

## مطالعه عددی عوامل موثر بر عملکرد هیدرولیکی جریان عبوری از سرریز کنگره‌ای

الهام ضمیری<sup>1</sup>، حجت کرمی<sup>2</sup>، سعید فرزین<sup>2\*</sup>

تاریخ دریافت: 1396/2/13 تاریخ پذیرش: 1396/3/2

### چکیده

سرریز کنگره‌ای از سازه‌های هیدرولیکی غیرخطی می‌باشد که شکل هندسی آن، سبب افزایش ضریب دبی جریان عبوری از سرریز می‌گردد. در این تحقیق، سرریز کنگره‌ای در کانالی به طول 14/6 متر، با استفاده از 6 دبی در محدوده 15 تا 600 لیتر بر ثانیه در مدل Flow-3D شبیه‌سازی و نتایج حاصل، با داده‌های آزمایشگاهی معتبر صحت‌سنجی شد. مدل‌های آشفتگی  $k-\epsilon$ ،  $k-\epsilon$  و  $RNG$  و  $LES$  به منظور انتخاب مدل آشفتگی مناسب برای شبیه‌سازی این نوع سرریز مورد استفاده قرار گرفتند. جهت ارزیابی میزان دقت شبیه‌سازی، از سه شاخص  $RMSE$ ،  $MAE$  و  $R^2$  استفاده شد. مدل آشفتگی  $k-\epsilon$ ، بهترین نتایج را برای نسبت بی‌بعد هد بالادست به ارتفاع سرریز ( $H/p$ ) به دست آورد. در ادامه، شکل تاج سرریز (نیم‌دایره‌ای و ربع‌دایره‌ای) و ضخامت بدنه سرریز به عنوان عواملی تاثیرگذار در مقدار ضریب دبی، معرفی و بررسی شدند. نتایج حاکی از آن است که افزایش 50 درصدی ضخامت بدنه سرریز، موجب کاسته شدن 8/22 درصدی از مقدار ضریب دبی می‌شود. همچنین، بزرگی ضریب دبی در سرریز با تاج نیم‌دایره شکل، از مقدار ضریب دبی در سرریز با تاج ربع‌دایره، حدود 5/22 درصد بیشتر می‌باشد. همچنین سرعت و عمق جریان عبوری از سرریز کنگره‌ای با ضخامت بدنه 38/1 و 57/15 سانتی‌متر مورد ارزیابی قرار گرفت. نتیجه بررسی حاکی از آن است که افزایش ضخامت دیواره سرریز کنگره‌ای، سبب افزایش عمق و سرعت جریان عبوری از سرریز شده و به تبع آن از مقدار ضریب دبی کاسته شده است.

**واژه‌های کلیدی:** سرریز کنگره‌ای، شکل تاج سرریز، ضخامت بدنه، ضریب دبی، مدل آشفتگی، Flow-3D

### مقدمه

هیدرولیکی سرریز کنگره‌ای انجام شده است. تولیس و همکاران پارامترهای موثر در تعیین مقدار دبی سرریز کنگره‌ای را مورد ارزیابی قرار دادند. هد کل، طول موثر سرریز و ضریب دبی به عنوان عوامل تاثیرگذار بر مقدار دبی جریان عبوری از این نوع سرریز معرفی گردیدند (Tullis et al., 1995). ورملتن و تسانگ تاثیر هوادهی در سرریزهای مستقیم را با سرریزهای کنگره‌ای مستطیلی و دوزنقه‌ای مورد مقایسه قرار دادند. آن‌ها دریافتند در عمق‌های کم، سرریزهای کنگره‌ای نسبت به سرریزهای مستقیم از عملکرد بهتری در هوادهی برخوردار هستند (Wormleaton and Tsang., 2000). تولیس و همکاران به بررسی روابط بی‌بعد هد آب در حالت مستغرق برای سرریز کنگره‌ای پرداختند و رابطه‌ای برای هد - دبی در سرریز کنگره‌ای ارائه نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد وقتی نسبت کل هد بالادست به کل هد پایین دست (در حالت مستغرق سرریز) از مقدار 0/5 تجاوز می‌کند، شرایط مستغرق جریان تحت تاثیر هد بالادست است (Tullis et al., 2007).

کروکستون و تولیس با ایجاد اشکال هندسی مختلف سرریز در پلان، عملکرد انواع مختلف سرریز کنگره‌ای را ارزیابی نمودند. نتایج این بررسی بیانگر آن است که برای سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای منحنی در پلان با تاج نیم‌دایره، ضریب دبی تابعی از نسبت هد

سرریزها، از جمله سازه‌های هیدرولیکی هستند که به منظور اندازه‌گیری، تنظیم و کنترل عمق آب در رودخانه‌ها و کانال‌های روباز مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. سرریز کنگره‌ای یکی از انواع سرریزها می‌باشد که به دلیل داشتن هندسه غیرخطی، نسبت به سرریزهای مستقیم در عرض معین، طول بیش‌تری دارد و همین امر موجب کاهش عمق آب و افزایش ضریب دبی در این نوع سرریز گردیده است. (Carollo et al., 2011; Hager et al., 2015). استغراق محلی، شکل تاج سرریز، هندسه سرریز، تاثیرات ویسکوزیته و فشار در زیر تیغه جریان از عوامل موثر بر ضریب دبی می‌باشند. سبب بعدی بودن جریان عبوری از سرریز کنگره‌ای سبب پیچیده و مشکل شدن تحلیل این نوع سرریز شده است (Crookston., 2010).

تاکنون مطالعات گسترده‌ای پیرامون بررسی عوامل موثر بر رفتار

1- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

2- استادیار، گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

\* - نویسنده مسئول: (Email: saeed.farzin@semnan.ac.ir)

مطالعات عددی جامعی صورت نگرفته است. هدف از تحقیق حاضر، بهره گرفتن از نرم افزار Flow-3D به منظور تخمین ضریب دبی سرریز کنگره ای است. پس از صحت سنجی، مقادیر آزمایشگاهی و داده های حاصل از مدل عددی با استفاده از سه مدل آشفتگی RNG  $k-\epsilon$ ،  $k-\epsilon$  و LES مقایسه گردید و مدل آشفتگی مناسب جهت مدل سازی انتخاب شد. در ادامه با دو نوع شکل تاج (نیم دایره و ربع دایره) و با تغییر در ضخامت بدنه سرریز (که موجب تغییر در ابعاد دماغه ورودی و خروجی می شود)، میزان تغییر در ضریب دبی مورد تحلیل قرار گرفت. سپس سرعت و عمق جریان عبوری از سرریز برای هر دو نوع ضخامت بدنه بررسی شد.

## مواد و روش ها

### رابطه پیوستگی و اندازه حرکت

قوانین حاکم بر جریان سیال تراکم ناپذیر لزج، توسط معادلات پیوستگی و اندازه حرکت در جهت محورهای مختصات که به معادلات ناویر استوکس معروف هستند، بیان می شوند. رابطه 1 و 2 به ترتیب رابطه پیوستگی و اندازه حرکت در جهت اختیاری  $i$  می باشند.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i + \nu \nabla^2 u_i \quad (2)$$

در روابط 1 و 2،  $u_i$  مولفه سرعت لحظه ای در جهت  $i$  ( $m/s$ )،  $\nu$  لزجت دینامیک سیال ( $N \cdot s/m^2$ )،  $\rho$  چگالی سیال ( $kg/m^3$ )،  $g_i$  مولفه شتاب ثقل در جهت  $i$  ( $m/s^2$ ) و  $p$  فشار در هر نقطه از سیال ( $Pa$ ) می باشد (فرزین و همکاران، 1395؛ ضمیری و همکاران، 1395).

### معادلات جریان عبوری از سرریز کنگره ای

سرریزها از سازه های هیدرولیکی عمود بر جهت جریان در مجاری روباز هستند (یوسفوند و همکاران، 1394). ضریب دبی از پارامترهای بسیار موثر در مطالعه جریان عبوری از سرریز کنگره ای می باشد. طول سرریز و کل هد بالادست از تاثیرگذارترین پارامترها بر ضریب دبی می باشند. معادلات متعددی برای تخمین ضریب دبی ارائه گردیدند که معادله 3 از رایج ترین آنها می باشد.

$$C_{d(\alpha)} = \frac{1.5Q}{L_c \sqrt{2g H_T^{3/2}}} \quad (3)$$

$$L_c = N(2L_c + A + D) \quad (4)$$

$$H_T = h + (v^2 / 2g) \quad (5)$$

در رابطه 3،  $C_{d(\alpha)}$  ضریب دبی سرریز کنگره ای،  $Q$  دبی عبوری از

بالادست به ارتفاع سرریز می باشد (Crookston and Tullis., 2012a). اندرسون و تولیس به مقایسه عملکرد سرریزهای کلیدیپانویی و کنگره ای پرداختند. در این تحقیق با تغییر نسبت اندازه دهانه های ورودی و خروجی سرریز، تغییرات مقدار ضریب دبی ارزیابی شد. همچنین اثر اضافه نمودن دیواره و دماغه را بر میزان ضریب دبی سرریز مورد بررسی قرار دادند (Anderson and Tullis., 2012). سوپراپتو دبی عبوری از سرریز اوجی را با انواع سرریزهای کنگره ای مقایسه نمود. نتایج نشان داد سرریز کنگره ای عملکرد بهتری نسبت به سرریز اوجی دارد. همچنین مشخص گردید کمترین دبی عبوری مربوط به سرریز اوجی و بیشترین دبی جریان متعلق به سرریز کنگره ای دوزنقه ای است (Suprpto., 2013).

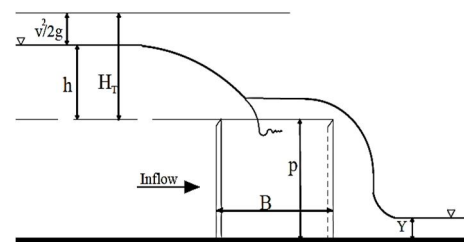
میرناصری و عمادی رفتار سرریز - دریچه کنگره ای مستطیلی را با سرریز - دریچه لبه تیز مورد سنجش قرار دادند و دریافتند هنگامی که نسبت هد بالادست به ارتفاع سرریز کم تر از  $0/4$  است، ضریب دبی سرریز - دریچه کنگره ای مستطیلی تقریباً برابر یا بیش تر از ضریب دبی سرریز - دریچه لبه تیز است (Mirnaseri and Emadi., 2014). سو و همکاران تاثیر شکل سرریز را بر دبی جریان عبوری از سرریز کنگره ای مطالعه نمودند و تفاوت های سرریز کنگره - ای و سرریزهای مستقیم اوجی را مورد ارزیابی قرار دادند. در ادامه مشخص گردید دبی عبوری از سرریز کنگره ای حدود  $71\%$  بیش تر از دبی عبوری از سرریز اوجی مستقیم است (Seo et al., 2016). نوری و عارف طی مطالعه آزمایشگاهی سرریز کنگره ای با تاج دایره ای را مورد آنالیز قرار دادند و دریافتند ضریب دبی، تابعی از هد آب بالادست سرریز است و افزایش پارامتر بی بعد هد آب به ارتفاع سرریز موجب کاهش ضریب دبی گردیده است (Noori and Aaref., 2017).

در کشور ایران نیز، اسمعیلی ورکی و رضوی زاده در مطالعه آزمایشگاهی خود، سرریزهای کنگره ای با هندسه های خطی - نیم دایره و نیم دایره ای را مورد ارزیابی قرار دادند. آن ها دریافتند دبی عبوری از سرریز کنگره ای در مقایسه با سرریزهای مستقیم حدود  $30\%$  درصد بیش تر است (اسمعیلی ورکی و رضوی زاده، 1392). در تحقیق نیک پیک و کاشفی پور (1395)، عملکرد سرریزهای کنگره ای و مایل و سرریز مستطیلی مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که به طول بیش تر سرریز کنگره ای نسبت به سایر سرریزها، به ازای دبی معین، ارتفاع آب در این سرریز کم تر از سایر سرریزها می باشد. شفاعت طلب دهقانی و همکاران (1395) به ارزیابی تاثیر ترازهای مختلف بستر پایاب بر ضریب تخلیه سرریز کنگره ای پرداختند. در ادامه، معادله ای به منظور برآورد ضریب تخلیه سرریز کنگره ای در شرایط رسوب گذاری در بالادست و پایاب مستغرق پیشنهاد نمودند.

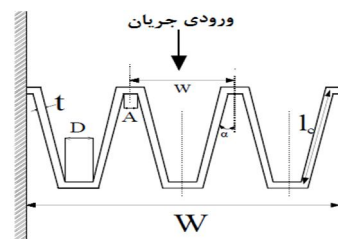
همانطور که از مطالعات پیشین دریافت می شود، تاکنون چندین مطالعه آزمایشگاهی درباره سرریز کنگره ای انجام شده است؛ لیکن

سرریز،  $g$  شتاب گرانشی ( $m^2/s$ ) و  $L_c$  کل طول سرریز و  $H_T$  کل هد بالادست (غیرمستغرق) که به ترتیب در روابط 4 و 5 تعریف شده‌اند.  $L_c$  طول مرکزی دیواره جانبی،  $N$  تعداد چرخه‌ها،  $A$  طول داخلی دماغه و  $D$  طول خارجی دماغه مطابق معادله 4 می‌باشند. همچنین در معادله 5،  $h$  هد پیژومتری و  $v$  سرعت جریان در بالادست سرریز می‌باشد (Crookston and Tullis., 2012b). برش جانبی سرریز کنگره‌ای و پارامترهای هندسی سرریز در شکل‌های 1 و 2 نشان داده شده‌اند.

گسترش علم و فناوری از یک‌سو و پیچیدگی مطالعات آزمایشگاهی از سوی دیگر، تمایل استفاده از روش‌های عددی برای تخمین پارامترهای هیدرولیکی را افزایش داده است. در تحقیق حاضر، مدل‌سازی سرریز کنگره‌ای با کمک مدل Flow-3D و معادلات پیوستگی، اندازه حرکت و عملکرد مدل‌های آشفته‌گی انجام گرفته است. برای انجام این پژوهش 24 آنالیز با استفاده از سرریز با تاج ربع‌دایره و زاویه دیواره سرریز در امتداد جریان  $(\alpha)$  6 درجه و با به کارگیری از 6 دبی ( $15 < Q < 600 (l/s)$ ) در سرریز کنگره‌ای دوزنقه-ای صورت گرفت. آنالیزهای فوق با کمک 3 مدل آشفته‌گی و 2 نوع مش‌بندی انجام شد. سپس 24 آنالیز با هدف تعیین تاثیر تغییر ضخامت بدنه سرریز در عملکرد جریان در سرریز با تاج نیم‌دایره و ربع‌دایره انجام شد (مجموعاً 48 آنالیز - مطابق شکل 3). در مدل Flow-3D از روش محدود در شبکه‌بندی مستطیلی استفاده شد. این مدل، از روش‌های با ضریب دقت بالا در حل معادلات بهره می‌برد. در مدل Flow-3D از دو روش VOF و FAVOR به‌منظور شبیه‌سازی هندسی استفاده شد. برای نمایش سطح آزاد سیال، روش VOF و به‌منظور شبیه‌سازی اجسام و سطوح صلب مانند مرزهای هندسی، روش FAVOR مورد استفاده قرار گرفت (Hirt and Richardson., 1999)



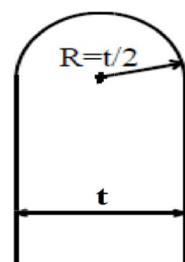
شکل 1- برش جانبی سرریز کنگره‌ای



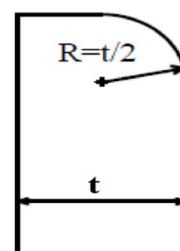
شکل 2- پارامترهای هندسی سرریز کنگره‌ای

### مدل آزمایشگاهی

برای محاسبه ضریب دبی سرریز کنگره‌ای از نتایج آزمایشگاهی کروکستون و تولیس استفاده گردید (Crookston and Tullis., 2012b).



تاج نیم‌دایره  
HR



تاج ربع‌دایره  
QR

شکل 3- نیم‌رخ تاج‌های مورد استفاده برای سرریز کنگره‌ای

### مدل آشفته‌گی K-ε

مدل آشفته‌گی K-ε برای مطالعه طیف وسیعی از جریان‌ها مناسب می‌باشد. انرژی جنبشی آشفته‌گی (k) و اتلاف انرژی (ε) دو پارامتری هستند که مدل آشفته‌گی K-ε را وصف می‌کنند. معادله 6، این مدل را

### مدل‌های آشفته‌گی در Flow-3D

Flow-3D قادر است با استفاده از مدل‌های آشفته‌گی به شبیه‌سازی جریان عبوری از سازه‌هایی هیدرولیکی بپردازد که به اختصار شرح داده شده است (Farzin et al., 2016).

توضیح داده است.

$$\frac{\partial \varepsilon_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( u A_x \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial x} + v A_y \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial y} + w A_z \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial z} \right) = \quad (6)$$

$$\frac{CDIS1 \cdot \varepsilon_T}{K_T} (P_T + CDIS3 G_T) + Diff_e - CDIS2 \frac{\varepsilon_T^2}{K_T}$$

در معادله 6، CDIS1، CDIS2 و CDIS3 پارامترهای بی‌بعدی هستند که در مدل K-ε به ترتیب برابر با 1/44، 1/92 و 0/2 می‌باشند. u، v و w پارامترهای سرعت در جهات سه‌گانه و  $A_x$ ،  $A_y$  و  $A_z$  توابع favor هستند (Sabbagh-Yazdi et al., 2007).

#### مدل آشفتگی گروه‌های نرمال شده (RNG k-ε)

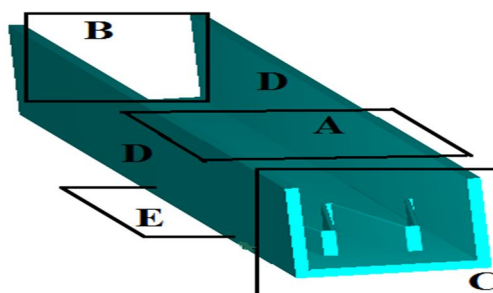
مدل RNG k-ε یکی از انواع مدل آشفتگی k-ε است که معادلات استفاده شده در این مدل با معادلات مدل k-ε مشابه‌اند. مقادیر CDIS1 و CDIS2 در مدل RNG k-ε به ترتیب برابر با 1/42 و 1/68 است (Sabbagh-Yazdi et al., 2007).

#### مدل آشفتگی شبیه‌سازی گرداب‌های بزرگ (LES)

مدل آشفتگی شبیه‌سازی گرداب‌های بزرگ وابسته به زمان است. استفاده از این مدل آشفتگی سبب افزایش دقت محاسبات می‌گردد اما هزینه محاسبات را افزایش می‌دهد (Payri et al., 2010).

#### تعریف شرایط مرزی

در مدل Flow-3D به‌منظور مدل‌سازی سرریز کنگره‌ای از شرط مرزی "symmetry" برای شبیه‌سازی سطح آزاد جریان در سطح A (مطابق شکل 4) استفاده شده است. شرایط مرزی در سطح B از نوع "volume flow rate" انتخاب شد تا امکان تعیین عمق و دبی جریان در این حالت میسر باشد. مرز "outflow" نیز برای سطح C تعیین شد. سطوح D و E از نوع دیواره انتخاب شدند، علت این انتخاب، صفر بودن سرعت جریان در این سطوح می‌باشد.



شکل 4- نمایش شرایط مرزی کانال

#### معیارهای ارزیابی مدل

برای تعیین دقت ضریب دبی تخمین‌زده شده با استفاده از مدل عددی، شاخص‌های ارزیابی مختلفی از جمله ضریب همبستگی  $(R^2)$ ،

$(R^2)$ ، جذر میانگین مربعات خطا  $(RMSE)^2$  و میانگین مطلق خطا<sup>3</sup> (MAE)، مطابق روابط 7، 8 و 9 مورد استفاده قرار گرفتند. میزان همبستگی میان مقادیر مشاهداتی و نتایج حاصل از مدل‌سازی توسط معیار  $R^2$ ، تحت رابطه خطی بیان می‌شود. به دلیل حساسیت این شاخص نسبت به انحراف نقاط، از سایر شاخص‌ها نیز استفاده گردید. RMSE نشان‌دهنده وزن خطاهای بزرگ‌تر براساس تفاوت میان مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده می‌باشد. MAE نیز بیانگر میانگین قدرمطلق خطاها است. نزدیکی این دو معیار ارزیابی خطا به عدد صفر، دستیابی به نتایج مطلوب را امکان‌پذیر کرده است.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^N x_i^2 - \left( \frac{\sum_{i=1}^N y_i^2}{N} \right)} \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (8)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad (9)$$

در روابط 7، 8 و 9،  $x_i$  و  $y_i$  به ترتیب مقادیر حاصل از مدل عددی و مدل آزمایشگاهی می‌باشند.

#### نتایج و بحث

برای مطالعه عددی سرریز کنگره‌ای، در آغاز دو نوع مش‌بندی با هدف انتخاب مش مناسب استفاده گردید. دو مش با تعداد سلول‌های 564000 و 437000 برای گزینش مش مناسب مورد ارزیابی قرار گرفتند. در مش شماره 1، ابعاد سلول‌ها در مجاورت سرریز، کوچک‌تر از مش شماره 2 است. همین امر موجب افزایش دقت مدل‌سازی مش 1 می‌گردد. به‌منظور کاهش خطاهای مدل‌سازی، افزایش دقت مدل‌سازی و صرفه‌جویی در زمان، نسبت ابعاد دو سلول مجاور بایستی به عدد 1 نزدیک باشد و این مقدار می‌تواند حداکثر برابر با 1/25 باشد. جدول 1 مدل‌های استفاده شده در این پژوهش را نمایش داده است. شکل 5 نیز بیانگر مش‌بندی مدل سرریز کنگره‌ای است.

در جدول 2 شاخص‌های ارزیابی دقت مدل‌سازی برای نسبت کل هد بالادست به ارتفاع سرریز (HT/p) مورد بررسی قرار گرفت. شاخص  $R^2$  برای مش شماره 1 با تعداد تقریبی سلول 564000، 0/9875 به دست آمد که بیانگر همبستگی میان مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر حاصل از مدل عددی است. همچنین مش شماره 1 به‌عنوان مش‌بندی مناسب برای مدل‌سازی سرریز کنگره‌ای انتخاب شد. در ادامه شاخص‌های RMSE و MAE مقادیر قابل قبولی جهت تخمین

2- Root mean square error

3- Mean Absolute Error

1- Coefficient of determination

پس از صحت‌سنجی مدل و تعیین مدل آشفتگی RNG به‌عنوان مدل مناسب، نحوه تغییرات عمق جریان در طول زمان مورد بررسی قرار گرفت. شکل 6 روند گذر جریان از روی سرریز کنگره‌ای را برای  $\alpha=6$  درجه و تحت دبی 0/588 مترمکعب بر ثانیه نمایش داده است. مدت زمان مدل‌سازی 420 ثانیه تعیین شد که جریان بایستی در این زمان به وضعیت پایدار و ثابت برسد تا بتوان پارامترهای هیدرولیکی را برای مدل مورد نظر اندازه گرفت. با توجه به شکل 6، در 3 ثانیه اول مدل‌سازی، جریان آب به پایین دست سرریز نرسیده و از ثانیه چهارم جریان از پایین دست نیز گذر کرده است. از ثانیه 32 عمق جریان در پایین دست تقریباً ثابت و حدود 24/1 سانتی‌متر تعیین شد. در زمان 150 ثانیه، جریان تقریباً به حالت پایدار رسیده که عمق جریان در بالادست حدود 46/5 سانتی‌متر و عمق بر روی کنگره‌های سرریز 3/9 سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. همچنین نحوه ریزش جریان از روی سرریز نیز در شکل 6 نشان داده شده است. با توجه به شکل 6 در ثانیه سوم می‌توان نتیجه گرفت که جریان هنگام عبور از پایین دست سرریز، ابتدا از قسمت کنگره‌ای و ضلع مایل سرریز عبور کرده و سپس از دماغه سرریز گذر کرد. همین نوع عبور جریان از سرریز کنگره‌ای و سه‌بعدی بودن حرکت جریان است که سبب پیچیدگی مطالعه این سرریز گردیده است.

نتایج همبستگی میان ضریب دبی و دبی برای سرریز با تاج ربع-دایره‌ای در شکل 7 نشان داده شده است. در این مرحله با افزایش ضخامت بدنه سرریز (t) از 38/1 به 57/15 سانتی‌متر، تغییر عملکرد هیدرولیکی سرریز کنگره‌ای، مورد بررسی قرار گرفت. شاخص  $R^2$  برای سرریز با ضخامت بدنه 38/1 سانتی‌متر، 0/99 و برای سرریز با ضخامت بدنه 57/15 سانتی‌متر، 0/97 حاصل گردید. مجاورت مقدار شاخص ضریب همبستگی به عدد یک، بیانگر وابستگی دو پارامتر مورد بررسی است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که دو پارامتر دبی جریان و ضریب دبی به یکدیگر وابسته بوده و دبی نقش موثری در تعیین ضریب دبی ایفا کرده است. همچنین نتایج نشان داد رابطه خطی بین دبی و ضریب دبی برقرار است. در ادامه مشخص گردید 32 برابر شدن دبی جریان، منجر به کاهش 58 درصدی ضریب دبی شد. رابطه ضریب دبی و دبی را برای سرریز کنگره‌ای با تاج نیم‌دایره-ای در شکل 8 نشان داده شده است. ضریب همبستگی این دو پارامتر برای سرریز با تاج نیم‌دایره و ضخامت 38/1 و 57/15 سانتی‌متر به ترتیب 0/97 و 0/98 به دست آمد که هر دو مقدار حاکی از وابستگی این دو پارامتر به یکدیگر و تأثیرگذاری بالای دبی جریان بر ضریب دبی است.

افزایش ضخامت بدنه سرریز از 38/1 به 57/15 سانتی‌متر سبب گردید تا ابعاد دماغه خارجی (D) از 106/6 به 141/02 میلی‌متر افزایش یابد ولی میزان بزرگی دماغه ورودی (A) ثابت باقی ماند. هنگامی که از سرریز با ضخامت بدنه 38/1 سانتی‌متر استفاده گردید،

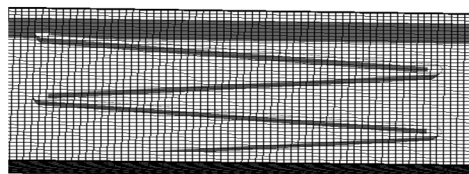
مقدار  $H_T/p$  در مدل‌سازی عددی به دست آوردند. با توجه به جدول 2، برای مدل‌های آشفتگی، مدل RNG تطابق خوبی را بین مقادیر مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی نشان داد. پس از مدل RNG، به ترتیب مدل آشفتگی k-ε و LES نتایج مناسبی ارائه کرده‌اند. در تحقیق کروکستون و تولیس مقادیر آزمایشگاهی ضریب دبی  $(C_d)$  (C<sub>d</sub> (α)) ارائه شد (Crookston and Tullis., 2012b). در پژوهش حاضر، مقایسه ضریب دبی حاصل از مدل عددی با استفاده از سه مدل آشفتگی (k-ε, k-ε, RNG و LES) و مقادیر آزمایشگاهی در جدول 3 نشان داده شده است. برای مدل RNG مقدار ضریب همبستگی 0/9822 به دست آمد. همچنین مقادیر RMSE و MAE برای این مدل به ترتیب، حدود 0/0523 و 0/0396 حاصل گردیدند. با توجه به نتایج، مدل آشفتگی RNG می‌تواند به‌عنوان یک مدل آشفتگی مناسب جهت مدل‌سازی سرریز کنگره‌ای معرفی شود که مقادیر ضریب دبی را با تقریب خوبی تخمین زده است.

جدول 1- مشخصات مدل‌های عددی مورد استفاده

شماره مدل	تعداد مش	مدل آشفتگی	متوسط زمان (ساعت)
1	564000	RNG k-ε	9
2	437000	RNG k-ε	6
3	564000	k-ε	8
4	564000	LES	12

جدول 2- شاخص ارزیابی در انتخاب مدل آشفتگی و مش مناسب برای پارامتر  $H_T/p$

مدل آشفتگی	تعداد سلول	معیار ارزیابی		
		$R^2$	RMSE	MAE
RNG k-ε	564000	0/9875	0/002946	0/002305
	437000	0/9785	0/03395	0/03386
K-ε	564000	0/9838	0/004145	0/00304
LES	564000	0/9806	0/005612	0/00419



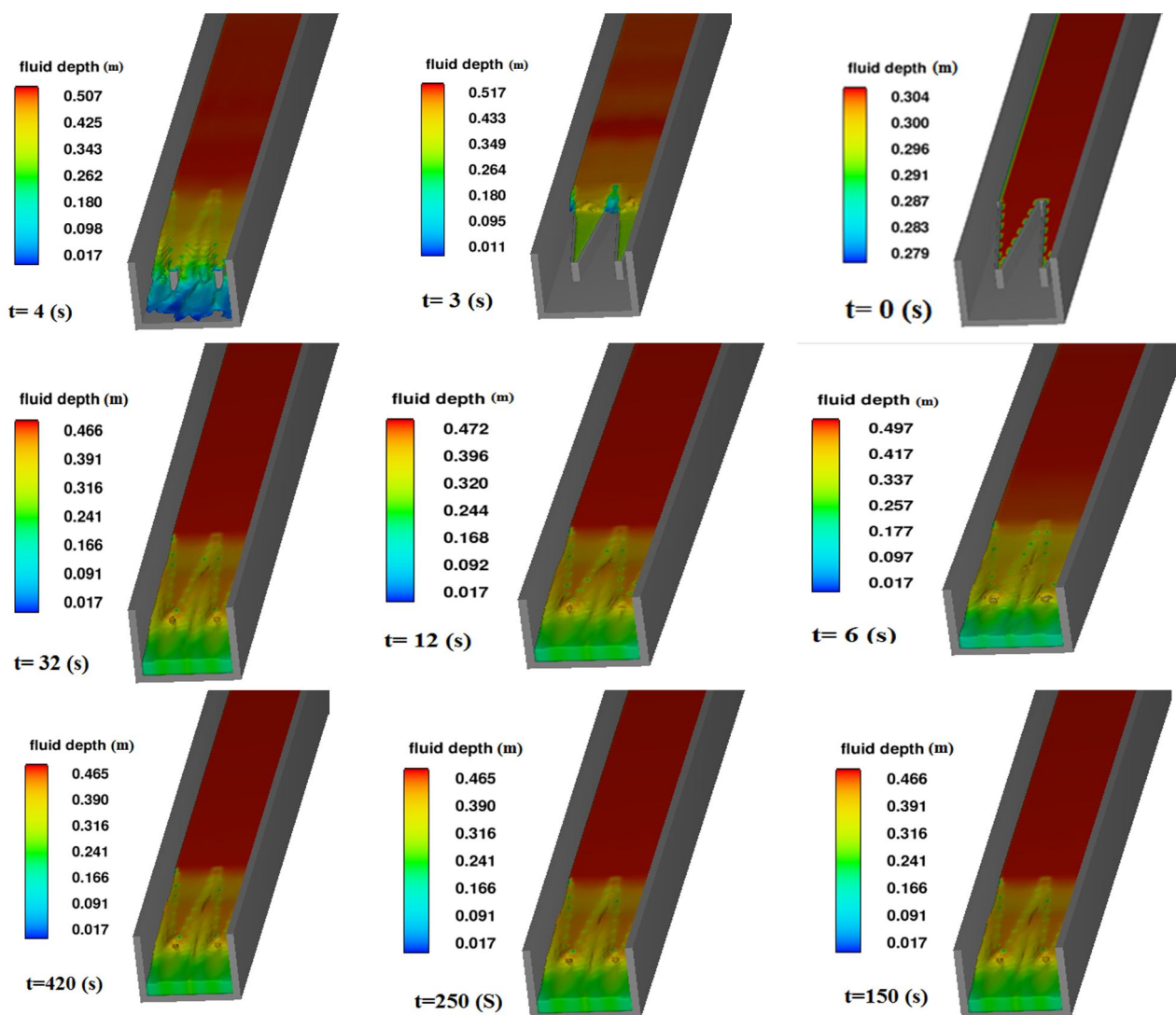
شکل 5- نمایش مش‌بندی مدل سرریز کنگره‌ای در پلان

جدول 3- شاخص ارزیابی در انتخاب مدل آشفتگی برای  $C_d$

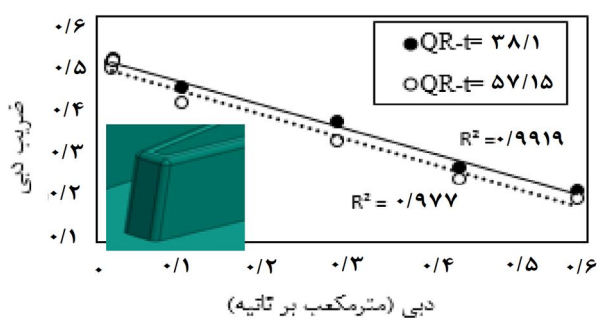
مدل آشفتگی	معیار ارزیابی		
	$R^2$	RMSE	MAE
RNG k-ε	0/9822	0/0523	0/0396
K-ε	0/9307	0/07194	0/05597
LES	0/8821	0/08552	0/06724



نسبت  $D/A$ ، 2/8 و در حالت بدنه سرریز با ضخامت 57/15 سانتی-متر، این نسبت برابر 3/7 شد.



شکل 6- روند گذر جریان از روی سرریز کنگره‌ای در طول زمان



شکل 7- همبستگی میان دبی و ضریب دبی در سرریز با تاج ربع‌دایره

داده شده است. نتایج نشانگر آن است که سرریز با تاج نیم‌دایره‌ای ضریب دبی بالاتری نسبت به سرریز با تاج ربع‌دایره‌ای داشته است.

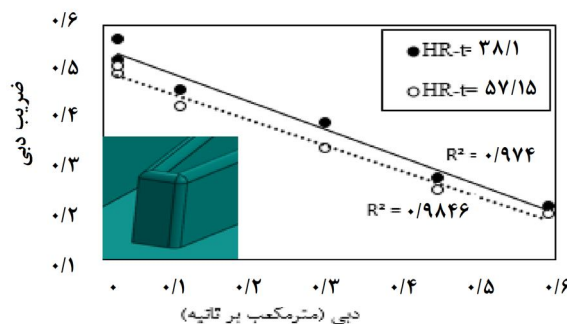
نمودار تغییرات  $(H_T/p)$  نسبت به ضریب دبی در دو سرریز با تاج ربع‌دایره و نیم‌دایره با ضخامت بدنه 38/1 سانتی‌متر در شکل 9 نشان

ضخامت بدنه سرریز در سرریز با تاج نیم‌دایره‌ای شکل، کاهش 8/8 درصدی ضریب دبی را در پی داشت. به‌طور کلی می‌توان به این نکته اشاره نمود که افزایش 50 درصدی ضخامت بدنه سرریز، سبب کاهش 8/22 درصدی ضریب دبی گردید.

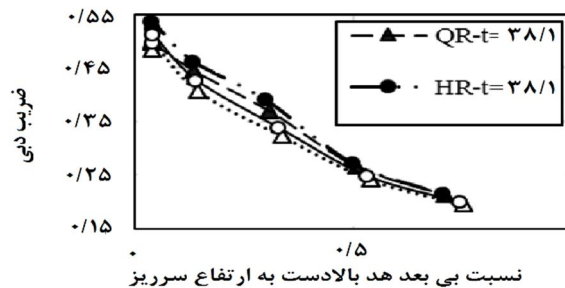
جدول 4 بیانگر میزان همبستگی دو پارامتر  $H_T/p$  و ضریب دبی است. مقادیر ضریب همبستگی در هر 4 حالت که مورد بررسی قرار گرفت، مقداری بیش‌تر از 0/9 دارد که حاکی از وابستگی بالای دو پارامتر است. همچنین با توجه به نتایج به‌دست آمده نسبت بی‌بعد بالادست بر ارتفاع سرریز از عوامل موثر بر مقدار ضریب دبی است که افزایش 94 درصدی پارامتر  $H_T/p$  موجب کاهش 58 درصدی ضریب دبی گردیده است. بنابراین نتایج شکل‌های 7 و 8 و جدول 4 بیان‌کننده آن است که پارامترهای دبی جریان و  $H_T/p$  به‌عنوان عوامل موثر در تعیین ضریب دبی شناخته شدند.

مقدار متوسط ضریب دبی در سرریز با تاج نیم‌دایره‌ای شکل، حدود 5/2 درصد بیش‌تر از ضریب دبی در سرریز با تاج ربع‌دایره بوده است. در سرریز با تاج نیم‌دایره‌ای به علت شکل مدور تاج، جریان به دیواره سرریز چسبیده و همین امر موجب گردیده است تا عملکرد تاج سرریز در مقادیر پایین  $H_T/p$  بهبود یابد و مقدار ضریب تخلیه افزایش یابد. همچنین شباهت خطوط جریان عبوری از روی سرریز با شکل تاج نیز سبب افزایش ضریب تخلیه سرریز با تاج نیم‌دایره شده است. هنگامی که مقدار پارامتر  $H_T/p$  از 0/5 فراتر رود، مقدار ضریب دبی در دو نوع تاج به یکدیگر شباهت پیدا می‌کند.

نکته قابل توجه دیگر آن است که افزایش ضخامت بدنه سرریز، موجب کاهش ضریب دبی گردید. با افزایش 50 درصدی ضخامت بدنه سرریز در سرریز با تاج ربع‌دایره‌ای شکل، از مقدار ضریب دبی به‌طور متوسط 7/65 درصد کاسته شد. همین مقدار افزایش بر



شکل 8- همبستگی میان دبی و ضریب دبی در سرریز با تاج نیم‌دایره



شکل 9- رابطه میان ضریب دبی و  $H_T/p$  برای سرریز کنگره‌ای  $\alpha=6$  درجه

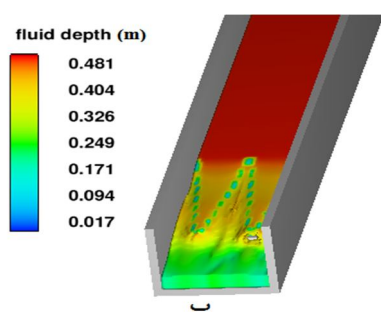
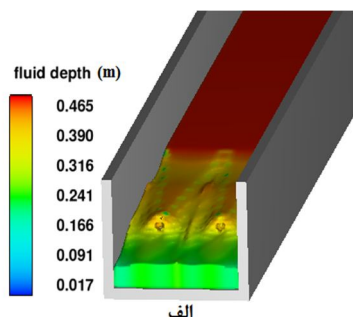
جدول 4- نمایش همبستگی دو پارامتر  $C_d$  و  $H_T/p$  برای سرریز کنگره‌ای  $\alpha=6$  درجه

$R^2$	نماد	ضخامت بدنه (cm)	مشخصات تاج سرریز
0/9895	QR-t=38.1	38/1	ربع‌دایره
0/9846	HR-t=38.1	38/1	نیم‌دایره
0/9637	QR-t=38.1	57/15	ربع‌دایره
0/971	HR-t=38.1	57/15	نیم‌دایره

شکل 10، نسبت ضریب دبی سرریز کنگره‌ای با تاج نیم‌دایره به ضریب دبی سرریز کنگره‌ای با تاج ربع‌دایره‌ای در مقابل  $H_T/p$  نشان داده است. به ازای  $H_T/p$  برابر 0/04 بیش‌ترین مقدار پارامتر  $C_d$  حاصل شده است که مقدار آن 1/08 بوده است. مقدار  $C_d$  در تمامی نقاط بیش‌تر از 1 حاصل شد که نشان‌دهنده آن است که ضریب دبی سرریز با تاج نیم‌دایره بیش‌تر از سرریز با تاج

شکل 10، نسبت ضریب دبی سرریز کنگره‌ای با تاج نیم‌دایره به ضریب دبی سرریز کنگره‌ای با تاج ربع‌دایره‌ای در مقابل  $H_T/p$  نشان داده است. به ازای  $H_T/p$  برابر 0/04 بیش‌ترین مقدار پارامتر  $C_d$  حاصل شده است که مقدار آن 1/08 بوده است. مقدار  $C_d$  در تمامی نقاط بیش‌تر از 1 حاصل شد که نشان‌دهنده آن است که ضریب دبی سرریز با تاج نیم‌دایره بیش‌تر از سرریز با تاج

ارایه شده می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ضخامت دیواره سرریز کنگره‌ای، عمق و سرعت جریان عبوری از سرریز افزایش یافته و به تبع آن ضریب دبی کاهش یافته است.

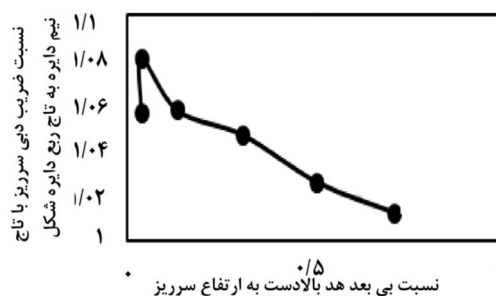


شکل 11- مقایسه عمق جریان در سرریز کنگره‌ای: الف)  $t=38/1$  و ب)  $t=57/15$  سانتی‌متر

مقادیر عمق و سرعت متوسط جریان در سرریز کنگره‌ای ربع-دایره‌ای برای دبی  $28/5$  لیتر بر ثانیه، سرریز با ضخامت بدنه  $38/1$  سانتی‌متر به ترتیب در شکل‌های 13 و 14 نشان داده شده است. بیش‌ترین عمق جریان در هر دو مقطع تقریباً  $31/8$  سانتی‌متر می‌باشد. حداقل عمق جریان در مقطع A-A معادل  $1/78$  سانتی‌متر و در مقطع B-B،  $3/56$  سانتی‌متر به دست آمد که نشان‌دهنده دو برابر بودن حداقل عمق جریان در مقطع B-B نسبت به مقطع A-A است. همان‌طور که در شکل 14 مشخص است، بیش‌ترین سرعت متوسط جریان در  $x=13/5$  متر رخ داده است که حداقل عمق جریان نیز در همین مقطع برقرار شد. سرعت متوسط جریان در بالادست سرریز  $0/075$  متر بر ثانیه حاصل شد و همین پارامتر در پایین‌دست و در مقاطع A-A و B-B به ترتیب  $1/08$  و  $0/8$  متر بر ثانیه است. همان‌طور که مشاهده شد جریان عبوری ابتدا از مقطع A-A و سپس از مقطع B-B عبور کرده است و پیچیدگی وضعیت جریان عبوری از سرریز کنگره‌ای می‌تواند ناشی از همین نکته و سه‌بعدی بودن جریان عبوری از سرریز باشد.

با توجه به اهمیت کاربرد سرریز کنگره‌ای، بهینه‌سازی این سرریزها جهت بهره‌برداری حداکثری مورد توجه است. با توجه به

ربع‌دایره است و این نکته را بایستی در جهت افزایش بهره‌برداری از سد و سازه‌های هیدرولیکی به کار برد.



شکل 10- نمایش  $C_{d-HR}/C_{d-QR}$  در مقابل  $H_T/p$  در سرریز کنگره‌ای  $6=\alpha$  درجه

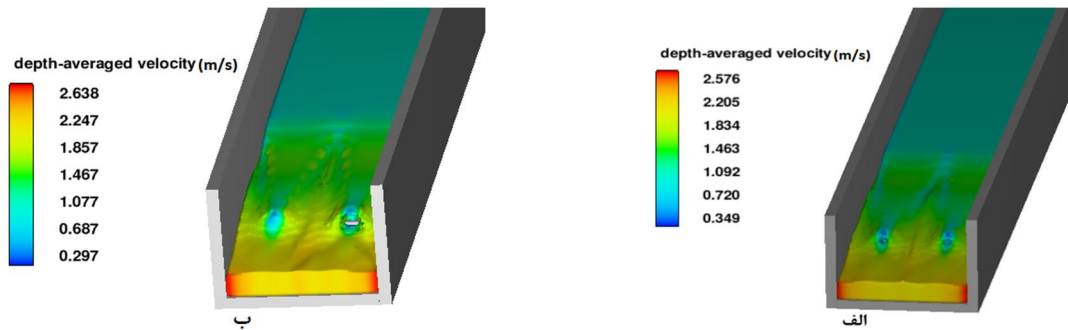
شکل 11 عمق جریان در سرریز کنگره‌ای با تاج ربع‌دایره‌ای را در دو حالت ضخامت دیواره برابر با  $38/1$  و  $57/15$  سانتی‌متر نشان داده است. شکل 11-ب در همه نقاط جریان، دارای عمق بیش‌تری نسبت به شکل 11-الف بوده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت افزایش ضخامت دیواره سرریز موجب افزایش عمق جریان عبوری از سرریز می‌شود. با توجه به رابطه 3، ذکر این نکته مهم است که به دلیل قرارگیری پارامتر  $H_T$  در مخرج کسر، با افزایش مقدار این پارامتر، ضریب دبی کاهش می‌یابد؛ افزایش عمق جریان در سرریز با ضخامت بدنه بیش‌تر، سبب کاهش ضریب دبی این نوع سرریز شده است. برای دبی  $0/588$  مترمکعب بر ثانیه، حداکثر عمق جریان در شکل 11-الف برابر  $46/5$  و برای شکل 11-ب برابر  $48/1$  سانتی‌متر تخمین زده شد. عمق جریان بر روی سرریز نیز در شکل 11-الف،  $31/6$  و در شکل 11-ب،  $32/6$  سانتی‌متر تعیین شد که نشانگر افزایش به‌طور متوسط  $3/2$  درصدی عمق آب در حالت ضخامت بدنه  $57/15$  سانتی‌متر نسبت به ضخامت  $38/1$  سانتی‌متر است.

شکل 12 به مقایسه سرعت متوسط جریان برای دبی  $0/588$  مترمکعب بر ثانیه و به ازای دو ضخامت مختلف بدنه سرریز پرداخته است. از مقایسه دو شکل 11 و 12 می‌توان گفت که نقاطی از جریان که عمق آب بیش‌تری دارند، دارای سرعت متوسط کم‌تری هستند. همان‌طور که مشاهده گردید شکل 12-الف مقادیر سرعت کم‌تری نسبت به شکل 12-ب دارد. حداکثر سرعت متوسط جریان در شکل 12-الف،  $2/576$  و برای شکل 12-ب،  $2/638$  متر بر ثانیه تخمین زده شد که در پایین‌دست سرریز رخ داده است. سرعت جریان بر روی بدنه سرریز نیز در شکل 12-الف و 12-ب به ترتیب  $1/04$  و  $1/3$  متر بر ثانیه تعیین گردید. با توجه به رابطه 5 بایستی به این نکته توجه نمود که اندازه سرعت جریان در مقدار پارامتر  $H_T$  موثر است و افزایش این مقدار موجب کاهش ضریب دبی گردیده است. از مجموع نکات

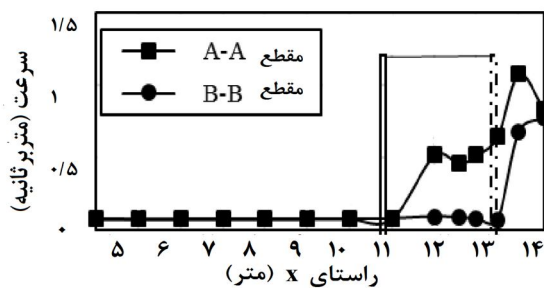


سرریز و قطر دیواره بهینه، با لحاظ الزامات اجرایی مورد بررسی و بهره‌برداری قرار گیرد.

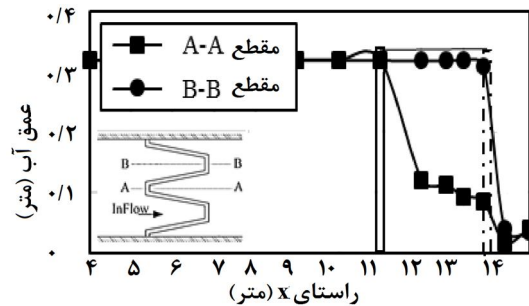
نتایج حاصل از این تحقیق، جهت افزایش ضریب دبی و استفاده حداکثری از ظرفیت مخازن پیشنهاد می‌شود که شکل تاج نیم‌دایره‌ای



شکل 12- مقایسه سرعت متوسط جریان در سرریز کنگره‌ای: الف)  $t=38/1$  و ب)  $t=57/15$  سانتی‌متر



شکل 14- سرعت متوسط جریان برای دبی 28/5 لیتر بر ثانیه



شکل 13- عمق جریان برای دبی 28/5 لیتر بر ثانیه

### منابع

اسمعیلی ورکی، م و صفررضوی زاده، م. 1392. بررسی مشخصات هیدرولیکی جریان بر روی سرریزهای کنگره‌ای با پلان نیم‌دایره‌ای، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). 1: 27-234.

شفاعت‌طلب دهقانی، ح، اسمعیلی ورکی، م و اشرف‌زاده، ا. 1395. مطالعه آزمایشگاهی تاثیر تراز پایاب بر ضریب دبی جریان در سرریزهای کنگره‌ای با پلان ذوزنقه‌ای، نشریه تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی. 63: 63-80.

ضمیری، ا، کرمی، ح و فرزین، س. 1395. مطالعه عددی سرریز کنگره‌ای با استفاده از مدل آشفتگی RNG، پانزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، 24 و 25 آذر، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین.

فرزین، س، کرمی، ح و ضمیری، ا. 1395. مطالعه جریان عبوری از سد لاستیکی با به‌کارگیری هیدرودینامیک محاسباتی، نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق‌آبی. 9: 3-12.

نیک پیک، پ و کاشفی پور، س. م. 1395. تاثیر شرایط هیدرولیکی و هندسه سرریز در مدل‌سازی ریاضی ضریب دبی سرریزهای نوک-اردکی و مایل، نشریه علوم و مهندسی آبیاری. 1: 1-10.

### نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، مدل‌سازی سرریز کنگره‌ای با استفاده از سه مدل آشفتگی (LES و k-ε، RNG k-ε) با هدف انتخاب بهترین مدل آشفتگی و تخمین پارامترهای هیدرولیکی جریان انجام شد. با استفاده از معیارهای آماری ارزیابی، مدل آشفتگی RNG بهترین تطابق را بین مقادیر عددی و آزمایشگاهی داشت. سپس، با افزایش ضخامت بدنه سرریز، تاثیر این عامل در تعیین ضریب دبی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد افزایش 50 درصدی ضخامت بدنه سرریز، به‌طور متوسط 8/22 درصد از مقدار ضریب دبی می‌کاهد. در ادامه، شکل تاج مورد استفاده در سرریز نیز به‌عنوان عاملی موثر بر مقدار ضریب دبی شناخته و بررسی شد. مقدار متوسط ضریب دبی در سرریز با تاج نیم-دایره شکل، حدود 5/2 درصد بیش‌تر از ضریب دبی در سرریز با تاج ربع‌دایره می‌باشد. نتایج حاصل از بررسی عمق جریان عبوری از سرریز و سرعت متوسط جریان نیز در دو حالت سرریز با ضخامت 38/1 و 57/15 سانتی‌متر، بیانگر آن بود که افزایش ضخامت دیواره سرریز کنگره‌ای، سبب افزایش عمق و سرعت جریان عبوری از سرریز شده است و همین امر موجب کاهش مقدار ضریب دبی گردیده است.

- Journal of Advance in Agriculture and Biology. 2.1: 1-7.
- Noori,B.M., Aaref,N.T. 2017. Hydraulic Performance of Circular Crested Triangular Plan Form Weirs, Arabian Journal for Science and Engineering. 1-10.
- Payri,R., Tormos,B., Gimeno,J and Bracho,G. 2010. The potential of Large Eddy Simulation (LES) code for the modeling of flow in diesel injectors, Mathematical and Computer Modelling. 52.7:1151-1160.
- Sabbagh-Yazdi,S.R., Rostami,F and Mastorakis,N.E. 2007. Turbulent modeling effects on finite volume solution of three dimensional aerated hydraulic jumps using volume of fluid, In Proceedings of the 12<sup>th</sup> WSEAS International Conference on Applied Mathematics. Stevens Point, Wisconsin, USA. 168-174.
- 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.
- Suprpto,M. 2013. Increase spillway capacity using Labyrinth Weir, Procedia Engineering. 54: 440-446.
- Tullis,J.P., Amanian,N and Waldron,D. 1995. Design of labyrinth spillways. Journal of hydraulic engineering. 121.3: 247-255.
- Tullis,B.P., Young,J.C and Chandler,M.A. 2007. Head-discharge relationships for submerged labyrinth weirs. Journal of Hydraulic Engineering. 133.3: 248-254.
- Wormleaton,P.R and Tsang,C.C. 2000. Aeration performance of rectangular planform labyrinth weirs. Journal of environmental engineering. 126.5: 456-465.
- یوسفوند،ف، منعم،م.ج و کاویانپور،م.ر. 1394. ارزیابی آزمایشگاهی و تحلیلی ضریب دبی دریچه سالونی در شرایط جریان مستغرق، نشریه آبیاری و زهکشی ایران. 9.5: 819-811.
- Anderson,R.M and Tullis,B.P. 2012. Piano key weir hydraulics and labyrinth weir comparison. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 139.3: 246-253.
- Carollo,F.G., Ferro,V and Pampalone,V. 2011. Experimental investigation of the outflow process over a triangular labyrinth-weir, Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 138.1: 73-79.
- Crookston,B.M. 2010. Labyrinth Weirs. All Graduate Theses and Dissertations. Utah State University.
- Crookston,B.M and Tullis,B.P. 2012 a. Arced labyrinth weirs, Journal of Hydraulic Engineering. 138.6: 555-562.
- Crookston,B.M and Tullis,B.P. 2012 b. Hydraulic design and analysis of labyrinth weirs. I: Discharge relationships, Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 139.5: 363-370.
- Farzin,S., Karami,H., Zamiri,E and Nayyer,Sh. 2016. Three-dimensional modelling of flow over the cylindrical weir using Flow-3D software, 10<sup>th</sup> International River Engineering Conference, Shahid Chamran University, Ahwaz.
- Hager,W.H., Pfister,M and Tullis,B.P. 2015. Labyrinth Weirs: Developments Until 1985, In E-proceedings of the 36<sup>th</sup> IAHR World Congress.
- Hirt,C.W and Richardson,J.E. 1999. The modeling of shallow flows, Flow Science Technical. Notes. 48: 1-14.
- Mirnaseri,M and Emadi,A. 2014. Hydraulic performance of combined flow labyrinth weir-gate,

## Numerical Study of Effective Parameters in Hydraulic Performance of Flow over Labyrinth Weir

E. Zamiri<sup>1</sup>, H. Karami<sup>2</sup>, S. Farzin<sup>2\*</sup>

Received: May.13, 2017

Accepted: Jun.17, 2017

### Abstract

Labyrinth weir is one of the nonlinear hydraulic structures that its geometrical shape increases the discharge coefficient of flow over the weir. In this study, a labyrinth weir, located in a 14.6 m long channel, was simulated and verified using an experimental model with 6 different discharges ( $15 < Q < 600$  L/s) through Flow-3D software. K- $\epsilon$ , RNG k- $\epsilon$  and LES turbulence models were used to select the appropriate turbulence model for modeling of this labyrinth weir. Crest shape (half-round and quarter-round) and thickness of the weir wall were introduced and discussed as effective parameters on discharge coefficient. For evaluating the simulation accuracy, three statistical indices of  $R^2$ , RMSE and MAE were used. Results revealed that RNG k- $\epsilon$  presented the best responses for ratio of upstream head to weir height ( $H_T/p$ ). Based on the results, 50% increase in thickness of the weir wall led to 8.22% decrease in discharge coefficient. Also, discharge coefficient of labyrinth weir with half-round crest shape was about 5.22% more than that of labyrinth weir with quarter-round crest shape. Also, velocity and depth of flow over the labyrinth weir with 38.1 and 57.15 cm thick walls were evaluated. Results showed that increasing the thickness of weir wall increases the depth and velocity of flow over the weir and consequently the discharge coefficient decreases.

**Keywords:** Crest shape, Discharge coefficient, Flow-3D, Labyrinth weir, Thickness of weir wall, Turbulence model.

1- M.Sc. Student of Water Resources Engineering and Management, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

2- Assistant Professor, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

(\*-Corresponding Author Email: saeed.farzin@semnan.ac.ir)