار تاثیری بر روی کارایی هیدرولیکی مدل های فیزیکی (نسبت به حالت نزدیک شدن افقی جریان در شرایط کاربرد در مخازن سدها) ندارد. برای هر دبی مشخص جهت اطمینان از جریان پایدار در فلوم، اندازه گیری پارامترهای هیدرولیکی (عمق جریان و دبی جریان) پس از ۱۰ دقیقه انجام می گرفت. برای کنترل رقوم سطح آب در فلوم از یک دریچه باد بزی در انتهای پایین دست فلوم استفاده شده که نمای جانبی یک مدل فیزیکی در شکل ۲ و پارامترهای هیدرولیکی در شرایط جریان آزاد برای یک سرریز کنگره ای U شکل آورده شده است. روش انجام آزمایش به این ترتیب بود که به ازای دبی های ۳ تا ۸۰ لیتر بر ثانیه، ۴۵ داده آزمایشگاهی برداشت گردید، بنابراین هدهای متناظر با هر دبی با خط کش مدرج عمودی برداشت شده و ضریب دبی حاصل از هر دبی و هد به دست آمد و نمودار هد-دبی رسم گردید.

بیلهان و همکاران (۲۰۱۸) سرریزهای کنگره ای لبه تیز نیم دایره ای ۳ سیکل با ۳ ارتفاع متفاوت با و بدون شکننده تداخل جریان را بررسی کرده و به صورت عددی نیز راندمان آبگذری و عملکرد هیدرولیکی این سرریزها را بررسی کردند. در تحقیق حاضر، آزمایش ها بر روی سرریزهای کنگره ای لبه تیز U شکل تک سیکل با ۳ ارتفاع متفاوت و ۳ طول قوس مختلف انجام گردید. در جدول

با جمع بندی موارد فوق و با قرار دادن پارامترهای در شکل بی بعد به صورت زیر می باشد:

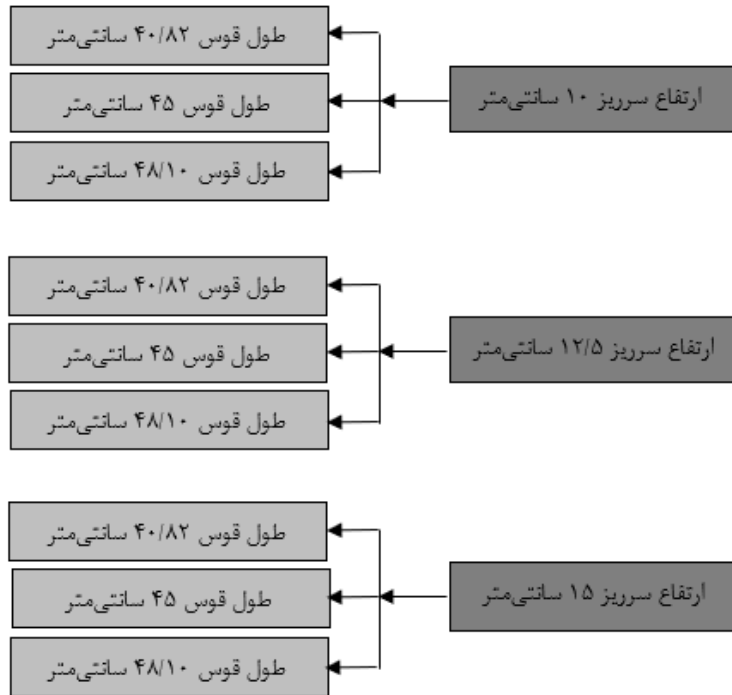
$$\frac{Q}{P^{5/2} g^{1/2}} = \varphi \left(\frac{h}{p}, R_e, W_e, \frac{L_R}{W} \right) \quad (11)$$

به جز برای مقادیر بسیار کوچک هد روی سرریز، می توان از تاثیر لزجت و کشش سطحی (اعداد رینولدز و وبر) صرف نظر نموده و رابطه فوق را به صورت زیر ساده نمود و سمت چپ رابطه فوق، از جنس ضریب دبی بوده و لذا می توان نوشت:

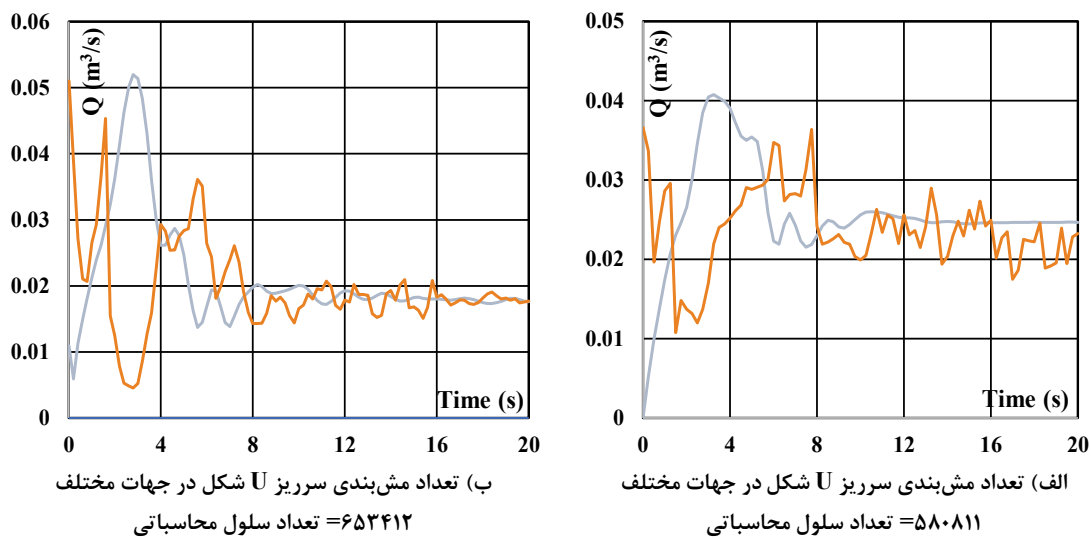
$$C_d = \varphi \left(\frac{h}{p}, \frac{L_R}{W} \right) \quad (12)$$

برای تعریف روابط ضریب دبی سرریزهای کنگره ای U شکل در پلان از پارامترهای بی بعد واقع در رابطه (۱۲) استفاده شده است.

۲-۴- مشخصات فلوم آزمایشگاهی، روش آزمایش و مدل های فیزیکی
 آزمایش های این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تبریز در فلومی مستطیلی-افقی به طول ۱۰ متر، عرض ۰/۴ متر و عمق ۰/۸ متر که در شکل ۳ نشان داده شده، در حالت جریان آزاد انجام گردید. فلوم دارای دیواره هایی از جنس پلاکسی گلاس و کف فلزی می باشد، که جهت تامین دبی از پمپ حلزونی با دبی حداکثر ۸۰ لیتر بر ثانیه استفاده شد. اندازه گیری دبی توسط فلومتر التراسونیک در خط لوله تغذیه کانال که مابین مخزن بالادست و پایین دست و در یک مسیر مستقیم با ماکزیمم خطای ۲ درصد قرار داشت، انجام گرفت. دبی سنج دارای یک نمایشگر دیجیتالی است که با دریافت اطلاعاتی مانند چگالی سیال، مشخصات قطر و جنس لوله، قابلیت اندازه گیری سرعت جریان داخل لوله و مقدار دبی جریان در واحدهای مختلف تا سه رقم اعشار را دارا می باشد. فلوم در بالادست به یک منبع آرام کننده جریان با طول ۲/۵ متر و عرض ۱/۵ متر مجهز شده بود، همچنین جهت آرام کردن تلاطم جریان از دو صفحه مشبک و در پایین دست آن از سنگریزه و در ادامه از صفحات شناور بر روی سطح آب استفاده گردید. جریان آب پس از عبور از طول فلوم به داخل مخزنی در پایین دست ریخته شده و توسط یک پمپ سیکل چرخشی تکرار می گردید.



شکل ۴. فلوجارت آزمایش‌های انجام شده در تحقیق حاضر
 Fig. 4. Flowchart of experiments performed in the present study

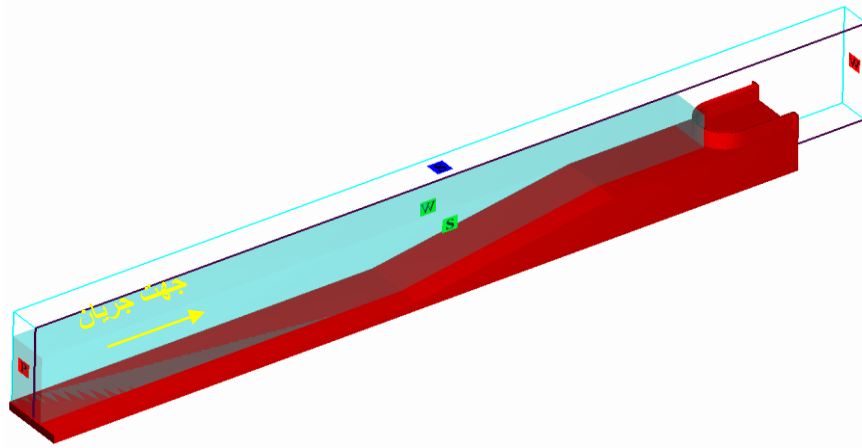


شکل ۵. بررسی حساسیت مدل به ابعاد شبکه

Fig. 5. Investigate the sensitivity of the model to the dimensions of the network A) The number of U-shaped weir meshes in different directions Number of computational cells = 580811 network B) The number of U-shaped weir meshes in different directions Number of computational cells = 653412

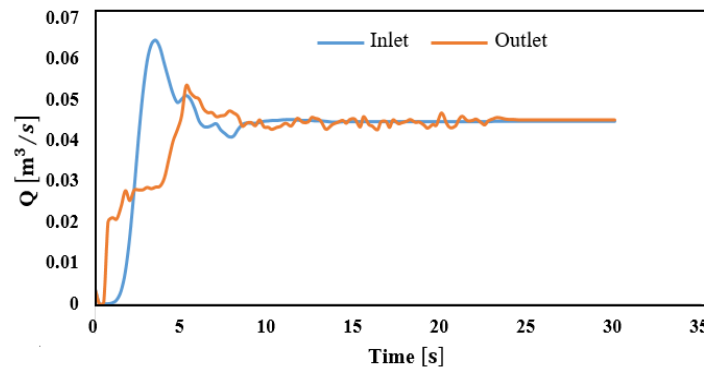
به لحاظ هندسی دارای تقارن می باشد، همچنین پارامترهای N ، M و W در همه مدل‌ها دارای مقدار ثابت به ترتیب ۳/۵، ۲۴ و ۳۴ سانتی متر هستند. قوس در مدل مورد تحقیق، نیم دایره‌ای

۱ مشخصات مدل‌های فیزیکی، بازه دبی متناظر با هدر روی سرریز ارائه شده است. پارامترهای هندسی در شکل ۲ نشان داده شده مدل مورد تحقیق



شکل ۶. شرایط مرزی مورد استفاده در مدل شبیه سازی های عددی جریان

Fig. 6. Boundary conditions used in flow numerical simulation models



شکل ۷. نمودار تغییرات زمانی دبی عبوری از مرزهای ورودی و خروجی سرریز به ارتفاع ۱۲/۵ و طول قوس ۴۸/۱۰

Fig. 7. the curve of time changes of flow across the inlet and outlet boundaries of the weir to a height of 12.5 and an arch length of 48.10

استفاده گردید. مدل سازی در بلوکی به ابعاد (۴/۳×۰/۳۴×۰/۵۹) در سه امتداد (X,Y,Z) انجام گردید، سپس شبکه بندی مدل به دلیل تقارن از یک محیط شبکه بندی به ابعاد (۴/۳×۰/۱۷×۰/۵۹) در راستای طولی، عرضی و ارتفاعی با تعداد سلول محاسباتی به طور معمول ۷۲۶۰۱۴ تحلیل گردید.

با توجه به شکل های ۶ و ۵ با افزایش تعداد مش بندی در هر ۳ جهت، هیدروگراف دبی ورودی و خروجی تا ثانیه ۲۵ کاملاً برهم منطبق می شوند، همچنین با افزایش تعداد مش بندی، نوسان هیدروگراف ورودی و خروجی حداقل می باشند. برای تحلیل از یک سیستم پردازش گر با مشخصاتی شامل CPU ۱۰ هسته ای با قدرت ۳،۳GHz (حافظه RAM ۱۲GB) استفاده و حساسیت سنجی

نبوده و به شکل U می باشد، بنابراین استخراج روابط و مقایسه عملکرد هیدرولیکی سرریز U شکل مدنظر خواهد بود. برای هر یک از سرریزهای مورد تحقیق تعداد ۴۵ داده آزمایشگاهی و در مجموع ۴۰۵ داده برای حالت جریان آزاد برداشت گردید. طبق Falvey (۲۰۰۳) باید نسبت H/W برای صرف نظر کردن از تاثیر دیواره جانبی کمتر از ۰/۳۵ باشد، که در تحقیق حاضر این نسبت رعایت شده است [۲۷].

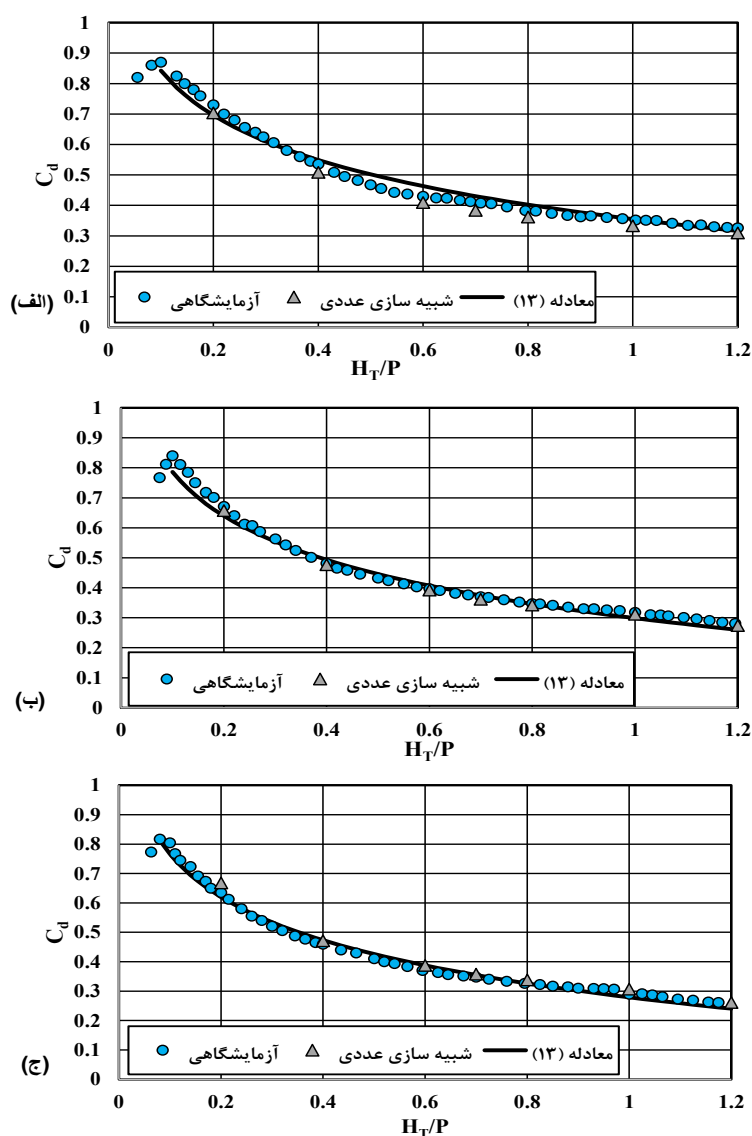
۳-۴- مدل سازی عددی

شبکه بندی مدل با المان های مکعبی صورت گرفت، به این ترتیب که در نواحی شیب دار (رمپ) و در محل سرریز از المان های ریزتری

جدول ۲. مدل‌های شبیه‌سازی سه‌بعدی عددی در تحقیق حاضر

Table 2. Numerical three-dimensional simulation models in the present study

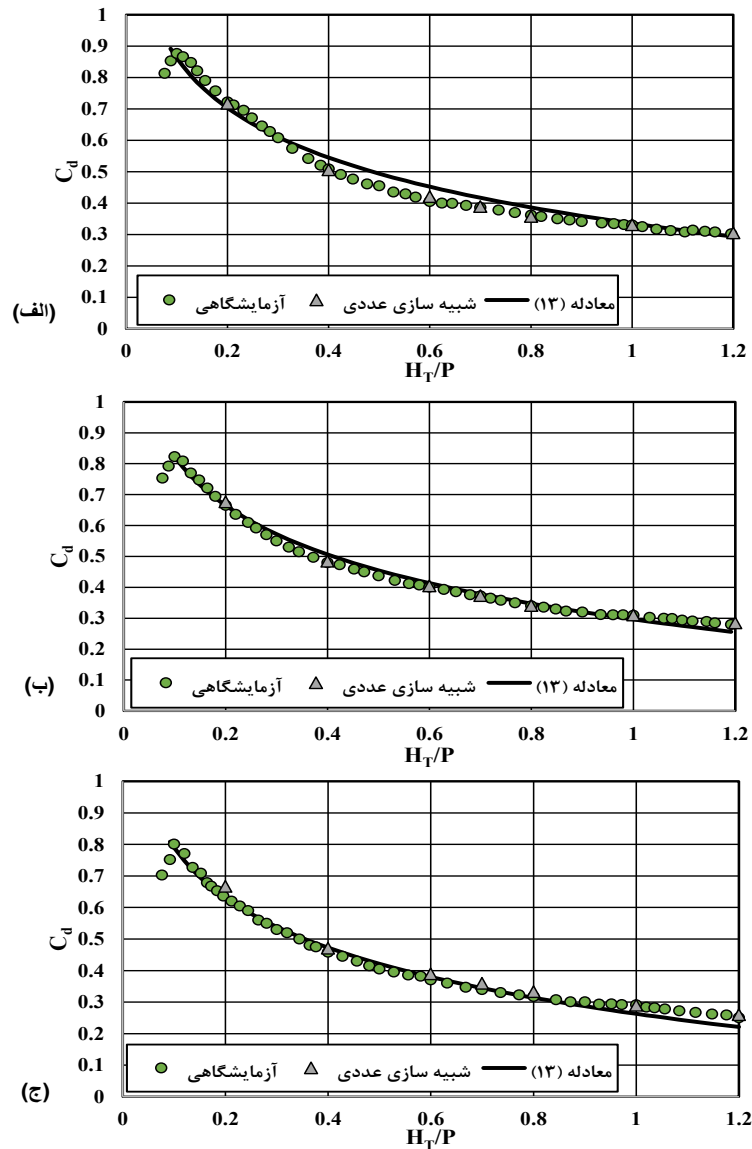
نسبت هد روی سرریز به ارتفاع سرریز (H/P)							طول قوس (LR)	ارتفاع سرریز (P)
۰/۲	۰/۴	۰/۶	۰/۷	۰/۸	۱	۱/۲	۴۰/۸۲	۱۰
۰/۲	۰/۴	۰/۶	۰/۷	۰/۸	۱	۱/۲	۴۵	۱۰
۰/۲	۰/۴	۰/۶	۰/۷	۰/۸	۱	۱/۲	۴۸/۱۰	۱۰
۰/۲	۰/۴	۰/۶	۰/۷	۰/۸	۱	۱/۲	۴۰/۸۲	۱۲/۵
۰/۲	۰/۴	۰/۶	۰/۷	۰/۸	۱	۱/۲	۴۵	۱۲/۵
۰/۲	۰/۴	۰/۶	۰/۷	۰/۸	۱	۱/۲	۴۸/۱۰	۱۲/۵
۰/۲	۰/۴	۰/۶	۰/۷	۰/۸	۱	۱/۲	۴۰/۸۲	۱۵
۰/۲	۰/۴	۰/۶	۰/۷	۰/۸	۱	۱/۲	۴۵	۱۵
۰/۲	۰/۴	۰/۶	۰/۷	۰/۸	۱	۱/۲	۴۸/۱۰	۱۵



شکل ۸. تغییرات ضریب دبی (C_d) با نسبت ارتفاع هد به ارتفاع سرریز (H_T/P) برای طول های قوس های مختلف،

الف) $P=10$, $LR=40.82$ cm (ب) $P=10$, $LR=45$ cm (ج) $P=10$, $LR=48.10$ cm

Fig. 8. varieties in discharge coefficient (C_d) with the ratio of head height to weir height (H_T/P) for different arch lengths, A) $P = 10$, $LR = 40.82$ (cm) b) $P = 10$, $LR = 45$ (cm) c) $P = 10$, $LR = 48.10$ (cm)



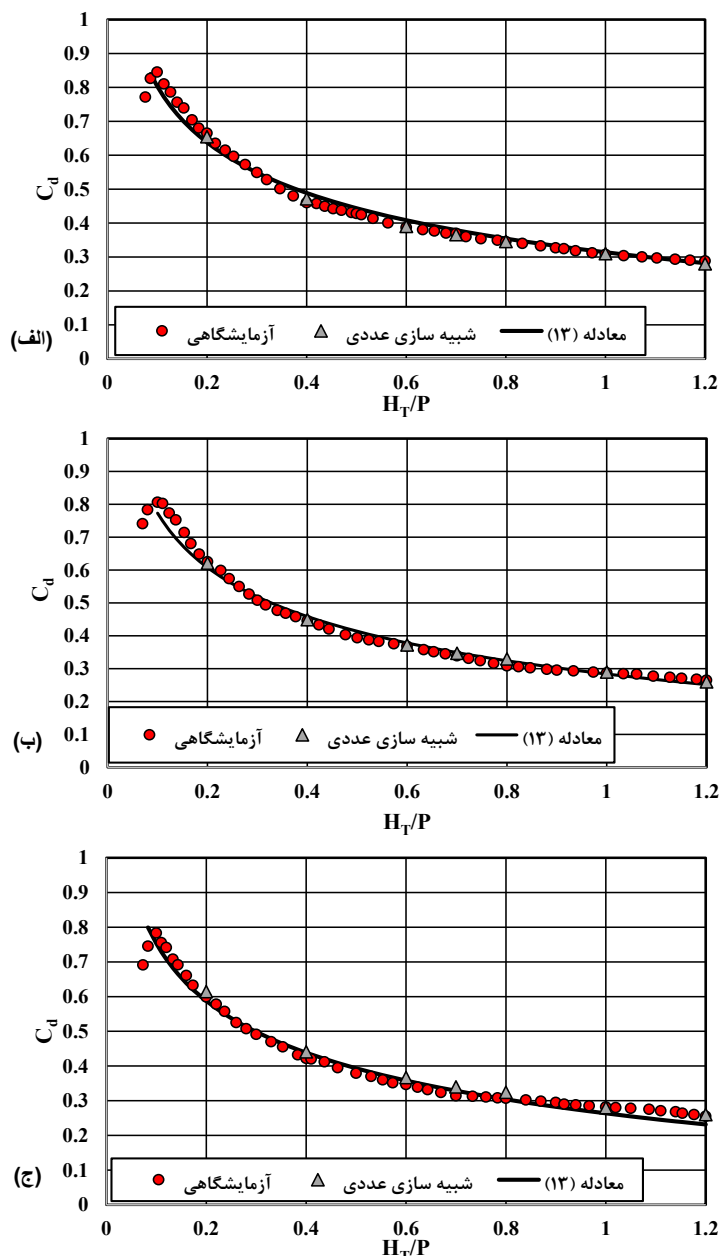
شکل ۹. تغییرات ضریب دبی (Cd) با نسبت ارتفاع هد به ارتفاع سرریز (HT/P) برای طول های قوس های مختلف،
 P=12.5, LR=48.10 cm (ج) P=12.5, LR=45cm (ب) P=12.5, LR=40.82 cm (الف)

Fig. 9. varieties in discharge coefficient (Cd) with the ratio of head height to weir height (HT/P) for different arch lengths, A) P = 12.5, LR = 40.82 (cm) b) P = 12.5, LR = 45 (cm) c) P = 12.5, LR = 48.10 (cm)

کف (Zmin) از شرط مرزی (Outlet) خروجی جریان، در مرز بالای کانال (Zmax) از شرط مرزی (Symmetry) استفاده شده است. در شکل ۶ شرایط مرزی اعمال شده در شبیه سازی سه بعدی جریان قابل مشاهده می باشد.

در این تحقیق برای شبیه سازی آشفتگی از مدل آشفتگی RNG برای بستن معادلات متوسط گیری شده زمانی رینولدز استفاده شده است. در این مدل، یک ترم اضافی در معادله ϵ وارد می شود که باعث افزایش دقت محاسباتی در جریان کرنشی می شود. این مدل

مش تا رسیدن به استقلال شبکه و همگرایی نتایج انجام شد. زمان انجام محاسبات عددی برای هر مدل به طور متوسط ۱۲ ساعت بود. شرایط مرزی شامل شرایط مقطع ورودی، مقطع خروجی، دیواره ها و سطح آزاد جریان است که در ادامه تشریح شده است. در مرز ورودی (Xmin) از شرط مرزی (Pressure) فشار، در مرز خروجی (Xmax) از شرط مرزی (Wall) دیواره، در مرز کناری ابتدای کانال (Ymin) از شرط مرزی (Wall) دیواره، در مرز کناری وسط کانال (Ymax) از شرط مرزی (Symmetry) تقارن، در مرز



شکل ۱۰. تغییرات ضریب دبی (C_d) با نسبت ارتفاع هد به ارتفاع سرریز (H_T/P) برای طول های قوس های مختلف،

الف) $P=15$, $LR=40.82$ cm (ب) $P=15$, $LR=45$ cm (ج) $P=15$, $LR=48.10$ cm

Fig. 10. varieties in discharge coefficient (C_d) with the ratio of head height to weir height (H_T/P) for different arch lengths, A) $P = 15$, $LR = 40.82$ (cm) b) $P = 15$, $LR = 45$ (cm) c) $P = 15$, $LR = 48.10$ (cm)

مطالعه عددی سرریزهای کنگره ای نیم دایره ای از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استفاده کردند [۲۴].

مطابق با شرایط واقعی، سیال آب ویسکوز می باشد. لذا بهره مندی از مدل های آشفتگی برای مدل سازی صحیح لازم می باشد. الگوی RNG دارای سرعت و دقت قابل قبول در مدل سازی آشفتگی جریان می باشد. باید در نظر داشت بهترین مدل آشفتگی مدلی است، که

نسبت به مدل استاندارد، در جریان کرنشی، کارایی بیشتری دارد و برخلاف مدل استاندارد، برای تعیین اعداد آشفتگی پرندها از رابطه تحلیلی استفاده می شود. بدین ترتیب این مدل در اعداد رینولدز پایین دقت مناسبی دارد. به همین دلیل از این مدل در تعیین مقادیر آشفتگی جریان، در میدان های دارای انحنا یا پیچیدگی هندسی، بیشتر استفاده می کنند. همچنین بیلهان و همکاران (۲۰۱۸) برای

در بازه $0.05 \leq H_T/P \leq 1.2$ و سرریزها در ارتفاع های ۱۰، ۱۲/۵ و ۱۵ سانتی متر و همچنین در طول قوس های ۴۵، ۴۰/۸۲ و ۴۸/۱۰ برای سرریزهای U شکل در پلان با شکل تاج لبه تیز می باشد.

هی و تیلور (۱۹۷۰) توصیه کردند در شرایطی که پارامتر H/P بیشتر از ۰/۵ باشد، مقدار L/W نباید از ۴ بزرگ تر باشد، به علاوه اگر نسبت L/W بزرگ تر از ۶ باشد و سرریز برای نسبت H/P بزرگ تر از ۰/۲۵ شود، راندمان سرریز کاهش خواهد یافت. در تحقیق حاضر با توجه به شکل ۱۰-۸ نسبت مقادیر L/W برای طول قوس های ۴۵، ۴۰/۸۲ و ۴۸/۱۰ به ترتیب ۲/۸۱، ۲/۹۴ و ۳/۰۳ می باشد. با توجه به اینکه مقادیر نسبت L/W در تحقیق حاضر تقریباً کمتر از ۳ می باشد، می توان نسبت H/P را برای مقادیر بزرگ تر از ۰/۴ به کار برد.

بهترین نقطه طراحی سرریزهای کنگره ای نقطه پیک نمودار می باشد، چرا که در نقطه پیک به دلیل عدم وجود پارامترهای کاهش راندمان دبی (تداخل جریان، استغراق موضعی) طول موثر تاج حداکثر بوده و دبی در آن نقطه ماکزیمم است. ربوک (۱۹۲۹) بهترین بازه برای طراحی سرریزها را عمق ۴-۵ سانتی متر هد روی سرریز معرفی کرد. بعد از نقطه پیک نمودار با افزایش بار هیدرولیکی روی سرریز، تیغه های عبوری از قوس سرریز به طور مستقیم با هم برخورد کرده و تداخل جریان شکل می گیرد، در اثر این برهم کنش، ناحیه ای از طول تاج اشغال شده و عملاً میزان گذردهی جریان در این ناحیه حداقل می شود. با افزایش هد روی سرریز بعد از تداخل جریان، وجه بالادست سرریز دچار استغراق می شود. در تداخل جریان و استغراق موضعی کاهش سرعت تخلیه جریان با افزایش هد روگذری از سرریز را رخ داده و باعث کاهش راندمان دبی و تغییر مکانیزم عملکرد سرریز از حالت غیرخطی به خطی و از لبه تیز به لبه پهن می شود.

با توجه به شکل های ۹ و ۱۱-الف ملاحظه می شود، با افزایش طول قوس سرریزها، تداخل جریان افزایش و راندمان دبی کاهش می یابد، با اینکه با افزایش یافتن طول قوس سرریزها طول تاج افزایش می یابد ولی افزایش موثر طول تاج محقق نمی شود، بنابراین راندمان دبی متأثر از افزایش تداخل جریان بوده و با افزایش طول قوس سرریزها و سپس افزایش ناحیه تداخل جریان، راندمان آبگذری سرریز روند کاهشی می گیرد.

برای استخراج روابط هد-دبی از آنالیز رگرسیون چند متغیره

نتایج حاصل از استفاده آن در مدل سازی در مرحله صحت سنجی دارای کمترین خطای موجود با نتایج آزمایشگاهی باشد. به خاطر خطای قابل قبول نتایج حاصل از استفاده از الگوی RNG در تمامی مدل ها از این الگو استفاده شده است. با توجه به تجربیات مطالعات پیشین، قابلیت مدل RNG در شبیه سازی جریان های با خطوط جریان فشرده و همچنین کارایی بهتر در کرنش های شدید بالا عملکرد بسیار مطلوبی دارد.

مطالعات انجام شده توسط عباس پور و همکاران (۲۰۱۷) بر روی سرریزهای مثلثی در پلان، نشان دادند که مدل آشفتگی RNG بهترین مدل برای شبیه سازی های عددی می باشد [۲۹].

با توجه به شرایط مرزی و شرایط اولیه در نظر گرفته شده، تحلیل جریان به صورت غیردائمی آغاز می شود و تا رسیدن به حالت دائمی ادامه می یابد [۲۸]. صحت سنجی مدل های عددی مورد تحقیق با کنترل منحنی هد-دبی مطابق شکل ۱۰ و ۹ و ۸، با استفاده از نمودار گرافیکی و فایل متنی مقادیر دبی نرم افزار، انجام شد، به این ترتیب که با یکسان شدن دبی در ورودی و خروجی میدان جریان همگرایی مدل ها تحقق یافت. شکل ۷ صحت نتایج را با توجه دبی در میدان ورودی و خروجی نشان می دهد.

در جدول (۲) مدل های شبیه سازی سه بعدی عددی جریان نشان داده شده است که برای هر مدل فیزیکی سرریز تعداد ۷ مدل عددی در نسبت هد به ارتفاع های متفاوت انجام شده و در ادامه با نتایج شبیه سازی آزمایشگاهی مقایسه شده است.

در تحقیق حاضر از ۹ مدل فیزیکی مطابق جدول ۱ و همچنین ۶۳ شبیه سازی عددی مطابق جدول ۲ استفاده شده است.

۵- بحث و نتایج

۵-۱- استخراج رابطه و آنالیز آماری رابطه پیشنهادی

معادله عمومی (۱) با تعیین پارامتر C_d وابسته به پارامترهای هندسی و هیدرولیکی قابل کاربرد برای سرریزهای کنگره ای می باشد. از بخش آنالیز ابعادی (۱-۴) پارامترهای موثر بر رابطه ضریب دبی $(\mu, \sigma, Q, h, P, L_T, L_R, W)$ در شرایط جریان آزاد با استفاده از آنالیز ابعادی و تئوری پی باکینگهام پارامترهای تاثیرگذار $(h/p, L_R/W)$ به صورت بی بعد برای سرریزهای لبه تیز U شکل در پلان تعیین گردید. در این تحقیق برای تعیین روابط هد-دبی، داده ها

جدول ۳. ضرایب کالیبره شده برای سرریزهای با طول قوس های متفاوت برای رابطه (۱۳)

Table 3. Calibrated coefficients for weirs with different arch lengths for equation (13)

ارتفاع سرریز	طول قوس (L _R)	a	b	c	d	e
۱۰	۴۰/۸۲	-۷۰/۷۸۳	۰/۰۰۳	۰/۵۷۴	-۸/۰۸۳	۷۱/۰۳۵
	۴۵					
۱۲/۵	۴۸/۱۰	-۴۸۶/۸۶۴	۰/۰۰۰۴۷	-۶۵/۷۴۲	۰/۰۰۶	۵۵۳/۰۲۵
	۴۰/۸۲					
۱۵	۴۸/۱۰	۱/۱۸۶	-۰/۱۵	۰/۳۲۶	-۶/۹۷۷	-۰/۹۴۶
	۴۰/۸۲					
	۴۸/۱۰					

جدول ۴. روابط معیارهای ارزیابی مورد استفاده

Table 4. Relationships of evaluation criteria used

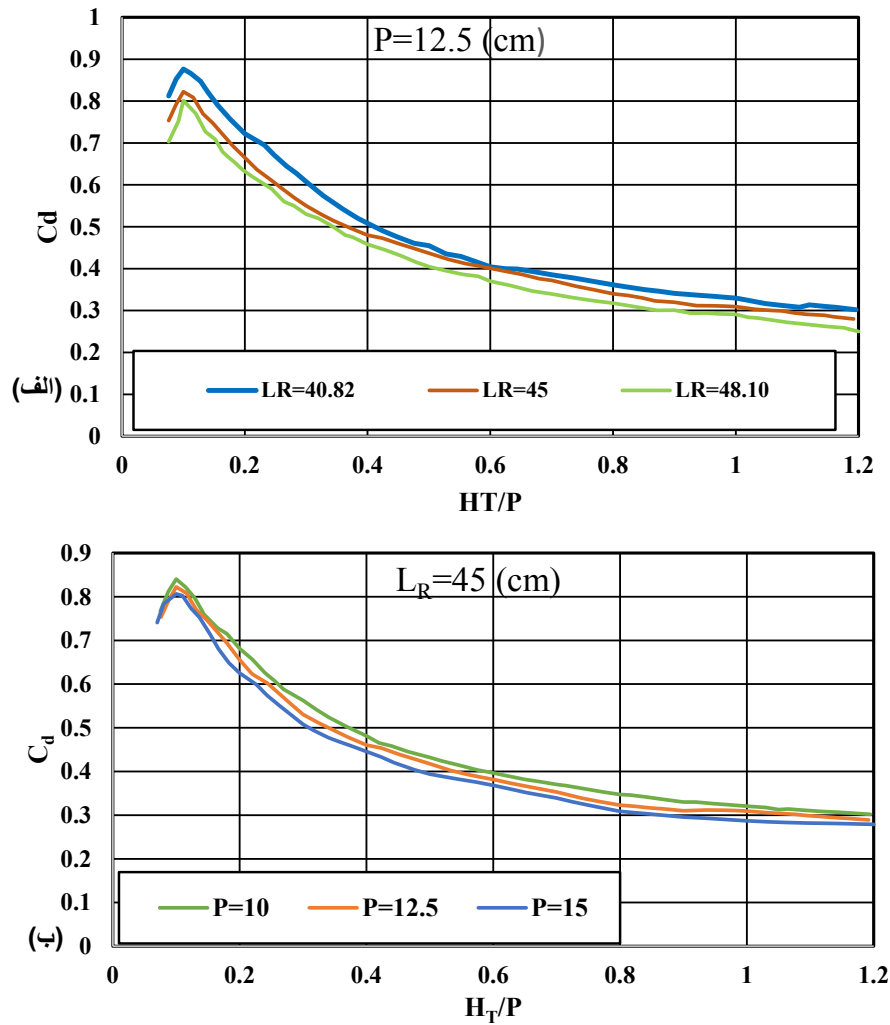
پارامترهای آماری	روابط
ضریب همبستگی	$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (Cd_{observed} - \bar{Cd}_{observed}) - (Cd_{estimated} - \bar{Cd}_{estimated}) \right]^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Cd_{observed} - \bar{Cd}_{observed})^2 \sum_{i=1}^n (Cd_{estimated} - \bar{Cd}_{estimated})^2}}$
درصد میانگین مطلق خطا	$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{ Cd_{observed} - Cd_{estimated} }{Cd_{estimated}}$
جذر میانگین مربعات خطا	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Cd_{observed} - Cd_{estimated})^2}$
میانگین درصد خطای نسبی	$MREP = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left \frac{Cd_{observed} - Cd_{estimated}}{Cd_{observed}} \right $
میانگین قدر مطلق خطا	$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Cd_{estimated} - Cd_{observed} $
درصد خطا	$\% \delta = \frac{\sum_{i=1}^N Cd_{estimated} - Cd_{observed} }{\sum_{i=1}^N Cd_{estimated}} * 100$

هر سرریز ارائه و مقایسه شده، که دارای دقت بسیار خوبی می باشد. مطابق نظر محققان پیشین، توصیه بازه طراحی در تحقیق حاضر و همچنین رابطه پیشنهادی تخمین دبی عبوری از روی سرریز، نقطه بعد از پیک نمودار هد-دبی تا نسبت هد به ارتفاع ۱/۲ می باشد.

$$C_d = a \left(\frac{h}{p} \right)^b + c \left(\frac{L_R}{W} \right)^d + e \quad (13)$$

رابطه (۱۳) ضریب دبی سرریزهای لبه تیز U شکل در پلان را

غیرخطی نتایج آزمایشگاهی با استفاده از نرم افزار SPSS استفاده شده است (SPSS Version ۲۳). رابطه (۱۳) با استفاده از داده های آزمایشگاهی تحقیق حاضر که در شکل ۸-۱۰ قابل مشاهده است، برای سرریزهای لبه تیز U شکل در پلان به دست آمده است. بدین ترتیب که حدود ۸۰ درصد از داده های آزمایشگاهی برای استخراج معادله به طور تصادفی انتخاب و برای برازش رابطه استفاده گردید و از ۲۰ درصد باقی مانده برای واسنجی رابطه به کار برده شد. در شکل ۸-۱۰ علاوه بر داده های آزمایشگاهی، روابط تعریف شده برای



شکل ۱۱. مقایسه عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کنگره ای U شکل الف) ارتفاع سرریز ثابت ۱۲/۵ سانتی متر و طول قوس متغیر ب) طول قوس ثابت ۴۵ سانتی متر و ارتفاع متغیر

Fig. 11. Comparison of the hydraulic performance of U-shaped weirs A) constant weir height 12.5 cm and variable arch length b) constant arch length 45 cm and variable height

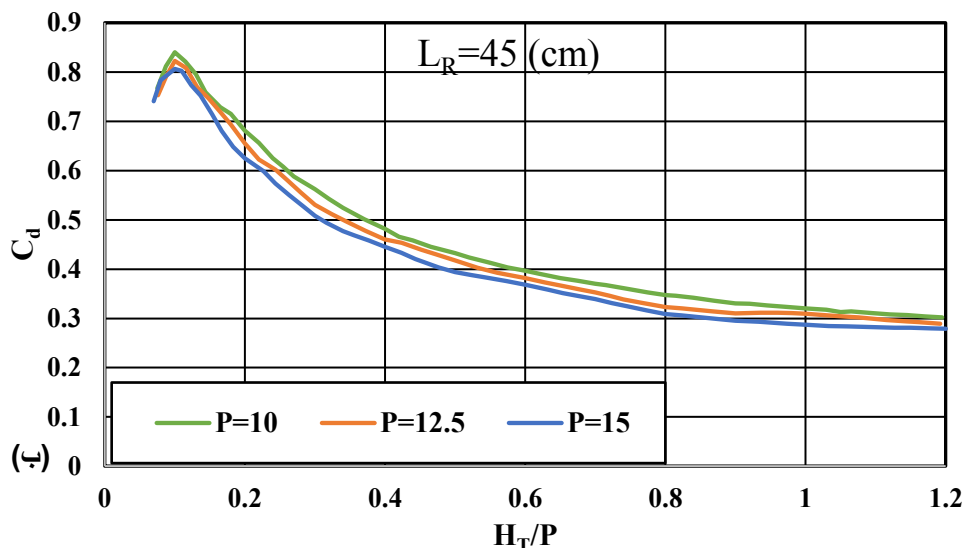
میانگین قدرمطلق خطا و (δ) درصد خطا استفاده گردیده است. هر چه مقدار (R) به یک نزدیک تر و مقدار $(RMSE)$ برای یک مدل کوچکتر باشد به معنی مطلوب بودن آن مدل می باشد. روابط معیارهای ارزیابی به صورت پارامتر آماری برای داده های آزمایشگاهی و محاسباتی، در جدول ۴ آورده شده است.

$\overline{C_{d_{observed}}}$: ضریب دبی اندازه گیری شده، $\overline{C_{d_{observed}}}$
 : متوسط ضریب دبی اندازه گیری شده، $Lp \cdot C_{d_{estimated}}$: ضریب دبی پیش بینی شده، $\overline{C_{d_{estimated}}}$: متوسط ضریب دبی پیش بینی شده، N : تعداد داده ها می باشد.

از شکل ۱۱-الف می توان نتیجه گرفت که با افزایش طول

در ظاهر فقط به پارامتر h/p و L_R/W مرتبط کرده است، اما با توجه به جدول ۳، ضرایب ثابت برای هر ارتفاعی از سرریز متغیر بوده و به عبارت دیگر توابعی از ارتفاع و طول قوس سرریزها می باشند. برای تعیین رابطه جامع، این ضرایب بر حسب ارتفاع و طول قوس سرریز به صورت زیر استخراج شده اند:

به منظور ارزیابی و بررسی کارایی روش های به کار رفته در این تحقیق از ۶ معیار ارزیابی مدل (R^2) ضریب همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و پیش بینی، $(MAPE)$ درصد میانگین مطلق خطا، $(RMSE)$ جذر میانگین مربعات خطاها، $(MAPE)$ جذر میانگین مربعات خطا، $(MREP)$ میانگین درصد خطای نسبی، (MAE)



شکل ۱۲. مقایسه ضریب دبی نتایج آزمایشگاهی و محاسبه شده با استفاده از رابطه (۱۳)

Fig. 12. Comparison of discharge coefficient of experimental results and calculated using relation (13)

جدول ۵. آنالیز خطاهای آماری نتایج داده های آزمایشگاهی و محاسبه شده برای سرریزهای با ارتفاع های متفاوت

Table 5. Statistical error analysis of experimental data and calculated data for weirs with different heights

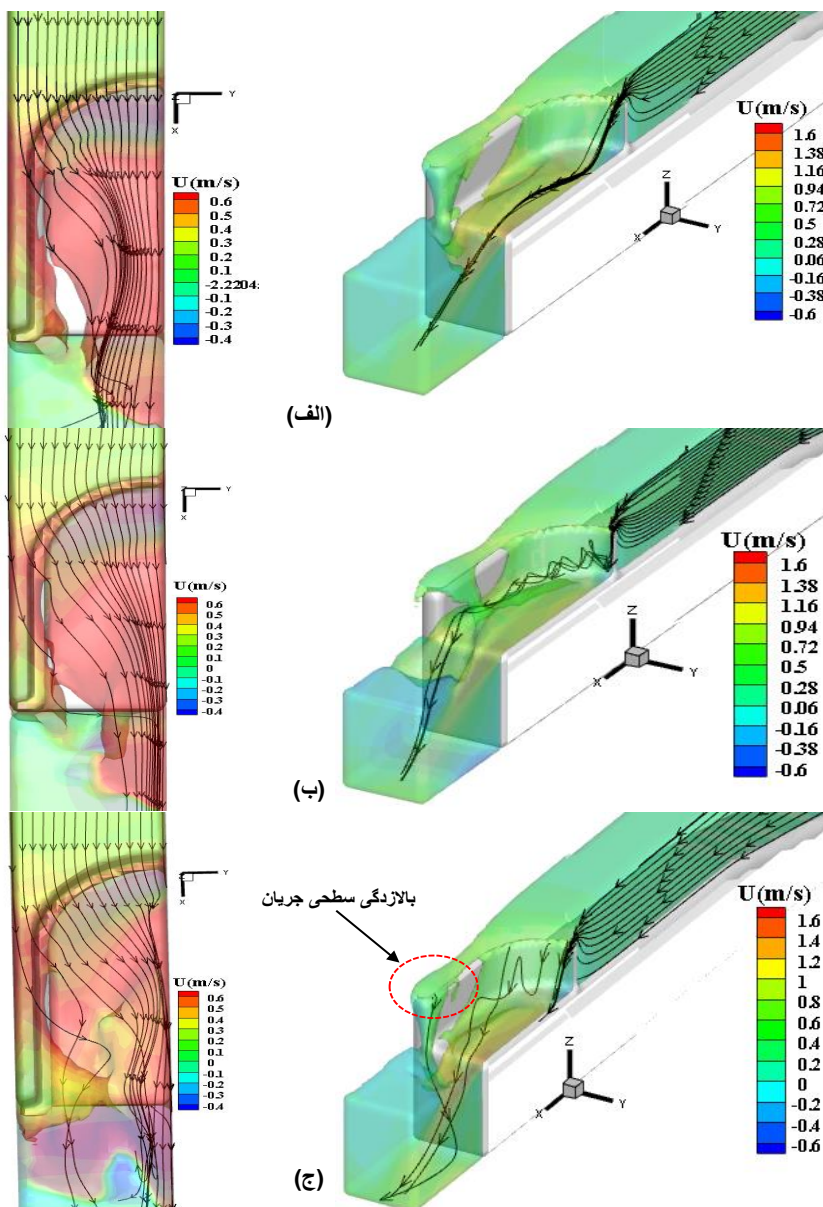
(cm) (P)	R ²	MAPE	RMSE	MREP	MAE	δ (%)
۱۰	۰/۹۷۹	۰/۰۰۶۰۵	۰/۰۵۲۲	۰/۴۶۹۸	۰/۰۰۴۲۸	۴/۹۲۱
۱۲/۵	۰/۹۷۵	۰/۰۰۰۱۴	۰/۰۸۸۸	۰/۴۶۲۸	۰/۰۰۷۲۵	۶/۵۲۱
۱۵	۰/۹۸۶	۰/۰۰۰۸۸	۰/۰۰۷۳	۰/۴۴۱۴	۰/۰۰۰۵۹	۲/۹۳۳
کلی	-	۰/۰۱۷۰۳	۰/۰۰۰۸	۰/۴۶۱۶	۰/۰۰۰۸۰	۴/۷۹۱

با ثابت بودن طول قوس و متغیر در نظر گرفتن ارتفاع سرریزها مطابق شکل ۱۱-ب مشاهده می گردد که با افزایش ارتفاع سرریزها راندمان آبگذری کاهش می یابد. با مقایسه دو حالت افزایش یافتن طول قوس و افزایش یافتن ارتفاع سرریزها می توان اظهار کرد که حساسیت بیشتر در سرریزهای لبه تیز U شکل در پلان در عملکرد هیدرولیکی (راندمان آبگذری) در حالت افزایش طول قوس می باشد. با ملاحظه شکل ۱۱-ب می توان چنین نتیجه گرفت که در هدهای بسیار پایین $H_T/P \geq 0.1$ و همچنین $H_T/P \leq 1$ راندمان آبگذری سرریز در ارتفاع های متغیر تقریباً یکسان می باشد.

با افزایش طول قوس سرریزها مطابق شکل ۱۱-الف از $40/82$ به 45 در ارتفاع های سرریز $12/5$ و 15 سانتی متر راندمان آبگذری به ترتیب $7/32$ ، $7/53$ و $6/18$ درصد کاهش، یعنی در حالت کلی

قوس انتظار افزایش راندمان نداشته و باید طول قوس های مختلف مورد آزمایش قرار گیرد. همچنین می توان بیان کرد که حساسیت سرریزهای کناره ای لبه تیز U شکل در پلان نسبت به تداخل جریان بیشتر از افزایش طول قوس می باشد و با افزایش طول قوس این حساسیت افزایش می یابد. بنابراین می توان اظهار داشت که تاثیر پارامترهای هندسی شامل طول قوس سرریز موثرتر از پارامترهای هیدرولیکی همچون تداخل جریان و استغراق موضعی بر نرخ کاهش یا افزایش راندمان دبی است.

از شکل ۱۱ می توان نتیجه گرفت که با افزایش طول قوس سرریز در ارتفاع ثابت، در بازه $0.8 \leq H_T/P \leq 1.2$ تغییرات کاهشی در نمودار هد-دبی به حداقل رسیده و از $H_T/P = 1$ بازه سرریزها عملکرد تقریباً خطی (سرریز لبه پهن) دارند.

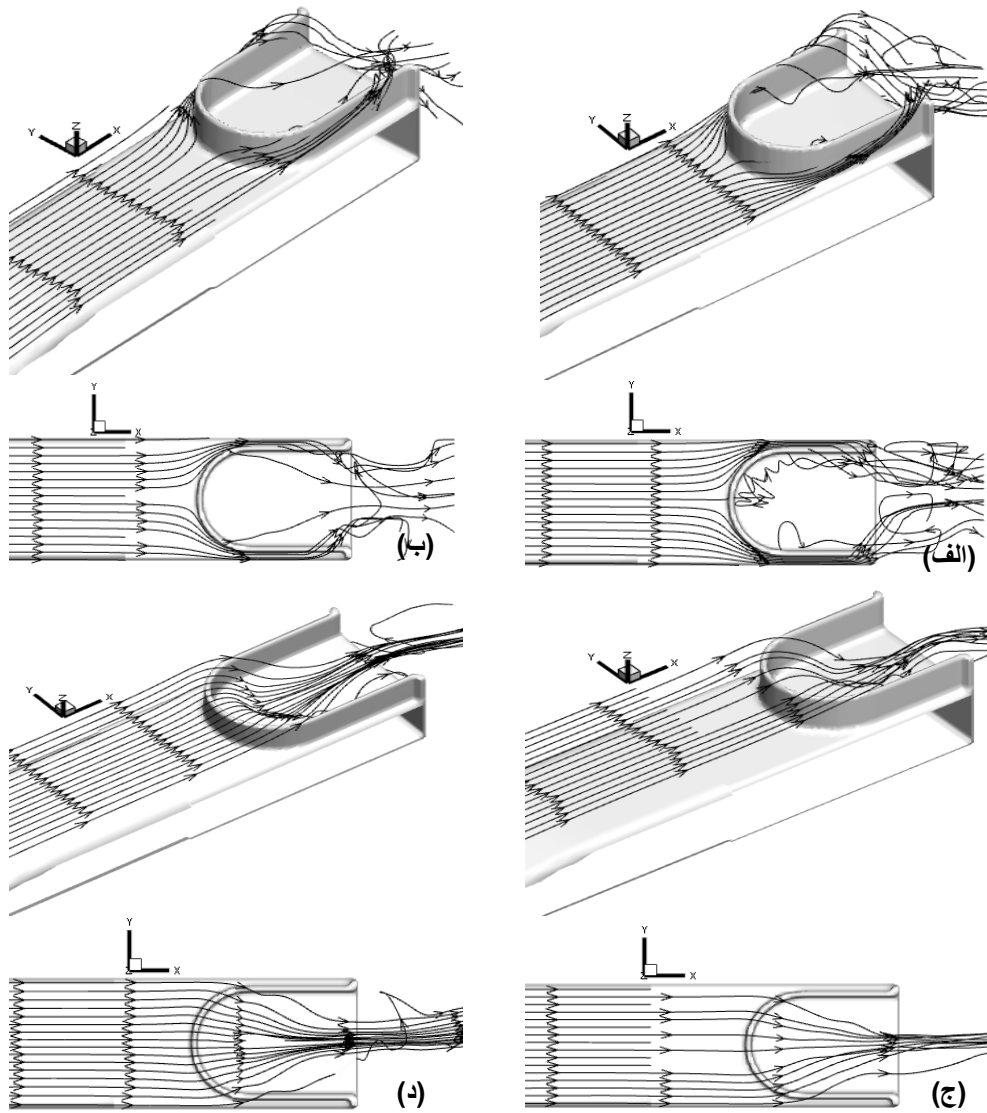


شکل ۱۳. خطوط جریان و کانتور توزیع سرعت حول سرریز به ازای طول قوس هاس متفاوت، الف) $H/P=0.4$ و $P=12.5$, $LR=40.82$ cm و ب) $H/P=0.4$ و $P=12.5$, $LR=48.10$ cm ج) $H/P=0.4$ و $P=12.5$, $LR=45$ cm

Fig. 13. streamlines and velocities distribution around the weir for different arch lengths, A) $P = 12.5$, $LR = 40.82$ (cm) and $H/P = 0.4$ b) $P = 12.5$, $LR = 45$ (cm) and $H/P = 0.4$ c) $P = 12.5$, $LR = 48.10$ (cm) and $H/P = 0.4$

و در طول قوس های ۴۵، ۴۰/۸۲ و ۴۸/۱۰ سانتی متر به ترتیب راندمان آبگذری ۲/۵۴، ۴/۰۱ و ۱/۷۳ درصد کاهش، و در حالت کلی نیز به طور میانگین با توجه به تعداد یکسان فراوانی داده ها، ۲/۷۶ درصد کاهش می یابد. همچنین با افزایش ارتفاع سرریزها مطابق شکل ۱۱-ب از ۱۲/۵ به ۱۵ و در طول قوس های ۴۵، ۴۰/۸۲ و ۴۸/۱۰ سانتی متر به ترتیب راندمان آبگذری ۴/۶، ۱/۲ و ۴/۸۲ درصد کاهش، در حالت کلی و به طور میانگین ۳/۵۴ درصد کاهش راندمان

با توجه به یکسان بودن فراوانی داده ها به لحاظ آماری، راندمان آبگذری در این حالت به طور میانگین ۷/۰۱ درصد کاهش را نشان می دهد. و همچنین با افزایش طول قوس سرریزها از ۴۵ به ۴۸/۱۰ در ارتفاع سرریز ۱۰، ۱۲/۵ و ۱۵ سانتی متر راندمان آبگذری به ترتیب ۲/۰۶۹، ۲/۵۲ و ۴/۶۹ درصد کاهش، همچنین در این حالت نیز به طور میانگین راندمان آبگذری ۳/۰۹ درصد کاهش می یابد. با افزایش ارتفاع سرریزها مطابق شکل ۱۱-ب از ۱۰ به ۱۲/۵



شکل ۱۴. خطوط جریان در لایه‌های تحتانی و سطحی سرریز به ازای ارتفاع سرریز ۱۵ سانتی متر و نسبت هد به ارتفاع سرریز ۰/۴ (الف) خطوط لایه تحتانی، (ب) LR=48.10 cm خطوط لایه تحتانی، (ج) LR=40.82 cm خطوط لایه سطحی، (د) LR=48.10 cm خطوط لایه سطحی، (ه) LR=40.82 cm خطوط لایه سطحی، (و) LR=48.10 cm خطوط لایه سطحی

Fig. 14. streamlines in the lower and surface layers of the weir for the weir height 15 cm and the ratio of head to the height of the weir, 0.4 A) Bottom layer lines, LR = 48.10 (cm) b) Bottom layer lines, LR = 40.82 (cm) c) Surface layer lines, LR = 48.10 (cm) d) Surface layer lines, LR = 40.82 (cm)

آنالیز آماری ارائه شده حاصل از نتایج آزمایشگاهی شکل‌های ۱۰-۸ و همچنین رابطه پیشنهادی (۱۳) در جدول ۵ نشان می‌دهد درصد خطای بین مقادیر آزمایشگاهی و محاسبه شده دارای حداکثر مقدار ۶/۵۲، حداقل مقدار ۲/۹۳ درصد و خطای میانگین سرریزها ۴/۷۹ درصد می‌باشد که در مقایسه با سرریزهای لبه تیز مثلثی در پلان که توسط کومار و همکاران (۲۰۱۱) ارائه شده دارای دقت قابل ملاحظه‌ای در آنالیز آماری ارائه شده در تحقیق حاضر می‌باشد.

آبگذری را نشان می‌دهد. به منظور ارزیابی کمی رابطه تحلیلی استخراج شده، مقادیر ضریب دبی حاصل از داده‌های آزمایشگاهی (مقادیر واقعی) شکل ۱۲، در مقابل داده‌های حاصل از رابطه تحلیلی رابطه (۱۳)، مطابق شکل ۱۲ مقایسه شده است. با توجه به شکل، تمامی داده‌ها در محدوده $\pm 6\%$ خطا می‌باشند که نشانگر دقت بسیار بالای رابطه استخراج شده می‌باشد.

شکل های ۱۳-ب و ج سمت چپ خطوط جریان در روی سرریز دچار انحراف می شوند، این انحراف خطوط جریان باعث برخورد لایه های روی سرریز و باعث ایجاد تداخل جریان می شوند که راندمان دبی را کاهش می دهد. علاوه بر این در شکل های ۱۳-ب و ج سمت چپ برخلاف شکل ۱۳-الف سمت چپ، در پشت سرریز تابیدگی خطوط جریان و اغتشاش لایه های جریان مشاهده می شود که با افزایش بار آبی روی سرریز باعث می شود که مقطع کنترل به سمت بالادست حرکت کرده و بر مومنتم جریان روی سرریز تاثیر گذاشته و راندمان آبگذری روی سرریز را کاهش دهد.

با توجه به تصاویر مربوط به لایه تحتانی شکل ۱۴-الف خطوط جریان نزدیک شونده به سرریز پس از برخورد به دیوار قائم، به دو بخش تقسیم شده و وارد بخش های کناری (ساق ها) سرریز در دو طرف می گردند، به واسطه ی تاثیر دیواره قائم تاج قسمت مستقیم در ممانعت از جریان های تحتانی و ایجاد گرادیان فشار مثبت در بخش های کناری، خطوط جریان از بستر کانال جدا شده و از گوشه تاج کناره های سرریز (محل تلاقی تاج های کناری و دیواره کانال) عبور می کند. تاثیر دیواره قائم در انحراف خطوط جریان از مسیر مستقیم به کناره های سرریز و جدایی جریان های تحتانی از بستر کانال در شکل ۱۴-الف به خوبی قابل مشاهده است. در مقاطع وسطی با افزایش هد روی سرریز، کاهش انقباض خطوط جریان و کاهش افت هد رخ می دهد. توزیع فشار بر روی تاج ریزشی جریان سرریز لبه تیز حالت غیرخطی داشته و متناسب با تغییر گرادیان سرعت می باشد. همچنین در این مقطع، لایه های نزدیک کف به سمت کناره های (ساق ها) سرریز منحرف شده و از قسمت انتهایی تاج کناری، سرریز می شود.

در محل ریزش جریان در کناره ها فشردگی شدید خطوط جریان باعث بالازدگی سطحی جریان شکل ۱۳-ج می شود. با حرکت به سمت پایین دست و بعد از عبور از روی سرریز در پایین دست، خطوط جریان ضمن دور شدن از دیواره تاج کناری به سمت بخش میانی کانال منحرف شده و حالت یکنواخت تری به خود می گیرد. در پایین دست خطوط جریان فاصله قابل توجهی با هم دارند، بنابراین تداخل جریان تشکیل نمی شود.

در لایه سطحی کاهش انقباض خطوط جریان نزدیک شونده باعث توزیع بهتر جریان بر روی لبه های کناری سرریز شده و تمرکز جریان

مقدار ضریب همبستگی R^2 رابطه پیشنهادی مطابق جدول ۵، به ترتیب ۰/۹۷۹، ۰/۹۷۵ و ۰/۹۸۶ می باشد. در رگرسیون چند متغیره غیرخطی، R^2 معیار مناسبی جهت ارزیابی دقت روابط نمی باشد، در این تحقیق با برازش رگرسیون و انتخاب حداکثر R^2 مطابق شکل ۱۲ تکرارپذیری و مقایسه ضریب دبی آزمایشگاهی و محاسبه شده از روابط پیشنهادی قابل استناد و ارزیابی می باشد.

۵-۲- تحلیل هیدرودینامیکی پارامترهای موثر بر ضریب دبی

با توجه به شکل ۱۳ در نسبت هد به ارتفاع ۰/۴ الگوی جریان ریزشی می باشد، به این صورت که در نقاط با مومنتم بالا الگوی ریزشی و در نقاط با مومنتم پایین از الگوی لغزشی تبعیت می کند، در این حالت هواگیری پشت سرریز مشاهده می شود. با نظر به اینکه در نسبت هد به ارتفاع ۰/۴ از نقطه پیک نمودار مطابق شکل ۸ عبور کرده، بنابراین دو عامل ویسکوزیته و کشش سطحی تاثیر در ایجاد مقاومت جریان ندارند.

با افزایش نسبت هد به ارتفاع سرریز، جدایی جریان رخ می دهد و الگوی جریان به حالت کاملاً ریزشی تقلیل می یابد. شروع ناحیه جریان چرخشی با مثبت شدن گرادیان فشار و کاهش سرعت تیغه آبی در پشت سرریز، جریان چرخشی شکل می گیرد.

با افزایش بار هیدرولیکی، مومنتم تیغه جریان عبوری از روی سرریز باعث جدا کردن تیغه جریان از بدنه سرریز می گردد. با جدایی جریان این دو از یکدیگر و ورود هوا بین آن ها، مرحله هواگیری سرریز آغاز می گردد. هواگیری جریان باعث از بین رفتن نوسانات تیغه جریان می گردد. با توجه به شکل ۱۳-الف خطوط جریان در راستای عمود (شکل راست) دارای نظم و انقباض جریان در روی سرریز می باشد، به واسطه نظم در خطوط جریان ائتلاف انرژی به حداقل رسیده و راندمان هیدرولیکی (ضریب دبی) بیشینه مقدار می باشد. اما در شکل ۱۳-ب سمت راست انقباض خطوط جریان و اغتشاش پشت سرریز، تنها عامل کاهش راندمان می باشد. همچنین در شکل (ج-سمت راست) تابیدگی در طول تاج سرریز مشاهده می شود، که این تابیدگی از تمرکز جریان روی کاسته و انقباض خطوط جریان روی سرریز را کاهش می دهد.

همانطور که از شکل ۱۳-الف سمت چپ، مشاهده می شود خطوط جریان در طول تاج سرریز بدون انحراف عبور می کنند، اما در

• با افزایش طول قوس سرریزها، تداخل جریان افزایش و راندمان دبی کاهش می یابد، با اینکه با افزایش یافتن طول قوس سرریزها طول تاج افزایش می یابد ولی افزایش موثر طول تاج محقق نمی شود، بنابراین راندمان دبی متأثر از افزایش تداخل جریان بوده و با افزایش طول قوس سرریزها و سپس افزایش ناحیه تداخل جریان، راندمان آبگذری سرریز روند کاهشی می گیرد. حداکثر کاهش راندمان آبگذری در این حالت ۷/۰۱ درصد می باشد.

• با ثابت بودن طول قوس و متغیر در نظر گرفتن ارتفاع سرریزها مشاهده گردید که با افزایش ارتفاع سرریزها راندمان آبگذری کاهش می یابد. با مقایسه دو حالت افزایش یافتن طول قوس و افزایش یافتن ارتفاع سرریزها می توان اظهار کرد که حساسیت بیشتر در سرریزهای لبه تیز U شکل در پلان در عملکرد هیدرولیکی (راندمان آبگذری) در حالت افزایش طول قوس می باشد.

• حساسیت سرریزهای کنگره ای لبه تیز U شکل در پلان نسبت به تداخل جریان بیشتر از افزایش طول قوس می باشد و با افزایش طول قوس این حساسیت افزایش می یابد.

• با افزایش بار آبی روی سرریز باعث می شود که مقطع کنترل به سمت بالادست حرکت کرده و بر مومنتم جریان روی سرریز تاثیر گذاشته و راندمان آبگذری روی سرریز را کاهش دهد همچنین با افزایش بار آبی اغتشاشات می تواند بر جریان بالادست تاثیر گذاشته و میزان آبگذری را کاهش دهد.

• شبیه سازی سه بعدی جریان به صورت مدل عددی به خوبی قادر به پیش بینی نمودار هد-دبی سرریزها بوده، همچنین تحلیل های هیدرولیکی با توجه به حجم اطلاعات خروجی از نرم افزار میسر می باشد که در تحقیق های آینده ارائه خواهد شد.

تقدیر و قدردانی

بدین وسیله از همکاری صمیمانه معاونت پژوهشی و مسئولین آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تبریز کمال تشکر را داریم. همچنین علاقمندان در این زمینه می توانند به بررسی سرریزهای کنگره ای لبه تیز U شکل با و بدون کاربرد شکننده تداخل جریان (قطعات فولادی نصب شده در تاج سرریز، به کار برده شده در مطالعه بیلهان و همکاران، ۲۰۱۸) بپردازند.

خروجی روی قسمت های انتهایی لبه های کناری سرریز را کاهش داده که منجر به توزیع یکنواخت موضعی جریان خروجی می شود. جریان گذرنده از کناره های سرریز تمایل به حرکت در بخش میانی پایاب و جریان گذرنده از دماغه سرریز به بخش های کناری پایین دست دارند. تنها در هدهای پایین روی سرریز به دلیل هدایت جریان های کناری و مستقیم به مرکز کانال اغتشاشات شدیدی در پایین دست سرریز مشاهده می شود. با افزایش بار آبی اغتشاشات می تواند بر جریان بالادست تاثیر گذاشته و میزان آبگذری را کاهش دهد.

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش سرریزهای لبه تیز U شکل در پلان با هندسه تعریف شده در جدول ۱ در شرایط جریان آزاد به صورت فیزیکی و عددی بررسی شده و در نهایت روابط توسعه یافته برای این تحقیق با استفاده از آنالیز پی باکینگهام پارامترهای بی بعد برای پیش بینی ضریب دبی در حالت جریان آزاد سرریزهای لبه تیز U شکل در پلان ارائه شد. روابط پیشنهاد شده با نتایج آزمایشگاهی تحقیق حاضر به صورت آنالیز آماری مورد ارزیابی قرار گرفت. خلاصه نتایج تحقیق حاضر به شرح ذیل می باشد:

• در حالت جریان آزاد در تحقیق حاضر، آنالیز ابعادی انجام شده به روش پی باکینگهام نسبت $L_R/W, h/p$ مهم ترین و موثرترین پارامتر و مطابق مطالعات پیشین، h/p پارامتر موثر در آنالیز طراحی سرریزهای کنگره ای می باشد، که وابسته به پارامترهای هیدرولیکی و هندسی مدل های مورد پژوهش است. با در نظر گرفتن این پارامتر در طراحی و همچنین بررسی عملکرد راندمان هیدرولیکی در سرریزهای کنگره ای، نتایج دقیق و قابل اطمینان حاصل می شود. بنابراین لحاظ این پارامتر در طراحی و بررسی عملکرد بهینه سرریزهای کنگره ای حائز اهمیت بوده و برای کاربرد توصیه می گردد.

• روابط ضریب دبی پیشنهاد شده (معادله ۱۳) از نظر دقت و کارایی دارای قابلیت خوبی برخوردار بوده و دارای میانگین خطای بین نتایج آزمایشگاهی و عددی ۴/۷۹ درصد می باشد. همچنین بازه طراحی روابط پیشنهادی $0,1 \leq H_p/P \leq 1,2$ بوده که در مقایسه با مطالعات پیشین بازه طراحی وسیع تر گردیده است.

- [6] N. Hay and G. Taylor, Performance and Design of Labyrinth Weirs, J. the Hydraulics Division. vol. 1970.96 (11): p. 2337-2357.
- [7] H. Indelkofer and G. Rouve, Discharge over Polygonal Weirs, J. the Hydraulics Division. 101 ASCE 11178 Proc, 1975.
- [8] A.P. de Magalhães, Labyrinth Weir Spillway, Transactions of the 15th Congress ICOLD. 1985. 6: p. 395-407.
- [9] A.P. de Magalhães and M. Lorena, Hydraulic Design of Labyrinth Weirs, 1989.
- [10] L.A. Darvas, Performance and Design of Labyrinth Weir, J. the Hydraulics Division. 1971. 97(8): p. 1246-1251.
- [11] J.P. Tullis, N. Amanian, and D. Waldron, Design of Labyrinth Spillways, J. Hydraulic Eng., 1995.121 (3): p. 247-255.
- [12] P.R. Wormleaton and C.C. Tsang, Aeration Performance of Rectangular Planform Labyrinth Weirs, J. Environmental Eng., 2000. 126(5): p. 456-465.
- [13] M. Heidarpour, S.F. Mousavi, A.R. Roshanimehr, Investigation of Polyhedron Weirs with Rectangular Plan and U-Shaped, (in Persian), J. of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, 2007. 3(A): P. 1-11.
- [14] M. Ghodsian, Stage-Discharge Relationship for a Triangular Labyrinth Spillway, in Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management., 2009.
- [15] B. Khode and A. Tembhurkar, Evaluation and Analysis of Crest Coefficient for Labyrinth Weir, World Applied Sciences Journal. 2010.11 (7): p. 835-839.
- [16] B. Khode, Determination of Crest Coefficient for Flow over Trapezoidal Labyrinth Weir, World Applied Sciences Journal. 2011.12 (3): p. 324-329.
- [17] S. Kumar, Z. Ahmad, and T. Mansoor, A New Approach to Improve the Discharging Capacity of Sharp-Crested Triangular Plan form Weirs, Flow Measurement and Instrumentation. 2011.22 (3): p. 175-180.
- [18] C. Di Stefano and V. Ferro, A New Approach for Deducing the Stage-Discharge Relationship of Triangular in Plan Sharp-Crested Weirs, Flow Measurement and Instrumentation. 2013. 32: p. 71-75.
- [19] F.G. Carollo, V. Ferro, and V. Pampalone, Testing the

فهرست علائم

علائم انگلیسی

- C_d ضریب دبی
- g گشتاب ثقل، m/s^2
- H_T تراز آبی روی سرریز، m
- L_c طول موثر سرریز، m
- L_R طول قوس، m
- L_t طول کل سرریز، m
- N طول گوشواره، m
- P ارتفاع سرریز، m
- Q دبی جریان ورودی، lit/s
- R_e عدد رینولدز
- t_w ضخامت دیواره سرریز، m
- W عرض کانال یا عرض سرریز، m
- W_e عدد وبر، m

علائم یونانی

- ρ دانسیته سیال، kg/m^3
- μ ویسکوزیته دینامیکی سیال، $pa.s$
- σ کشش سطحی سیال

مراجع

- [1] Crookston, B.M., Tullis, B.P., 2012. Discharge Efficiency of Reservoir-Application-Specific Labyrinth Weirs. J. Irrig. Drain. Eng., 138:564-568.
- [2] B. Crookston and B. Tullis, Hydraulic Design and Analysis of Labyrinth Weirs. I: Discharge Relationships, J. Irrigation and Drainage Eng. 2013.139 (5): p. 363-370.
- [3] W.H. Hager, M. Pfister, and B.P. Tullis, Labyrinth Weirs: Development until 1985, in E-Proceedings of the 36th IAHR World Congress., 2015.
- [4] B. Gentilini, Stramazzi con Cresta a Pianta Obliqua ea Zig-Zag, 1940: Società Editrice Riviste Industrie Elettriche.
- [5] B. Gentilini, Efflusso Dalle Luci Soggiacenti Alle Paratoie Piane Inclinate ea Settore,. Società Editrice Riviste Industrie Elettriche., 1941.

- 144(6): p. 04018007.
- [25] A. Safarzadeh, and S. Abbasi, Convergence of Flow Layers at the Downstream of Trapezoidal Labyrinth Weir under a 15 degree Angle, in: 3th International Conf. on Applied Researches in Structural Eng, and Construction Management. Sharif University of Tachnology., Iran, 2019.
- [26] A. Ghaderi, R. Daneshfaraz, J. Abraham, and M.A. Torabi, Effect of Different Channels on Discharge Coefficient of Labyrinth Weirs, *J. Teknik Dergi.*, 2020.32 (4).
- [27] H.T. Falvey, Hydraulic Design of Labyrinth Weirs, ASCE Press (American Society of Civil Engineers) Reston, VA, 2003.
- [28] B. Savage, K. Frizell, and J. Crowder, Brains Versus Brawn: The Changing World of Hydraulic model Studies, Proceedings of the 2004 Annual Conference, Association of State Dam Safety Officials (ASDSO). phoenix, AZ, 2004.
- [29] B. Abbaspuor, A.H. Hagiabi, A. Maleki, and H. Torabi Poodeh. Experimental and Numerical Evaluation of Discharge Capacity of Sharp-Crested Triangular Plan Form Weirs. *Int. J. Engineering Systems Modelling and Simulation.* 2017.9 (2): p. 113-119.
- Outflow Process over a Triangular Labyrinth Weir, *J. Irrigation and Drainage Eng.*, 2017. 143(8): p. 06017007.
- [20] M. Bijankhan and S. Kouchakzadeh, Unified Discharge Coefficient Formula for Free and Submerged Triangular Labyrinth Weirs, *Flow Measurement and Instrumentation.* 2017. 57: p. 46-56.
- [21] Y. Sangsefidi, M. Mehraein, and M. Ghodsian, Experimental Study on Flow over in-Reservoir Arced Labyrinth Weirs, *Flow Measurement and Instrumentation.* 2018. 59: p. 215-224.
- [22] S.J. Meshkavati Toroujeni, A.R. Emadi, A.A. Dehghani, M. Msoudian. Experimentally Investigation of Discharge Coefficient at Trapezoidal Labyrinth Weirs. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage.* 2017. 5(11): p. 852-864.
- [23] S. Abbasi, and A. Safarzadeh, Hydrodynamic Study of Three-Dimensional Flow Structure in Trapezoidal Labyrinth Weir under an Angle of 15 degrees, (in Persian), in: 2th National Conf. on Applied Researches in Structural Eng, and Construction Management. Sharif University of Tachnology., Iran, 2018.
- [24] O. Bilhan, M. Cihan Aydin, M.E. Emiroglu, and Carol J. Miller. Experimental and CFD Analysis of Circular Labyrinth Weirs, *J. Irrigation and Drainage Eng.*, 2018.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Mohammadi F., Hassanzadeh Y., Roshangar K., *Experimental and Numerical Investigation on Discharge Coefficient Relationships sharp-crested U Shape Plan Form Weirs, Amirkabir J. Civil Eng., 53(10) (2022) 4231-4252.*

DOI: [10.22060/ceej.2020.18289.6819](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18289.6819)

