

## ارائه معادله دبی برای سرریزهای جانبی مستطیلی و کنگره‌ای مثلثی

فاطمه عطارزاده<sup>۱</sup>، سعید رضا خداشناس<sup>۲\*</sup>، علی نقی ضیائی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۰/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۲۸

۱- کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: khodashenas@ferdowsi.um.ac.ir

### چکیده

یکی از راهکارهای مؤثر و اقتصادی جهت افزایش راندمان سرریزهای جانبی، استفاده از سرریزهای کنگره‌ای می‌باشد. در سرریزهای جانبی کنگره‌ای با تغییر هندسه پلان و افزایش طول سرریز، ظرفیت عبور جریان بیشتر می‌گردد. با توجه به پیچیده بودن محاسبات مربوط به تعیین معادله دبی سرریزهای جانبی کنگره‌ای، لازم است معادلات کاربردی در شرایط مختلف برای آن استخراج گردد. در این پژوهش معادله دبی برای سرریزهای جانبی مستطیلی در دو بازشدگی ۰/۳ و ۰/۵ و کنگره‌ای مثلثی با سه زاویه رأس ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه در سه بازشدگی ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۶ ارائه شده است. با مقایسه معادله استخراج شده با نتایج شبیه‌سازی شده، دقت رابطه ارائه شده در محدود ۱۵٪  $\pm$  به دست آمد که در کاربردهای عملی قابل قبول ارزیابی می‌شود. همچنین با توجه به نتایج برای سرریز جانبی کنگره‌ای به ازای یک بار آبی ثابت، با افزایش زاویه رأس سرریز، به علت کاهش طول مؤثر سرریز، دبی کاهش می‌یابد. از طرفی به ازای یک بار آبی ثابت، با کاهش بازشدگی سرریز، عرض مؤثر مجرای عبور جریان کاهش یافته و دبی کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: انسیس فلوننت، سرریز جانبی کنگره‌ای، مدل‌سازی آشفتگی، مدل‌سازی عددی، معادله دبی

## Developing a Discharge Equation for Rectangular and Triangular Labyrinth Side Weirs

F Attarzadeh<sup>1</sup>, SR Khodashenas<sup>2\*</sup>, AN Ziaei<sup>3</sup>

Received: January 18, 2016

Accepted: May 18, 2019

<sup>1</sup>M.Sc., Water Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

<sup>2</sup> Prof., Water Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

<sup>3</sup>Assoc. Prof., Water Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

\*Corresponding Author, Email: khodashenas@ferdowsi.um.ac.ir

### Abstract

Side weirs are among important hydraulic structures that used in various projects such as water conveyance, flood control, and diversion of excess water in sewer networks. One of the most effective and economical ways to increase the efficiency of these weirs is application of labyrinth side weir. Using labyrinth side weirs, the flow discharge is increased by changing the plan geometry and increasing the weir length. Due to complicated calculations related to the determination of the discharge equation for Labyrinth side weirs, extracting simple discharge relation for different conditions is necessary. Therefore, in this study, the discharge relations for rectangular side weirs having two opening values of 0.3, 0.5 m and for labyrinth side weirs having 90, 60 and 45 apex angle with opening values of 0.3, 0.5 and 0.6 m were extracted. Comparison of the simulation results with these relations indicated that the accuracy of the relations was within  $\pm 15\%$  which was acceptable for practical purposes. Also due to the results of labyrinth side weir, with decreasing the weir effective length, the flow discharge reduced when the apex angle of labyrinth side weir was increased for a constant water head. Decreasing the effective width also caused the flow discharge to be reduced when opening was decreased for a constant water head.

**Keywords:** ANSYS Fluent, Discharge equation, Labyrinth side weir, Numerical modeling, Turbulence modeling.

### مقدمه

سرریزهای جانبی کنگره‌ای در مقایسه با سرریزهای جانبی مستطیلی بیشتر است. رفتار هیدرولیکی جریان در سرریزهای جانبی از نوع متغیر مکانی با کاهش دبی می‌باشد و تحلیل آن نسبتاً پیچیده است. دیمارچی (۱۹۳۴) برای اولین بار معادله جریان متغیر مکانی با کاهش دبی را با فرض ثابت بودن انرژی در طول سرریز، برای کانال‌های افقی مستطیلی با صرف‌نظر از اصطکاک حل نمود. سابرامانیا و آواستی (۱۹۷۲) با ثابت در نظر گرفتن تراز انرژی در امتداد سرریز جانبی، رابطه ضریب تخلیه سرریز جانبی ( $C_m$ ) را تابعی از عدد فرود پیشنهاد کردند. الخشاب و اسمیت (۱۹۷۶) با مطالعات آزمایشگاهی به این نتیجه رسیدند که

سرریزهای جانبی یکی از مهم‌ترین سازه‌های هیدرولیکی می‌باشد که به منظور آگیری کانال‌های فرعی از کانال اصلی، انحراف آب مازاد به سیستم‌های جمع‌آوری فاضلاب شهری و نیز به عنوان سازه اضطراری در تأسیسات آبی بزرگ مانند سدها و شبکه‌های آبیاری و زهکشی برای کنترل سیلاب و محافظت از سازه‌های پایین دست به کار برده می‌شود. سرریزهای جانبی کنگره‌ای یکی از انواع سرریزهای جانبی می‌باشند که محور تاج آن‌ها غیرخطی بوده و در یک بازشدگی معین، دارای طول تاج بیشتری می‌باشند. بنابراین در شرایط یکسان ارتفاع جریان، دبی عبوری از

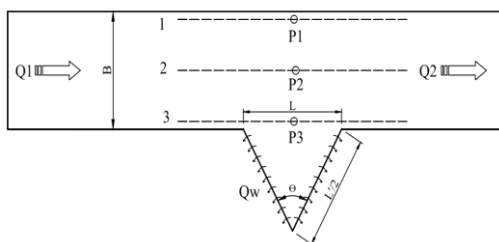
فرض ثابت بودن انرژی در طول سرریز فرض صحیحی نیست. سینگ و همکاران (۱۹۹۴) ضریب شدت جریان را تابعی از عدد فرود جریان در بالادست سرریز جانبی در کانال اصلی ( $Fr_1$ ) و نسبت ارتفاع سرریز به عمق جریان بالادست سرریز ( $\frac{w}{y_1}$ ) در نظر گرفتند. برقی و همکاران (۱۹۹۹)، بیان کردند که علاوه بر  $Fr_1$ ، دو پارامتر  $\frac{w}{y_1}$  و نسبت بازشدگی به عرض کانال ( $\frac{L}{B}$ ) نیز بر روی ضریب تخلیه سرریز جانبی ( $C_m$ ) موثر می‌باشند. اولین تحقیق جدی بر روی سرریزهای جانبی کنگره‌ای توسط برقی و همکاران (۲۰۱۳) انجام شد. امیراغلو و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی سرریزهای جانبی تک‌منقاری در کانال‌های مستطیلی پرداختند. ایشان ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای را تابعی از پارامترهای  $Fr_1$ ،  $\frac{L}{B}$ ،  $\frac{w}{y_1}$  زاویه رأس سرریز ( $\theta$ ) و نسبت بازشدگی به طول موثر سرریز ( $\frac{L}{l}$ ) در نظر گرفتند. خامنه و همکاران (۲۰۱۴) نیز تاثیر پارامترهای مختلف هندسی و هیدرولیکی را بر روی ضریب تخلیه سرریز جانبی ( $C_m$ ) در سرریزهای جانبی نیم‌دایره‌ای مورد بررسی قرار دادند و روابط جدیدی را برای برآورد  $C_m$  ارائه کردند. اسماعیل‌پور و همکاران (۲۰۱۶) ضریب دبی و پروفیل سطح آب در سرریز جانبی کنگره‌ای نیم‌دایره‌ای یکطرفه تحت شرایط جریان زیربحرانی را مورد بررسی قرار دادند.

امروزه با پیشرفت در محاسبات کامپیوتری، از مدل‌های عددی در شبیه‌سازی جریان، به دلیل محدودیت‌ها و هزینه‌های بالای آزمایشگاه و نیز صرفه‌جویی در زمان استفاده می‌گردد. ورجاوند و همکاران (۲۰۱۰) جریان در سرریز جانبی را با استفاده از مدل‌های عددی به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی کردند. نتایج پژوهش ایشان نشان داد که مدل  $k-\varepsilon$  standard برای فشار هیدرواستاتیکی و مدل  $k-\varepsilon$  RNG برای پروفیل سطح آب تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند. آیدین (۲۰۱۲) جریان سطحی آزاد بر روی سرریز جانبی را با استفاده از نرم افزار FLUENT شبیه‌سازی نمود و مدل‌های آشفتگی مختلف RSM، Spalart-Allmaras،  $k-\varepsilon$  standard،  $k-\varepsilon$  RNG

realizable  $k-\varepsilon$  و  $k-\omega$  را برای شبیه‌سازی سطح آب استفاده کرد. نتایج ایشان نشان داد که کلیه مدل‌ها، جریان را به‌خوبی مدل‌سازی نموده‌اند و مدل RSM دارای دقت بالاتری در تعیین نوسانات و گردابه‌ها در نزدیکی سرریز است. آیدین و امیراغلو (۲۰۱۳) کارآیی شبیه‌سازی عددی را در تعیین رفتار هیدرولیکی جریان در نزدیکی سرریز جانبی منقاری مورد تایید قرار دادند. بیحقی‌کندری (۲۰۱۳)، جریان پیرامون یک سرریز جانبی کنگره‌ای را با استفاده از نرم‌افزار Fluent به‌صورت سه‌بعدی با استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی (خامنه، ۲۰۱۴) شبیه‌سازی نمود. روش حجم سیال (VOF) برای شبیه‌سازی سطح مشترک و معادلات آرام و متلاطم ( $k-\varepsilon$  standard،  $k-\varepsilon$  RNG،  $k-\varepsilon$  realizable و  $k-\omega$ )، برای مدل‌سازی عبارت تنش رینولدز استفاده شده است. بررسی‌های او نشان داد که کلیه مدل‌ها تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند اما نتایج مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  Standard مناسب‌تر است. همچنین در این مطالعه با استفاده از داده‌های به دست آمده از شبیه‌سازی، روابطی برای ضریب تخلیه سرریز جانبی ( $C_m$ ) ارائه شده است. با بررسی مطالعات پیشین مشخص شد که بیشتر روابط به‌دست آمده برای سرریزهای جانبی مربوط به ضریب تخلیه سرریز می‌باشد و معادله دبی برای سرریزهای جانبی کمتر ارائه شده است. اما با توجه به اهمیت این سرریزها در شبکه‌های انتقال آب و کنترل سیلاب، به‌نظر می‌رسد که ارائه یک معادله دبی کاربردی برای این سازه بسیار حائز اهمیت باشد. اصولاً ویژگی‌های دبی هر سازه توسط شکل و مقطع هندسی آن تعیین می‌گردد و طراح می‌تواند سازه‌ای را انتخاب نماید که رابطه مناسبی بین دبی و سایر پارامترها در هر حالت به‌منظور تعیین نیازهای اجرایی در مدت زمان انحراف و تقسیم جریان با رقوم تراز بالادست جریان داشته باشد.

تاکنون پژوهشگران معادلات دبی مختلفی با به کار بردن روش‌های مختلف برای انواع سرریزها

مدل آزمایشگاهی، یک کانال مستطیلی به طول ۱۰ متر، عرض ۰/۳ متر و ارتفاع ۰/۵ متر می‌باشد که سرریز جانبی در ۵ متری از ابتدای کانال اصلی قرار دارد. شکل ۱ پلان سرریز جانبی کنگره‌ای و محل‌های برداشت پروفیل سطح آب را نشان می‌دهد. در تمامی مدل‌ها عدد رینولدز در حدود ۴۴۰۰۰ و عدد فرود در محدوده ۰/۳-۰/۶ می‌باشد. حالت‌های انتخابی به منظور شبیه‌سازی عددی در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین جداول ۲ و ۳ نمونه‌ای از داده‌های مورد استفاده برای صحت‌سنجی مدل عددی، شامل مقادیر دبی ورودی ( $Q_1$ )، دبی خروجی ( $Q_2$ )، دبی عبوری از روی سرریز جانبی ( $Q_w$ ) و پروفیل سطح آب را نشان می‌دهد.



شکل ۱- پلان سرریز جانبی کنگره‌ای و محل‌های برداشت پروفیل سطح آب.

جدول ۱- حالت‌های مورد بررسی در شبیه‌سازی عددی.

نوع سرریز	ارتفاع سرریز (m)	بازشدگی (m)	دبی جریان ( $L s^{-1}$ )
کنگره‌ای- ۹۰ درجه	۰/۱	۰/۳, ۰/۵, ۰/۶	۲۶-۱۱
کنگره‌ای- ۶۰ درجه	۰/۱	۰/۳, ۰/۵, ۰/۶	۲۶-۱۱
کنگره‌ای- ۴۵ درجه	۰/۱	۰/۳, ۰/۵, ۰/۶	۲۶-۱۱
مستطیلی	۰/۱	۰/۳, ۰/۵	۲۶-۱۱

جدول ۲- مقادیر ارتفاعی سطح آب در سه خط سرریز جانبی کنگره‌ای ۹۰ درجه (خامنه، ۲۰۱۴).

فاصله طولی از ابتدای سرریز جانبی کنگره‌ای (cm)	بالادست سرریز		پایین‌دست سرریز					
	-۲۰	-۱۰	۰	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰
ارتفاع سطح آب در نزدیکی سرریز جانبی (cm)	۱۳/۸۰	۱۳/۸۰	۱۳/۵۰	۱۳/۰۵	۱۳/۶۵	۱۴/۵۵	۱۴/۲۵	۱۴/۲۵
ارتفاع سطح آب در خط مرکزی کانال (cm)	۱۳/۸۰	۱۳/۸۰	۱۳/۷۰	۱۳/۸۰	۱۴/۰۰	۱۴/۱۵	۱۴/۲۰	۱۴/۲۰
ارتفاع سطح آب در نزدیک دیواره کانال (cm)	۱۳/۹۰	۱۳/۹۰	۱۳/۸۰	۱۳/۹۰	۱۴/۰۵	۱۴/۱۵	۱۴/۲۵	۱۴/۲۵

استخراج کرده‌اند. فرو (۲۰۰۰) معادله دبی را برای جریان عبوری از رو و زیر دریچه کشوئی با استفاده از نظریه باکینگهام ارائه کرد. قدسیان (۲۰۰۴) با کاربرد نظریه باکینگهام معادله دبی برای سرریزهای کنگره‌ای مثلثی استخراج کرد. او در تحقیق خود، ضریب دبی را تابعی از نسبت بار کل آب روی سرریز به ارتفاع سرریز، نسبت طول به عرض سرریز و شکل تاج سرریز در نظر گرفت. کارلو و همکاران (۲۰۱۲) با بررسی پارامترهای بی‌بعد مؤثر بر جریان روی سرریز لبه‌تیز مثلثی کنگره‌ای، نسبت دبی سرریز کنگره‌ای به سرریز خطی را تابعی از نسبت عمق آب روی سرریز به عرض تک‌سیکل سرریز و نسبت طول مؤثر سرریز به عرض تک‌سیکل در نظر گرفتند. عطارزاده و همکاران (۲۰۱۶) معادله دبی سرریزهای جانبی کنگره‌ای تنها برای یک بازشدگی ارائه کردند. هدف از این تحقیق، ارائه روابط کاربردی دبی برای سرریز جانبی مستطیلی و کنگره‌ای در شرایط مختلف می‌باشد. با توجه به محدودیت کارهای آزمایشگاهی و نبود داده‌های آزمایشگاهی کافی برای استخراج معادلات دبی در پژوهش‌های پیشین (برقعی و همکاران (۲۰۱۳))، امیراغلو و همکاران (۲۰۱۰) و خامنه (۲۰۱۴))، از نتایج شبیه‌سازی عددی جریان بر روی سرریزهای جانبی کنگره‌ای و مستطیلی به‌ازای زوایه‌های رأس سرریز، بازشدگی‌ها و محدوده دبی‌های مختلف استفاده شد.

### مواد و روش‌ها

در این تحقیق به‌منظور صحت‌سنجی مدل عددی از نتایج آزمایشگاهی خامنه (۲۰۱۴) که در گروه مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد انجام گرفت، استفاده شد.

جدول ۳- مقادیر دبی جریان در سرریز جانبی کنگره ای ۹۰ درجه (خامنه، ۲۰۱۴).

$Q_1$	$Q_2$	$Q_w$
(L s <sup>-1</sup> )	(L s <sup>-1</sup> )	(L s <sup>-1</sup> )
۲۰/۱۳	۱۳/۲۲۱	۶/۹۱۶

جریان حاکم بر روی سرریز، با استفاده از مدل آرام و مدل‌های آشفتگی ( $k-\epsilon$  standard  $k-\epsilon$ ، RNG  $k-\epsilon$ ، realizable  $k-\epsilon$  و  $k-\omega$ ) شبیه‌سازی گردید. هم‌چنین گام زمانی به صورت متغیر و حد مجاز خطاهای پیوستگی و اندازه حرکت مقدار ۰/۰۰۱ در نظر گرفته شد. برای استخراج مقادیر درست داده‌های یک مدل عددی یا آزمایشگاهی، رسیدن جریان به یک حالت پایدار ضروری است. بنابراین به منظور کنترل ماندگار شدن جریان در مدل عددی دو معیار مدنظر قرار گرفت، اول اینکه دبی ورودی به مدل و خروجی از آن برابر شوند و دوم اینکه تغییرات پروفیل سطح آب نسبت به زمان ناچیز باشد. این شبیه‌سازی در آزمایشگاه محاسبات سنگین دانشگاه فردوسی مشهد انجام گردید.

**هندسه جریان و شبکه محاسباتی**

هندسه و شبکه جریان در نرم‌افزار Gambit تولید شد. نوع شبکه به صورت شبکه سازمان‌یافته انتخاب گردید. برای به دست آوردن اثر شبکه محاسباتی بر شبیه‌سازی جریان، انواع اندازه شبکه محاسباتی (اندازه شبکه بین ۱۰۰ هزار تا ۷۰۰ هزار) در شرایط یکسان هندسی و هیدرولیکی در نظر گرفته شد و حساسیت‌سنجی شبکه تا رسیدن به نتایج ثابت و بدون تغییر انجام گردید. شکل ۲ نمونه‌ای از شبکه محاسباتی تولید شده با ۵۰۰ هزار سلول را نشان می‌دهند.

معادلات حاکم بر جریان، معادلات ناویر-استوکس می‌باشد که برای جریان تراکم ناپذیر به صورت زیر نوشته می‌شود:

بقای جرم: معادله پیوستگی

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

بقای مومنتوم: معادلات ناویر استوکس

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P_s}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \rho g_j + F_j \tag{2}$$

که  $u_i$  مؤلفه سرعت در جهت  $x_i$ ،  $u_j$  مؤلفه سرعت در جهت  $x_j$ ،  $\rho$  چگالی سیال،  $\mu$  لزوجت دینامیکی سیال،  $P_s$  فشار در هر نقطه از سیال و  $F_j$  نیروهای جسمی غیر از نیروی ثقل می‌باشد.

در این تحقیق به منظور شبیه‌سازی عددی جریان بر روی سرریز جانبی از نرم‌افزار ANSYS FLUENT 16.0 استفاده شده است. جریان به صورت غیرماندگار<sup>۱</sup> مدل‌سازی گردید. دیگر شرایط و پیش‌فرض‌های مربوط به مدل‌سازی جریان در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴- شرایط و پیش‌فرض‌های مدل‌سازی جریان.

شرایط	روش
سطح آزاد جریان	روش حجم سیال (VOF)
ترکیب فشار-سرعت	روش پیزو (PISO)
گسسته‌سازی فشار	طرح پرستو (PRESTO)
گسسته‌سازی مومنتوم	روش قانون توانی <sup>۲</sup>
گسسته‌سازی عبارت‌های انرژی جنبشی آشفتگی	روش قانون توانی
گسسته‌سازی نرخ استهلاك آشفتگی	روش قانون توانی

<sup>2</sup> Power Law

<sup>1</sup> Unsteady

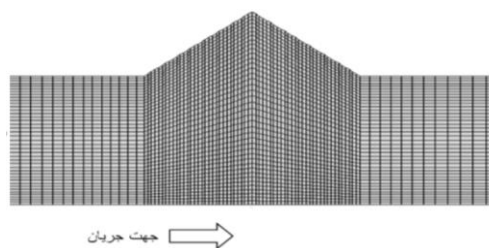
ثقل و  $S_0$  شیب طولی کانال می‌باشد. با توجه به اهمیت بازشدگی سرریز در دبی عبوری از روی سرریز جانبی کنگره‌ای، متغیرهای مستقل تکرارشونده شامل  $Q_{in}$   $L$  و  $\rho$  در نظر گرفته شد. بر اساس نظریه  $\pi$  باکینگهام، پارامترهای بدون بعد مؤثر بر دبی عبوری از روی سرریز جانبی کنگره‌ای عبارتند از:

$$Q_w = f\left(\sin\left(\frac{\theta}{2}\right), \frac{B}{L}, \frac{h_1}{L}, \frac{h_2}{L}, \frac{w}{L}, \frac{L'}{L}, Fr_1, Re, S_0\right) \quad [4]$$

در رابطه فوق  $Fr_1$  عدد فرود در بالادست سرریز و  $Re$  عدد رینولدز معرف اثر لزجت می‌باشد. با توجه به متلاطم بودن جریان می‌توان از اثر لزجت چشم‌پوشی کرد. همچنین  $S_0$  از رابطه ۴ حذف می‌گردد، زیرا شیب کف کانال در جریان زیربحرانی تأثیر چندانی ندارد و قابل چشم‌پوشی می‌باشد (برقی و همکاران ۱۹۹۹). از نظر هندسی  $\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{L'}{L}$  می‌باشد. بنابراین می‌توان رابطه اخیر را به صورت زیر نوشت:

$$Q_w = f\left(\frac{B}{L}, \frac{h_1}{L}, \frac{h_2}{L}, \frac{w}{L}, \frac{L'}{L}, Fr_1\right) \quad [5]$$

با توجه به داده‌های موجود برای استخراج رابطه دبی که در آن ارتفاع سرریز ( $w$ ) و عرض کانال اصلی ( $B$ ) بدون تغییر است، پارامترهای  $\left(\frac{B}{L}\right)$  و  $\left(\frac{w}{L}\right)$  حذف گردید. همچنین به منظور سهولت در استفاده از معادله دبی و نیز اهمیت تراز سطح آب در بالادست سرریز ( $h_1$ )، از تأثیر مقدار تراز آب در پایین‌دست سرریز ( $h_2$ ) و اعمال پارامتر  $\left(\frac{h_2}{L}\right)$  در معادله دبی صرف‌نظر شده است. بنابراین از آنجایی که هدف به‌دست آوردن معادله‌ای کاربردی برای معادله دبی هر دو سرریز جانبی کنگره‌ای و مستطیلی می‌باشد، پارامترهای بی‌بعد  $\frac{h_1}{L}$ ،  $\frac{L'}{L}$ ،  $Fr_1$  به عنوان پارامتر مؤثر بر معادله دبی سرریزهای جانبی انتخاب گردید. همچنین با فرض عبور جریان بحرانی در نزدیکی سرریز، رابطه بین دبی عبوری از سرریز  $Q_w$  با دبی بحرانی  $Q_c$  و پارامترهای بی‌بعد مؤثر بر دبی عبوری از سرریز به‌دست می‌آید. دبی بحرانی از رابطه زیر به‌دست می‌آید:



شکل ۲- اندازه شبکه محاسباتی در محدوده سرریز جانبی کنگره‌ای

### شرایط مرزی و اولیه

در ابتدای کانال بالادست، شرط مرزی سرعت ثابت<sup>۳</sup> در نظر گرفته شد. در شرط مرزی سرعت ثابت یک بازشدگی به اندازه ارتفاع ورودی آب ایجاد گردیده و بالای این ورودی تا سقف کانال یک دیوار ایجاد شد. سرعت ورودی در این مقطع برابر سرعت متوسط جریان (مقادیر آزمایشگاهی) تنظیم گردید. در خروجی انتهای کانال اصلی از شرط مرزی خروجی فشار<sup>۴</sup>، با قرار دادن یک سرریز انتهایی مستطیلی لبه‌تیز در پایین‌دست کانال و شرایط فشار صفر بر روی این سرریز استفاده شد. بر روی سرریز جانبی شرط مرزی با فشار صفر و همچنین برای سقف کانال اصلی از شرط مرزی خروجی فشار با قرار دادن فشار صفر استفاده گردید. برای کف کانال و دیواره‌های کانال اصلی دیواره ثابت<sup>۵</sup> انتخاب و در نهایت شرایط اولیه صفر برای تمامی مقادیر میدان محاسباتی اعمال شد.

### تحلیل ابعادی

به‌طور کلی مجموعه پارامترهای مؤثر بر دبی عبوری از سرریز جانبی کنگره‌ای،  $Q_w$  در کانال‌های مستقیم به‌صورت زیر می‌باشد:

$$Q_w = f\left(\sin\left(\frac{\theta}{2}\right), L, B, L', h_1, h_2, Q_{in}, w, \mu, \rho, g, S_0\right) \quad [3]$$

که در آن  $\theta$  زاویه رأس سرریز،  $L$  عرض (بازشدگی) سرریز،  $B$  عرض کانال اصلی،  $L'$  طول مؤثر سرریز،  $h_1$  عمق آب در بالادست سرریز،  $h_2$  عمق آب در پایین‌دست سرریز،  $Q_{in}$  دبی جریان در بالادست سرریز،  $w$  ارتفاع سرریز،  $\mu$  لزجت دینامیکی،  $\rho$  جرم مخصوص،  $g$  شتاب

<sup>5</sup> Wall

<sup>3</sup> Velocity inlet

<sup>4</sup> Pressure Outlet

ب) مقایسه منحنی‌های دبی سرریز جانبی مستطیلی و کنگره‌ای برای سه زاویه رأس سرریز و سه بازشدگی

ج) استخراج معادلات دبی و در انتها با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، معادلات دبی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

ارزیابی مدل‌های عددی

برای بررسی نتایج مدل‌های عددی، مقادیر دبی ورودی ( $Q_1$ )، دبی خروجی ( $Q_2$ )، دبی عبوری از روی سرریز جانبی ( $Q_w$ ) و پروفیل سطح آب ( $WSP^6$ ) پیش‌بینی شده توسط مدل‌های آشفتگی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. در جداول ۵ و ۶ نتایج شبیه‌سازی جریان با مدل آرام و مدل‌های آشفتگی نشان داده شده است. شکل ۱ محورهای مقایسه پروفیل‌های سطح آب در نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. آکرز (۱۹۵۷) مقادیر مختلفی را برای ضریب دبی در حالتی که عمق آب در فاصله‌ای دور از سرریز جانبی (در نزدیکی دیواره کانال روبروی سرریز جانبی) و نیز برای حالتی که عمق آب در روی سرریز جانبی اندازه‌گیری شود، پیشنهاد نمود. بنابراین در این پژوهش نیز پروفیل‌های سطح آب در سه محور نزدیک سرریز، وسط کانال اصلی و نزدیک به دیواره کانال برای مدل‌های عددی مختلف با پروفیل سطح آب در آزمایشگاه مطابق شکل ۳ رسم و مقایسه شده است.

$$Q_c = L\sqrt{y_c^3 g} \quad [6]$$

که در رابطه ۶،  $y_c$  عمق بحرانی جریان در نقطه  $P_1$  برای محور ۱، در نقطه  $P_2$  برای محور ۲ و در نقطه  $P_3$  برای محور ۳ در شکل ۱ می‌باشد. اگر چه ممکن است معادله ۶ و فرضیات مربوط به آن کمی با واقعیت فاصله داشته باشد، اما به منظور ساده‌سازی مسئله و ارائه یک رابطه کاربردی در کانال‌های آبیاری برای معادلات از یک سری فرضیات استفاده می‌شود [نیکو و همکاران، ۲۰۱۸؛ فنتون، ۲۰۱۶]

شاخص‌های آماری

به منظور تعیین میزان دقت روابط به دست آمده، از پارامترهای آماری درصد خطای نسبی (RE)، درصد متوسط خطای نسبی (MRE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تبیین  $R^2$  استفاده شد.

$$RE = \frac{x_{mes} - x_{cal}}{x_{mes}} \times 100 \quad [7]$$

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_{mes} - x_{cal}}{x_{mes}} \right| \times 100 \quad [8]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{mes} - x_{cal})^2}{n}} \quad [9]$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_{mes} - x_{cal})^2}{\sum_{i=1}^n (x_{cal} - \bar{x}_{mes})^2} \quad [10]$$

که در آن  $x_{mes}$  یک داده مشاهداتی،  $x_{cal}$  یک داده محاسباتی و  $\bar{x}_{mes}$  میانگین داده‌های مشاهداتی است.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از این پژوهش در سه بخش به صورت زیر ارائه می‌گردد:

الف) ارزیابی مدل‌های عددی و انتخاب بهترین روش عددی برای شبیه‌سازی جریان بر روی سرریز جانبی

جدول ۵- نتایج شبیه‌سازی مقادیر دبی در مدل‌های عددی مختلف برای سرریز کنگره‌ای با زاویه رأس ۹۰ درجه.

مدل	$Q_1$ (L s <sup>-1</sup> )	$Q_2$ (L s <sup>-1</sup> )	$Q_w$ (L s <sup>-1</sup> )	RE ( $Q_1$ ) (%)	RE ( $Q_2$ ) (%)	RE ( $Q_w$ ) (%)
Exp.	۲۰/۱۳	۱۳/۲۲۱	۶/۹۱۶	-	-	-
Laminar	۲۰/۱	۱۳/۱۱۲	۶/۹۸۷	۰/۱۷۹	۰/۸۱۸	-۱/۰۲۸
Standard-k-ε	۲۰/۱	۱۳/۲۳۳	۶/۸۶۶	۰/۱۷۹	-۰/۰۹۱	۰/۷۲۲
RNG-k-ε	۲۰/۱	۱۳/۰۲۶	۷/۰۷۳	۰/۱۷۹	۱/۴۶۹	-۲/۲۷۳

<sup>6</sup> Water Surface Profile

Realizable-k-ε	۲۰/۱	۱۲/۹۳۲	۷/۱۶۷	-۰/۱۷۹	۲/۱۸۲	-۲/۶۳۷
k-ω	۲۰/۱	۱۳/۲۳۵	۶/۸۶۴	-۰/۱۷۹	-۰/۱۰۵	-۰/۷۵۱

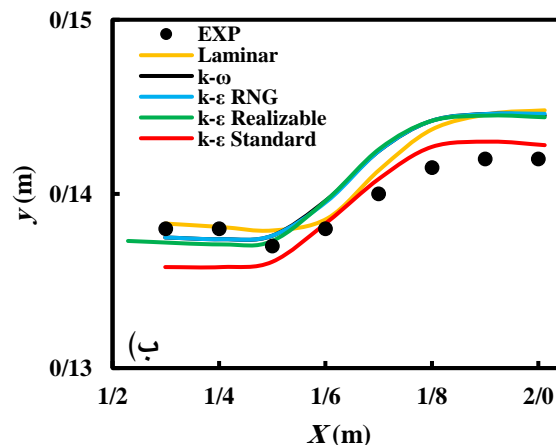
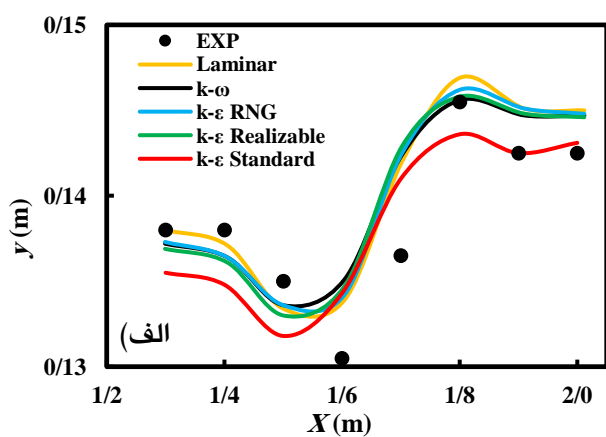
جدول ۶- نتایج شبیه‌سازی پروفیل سطح آب مدل‌های عددی مختلف برای سرریز کنگره‌ای با زاویه رأس ۹۰ درجه.

مدل عددی	محور مجاور دیواره‌ی کانال (محور ۱)			محور وسط کانال (محور ۲)			محور مجاور سرریز جانبی (محور ۳)		
	RMSE (m)	R <sup>2</sup>	MRE (WSP) (%)	RMSE (m)	R <sup>2</sup>	MRE (WSP) (%)	RMSE (m)	R <sup>2</sup>	MRE (WSP) (%)
Laminar	۰/۰۰۱۴	۰/۹۲	-۰/۵۲۳	۰/۰۰۱۷	۰/۹۹	-۰/۷۲۵	۰/۰۰۲۷	۰/۸۹	-۰/۹۵۲
Standard-k-ε	۰/۰۰۱۲	۰/۹۴	-۰/۴۲۲	۰/۰۰۱۳	۰/۹۶	-۰/۰۹۹	۰/۰۰۲۸	۰/۸۵	-۰/۱۴۷
RNG-k-ε	۰/۰۰۱۵	۰/۹۲	-۰/۶۴۴	۰/۰۰۱۹	۰/۹۶	-۱/۰۱۹	۰/۰۰۲۹	۰/۸۵	-۱/۰۵۵
Realizable-k-ε	۰/۰۰۱۵	۰/۹۲	-۰/۵۲۷	۰/۰۰۱۹	۰/۹۶	-۰/۹۳۸	۰/۰۰۳۱	۰/۸۱	-۰/۹۴۳
k-ω	۰/۰۰۱۵	۰/۹۳	-۰/۴۳۵	۰/۰۰۱۹	۰/۹۶	-۰/۸۰۴	۰/۰۰۳۰	۰/۸۳	-۰/۸۳۹

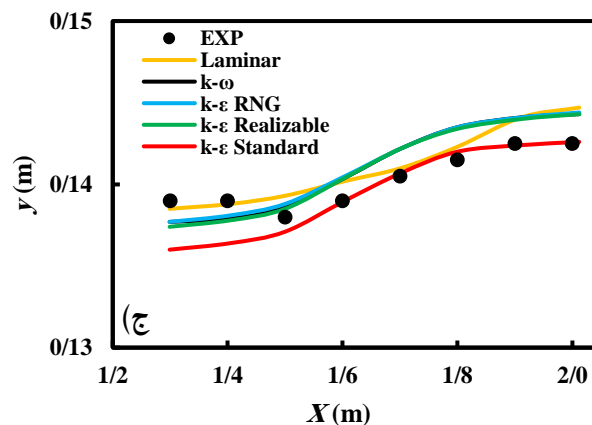
سطح آب کمتری می‌باشد. بنابراین در این پژوهش برای شبیه‌سازی جریان بر روی سرریز جانبی، مدل k-ε-Standard انتخاب شد.

در ادامه به منظور مقایسه منحنی‌های دبی سرریز جانبی مستطیلی و کنگره‌ای برای سه زاویه رأس و بازشدگی سرریز و نیز استخراج روابط کاربردی دبی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی جریان برای حالت‌های ذکر شده در جدول ۱ مورد استفاده قرار گرفت. همچنین مقادیر عمق آب در راستای قسمت میانی بازشدگی سرریز در هر سه محور نشان داده شده در شکل ۱ در نقاط  $P_1, P_2, P_3$  برداشت شد.

همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود مقدار دبی ورودی ( $Q_1$ ) برای تمامی مدل‌ها یکسان است زیرا مقدار عمق اولیه در ورودی کانال برای تمامی مدل‌ها یکسان و برابر ۰/۱۳۹ متر در نظر گرفته شد. با توجه به خطاهای به دست آمده در جداول ۵ و ۶ و پروفیل‌های سطح آب شکل ۳ مشخص شد که مقادیر شبیه‌سازی شده به مقادیر آزمایشگاهی بسیار نزدیک است و تمامی مدل‌ها برآورد مناسبی نسبت به مقادیر آزمایشگاهی می‌دهد. اما مدل k-ε-Standard با درصد خطای نسبی دبی سرریز ( $Q_w$ ) ۰/۷۲۲ و درصد خطای پروفیل سطح آب در سه محور ۱، ۲ و ۳ به ترتیب ۰/۴۲۲، ۰/۰۹۹ و ۰/۱۴۷ نسبت به بقیه مدل‌ها، دارای خطای دبی و پروفیل





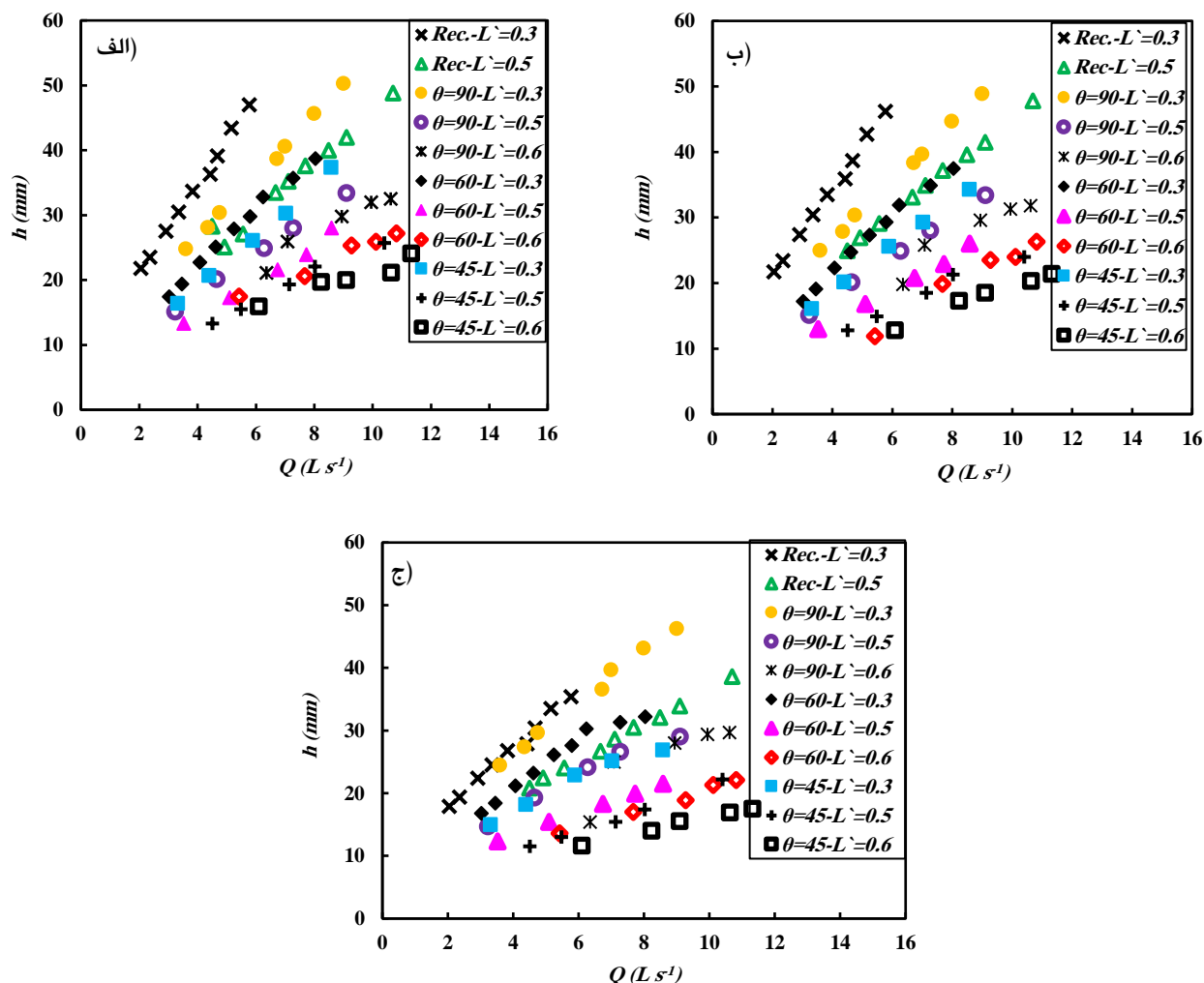


شکل ۳- پروفیل سطح آب در سرریز جانبی کنگره‌ای- الف) محور شماره ۳ نزدیک به سرریز، ب) محور شماره ۲ وسط کانال، ج) محور شماره ۱ نزدیک به دیواره کانال.

نوسان می‌نماید. اما تغییرات بار آبی در سرریز جانبی کنگره‌ای حالت غیر خطی دارد. دلیل این امر می‌تواند تداخل تیغه ریزشی جریان به دلیل غیرمستقیم بودن تاج سرریز در سرریزهای کنگره‌ای باشد. همچنین هر چه زاویه رأس سرریز کوچکتر می‌شود، نوسانات دبی به‌ازای تغییرات بار آبی بسیار بیشتر می‌گردد، یعنی با کاهش زاویه رأس سرریز، طول مؤثر سرریز بیشتر شده و در نتیجه با کمی افزایش در بار آبی، میزان دبی عبوری روی سرریز به شدت افزایش می‌یابد. زیرا با افزایش طول مؤثر جریان عبوری از روی سرریز، شدت حرکت‌های ثانویه ناشی از جریان‌های جانبی افزایش می‌یابد. در نتیجه افزایش جریان‌های ثانویه، موجب افزایش انرژی جنبشی و زاویه انحراف به سرریز جانبی می‌گردد (امیراغلو و همکاران ۲۰۱۰).

### مقایسه منحنی‌های دبی سرریز جانبی مستطیلی و کنگره‌ای

در این بخش منحنی‌های دبی سرریز جانبی کنگره‌ای با سه زاویه و بازشدگی مختلف با سرریز جانبی مستطیلی مقایسه گردیده است. با توجه به شکل ۴ ملاحظه می‌شود، برای سرریز جانبی کنگره‌ای به ازای یک بار آبی ثابت، با افزایش زاویه رأس سرریز، به علت کاهش طول مؤثر سرریز، دبی کاهش می‌یابد. اما در مقایسه با سرریز جانبی مستطیلی دبی آن بیشتر می‌باشد. همچنین به‌ازای یک بار آبی ثابت، با کاهش بازشدگی سرریز، عرض مؤثر مجرای عبور جریان کاهش یافته و دبی کاهش می‌یابد. از طرفی رفتار تغییرات بار آبی در سرریز جانبی مستطیلی، حالت نسبتاً خطی دارد و با افزایش بار آبی، دبی در یک محدوده معینی



شکل ۴- منحنی دبی سرریز جانبی مستطیلی و کنگره‌ای برای سه زاویه رأس سرریز و بازشدگی‌های مختلف با محل برداشت عمق آب در الف) مجاور دیواره کانال (نقطه  $P_1$ ) ب) وسط کانال (نقطه  $P_2$ ) ج) مجاور سرریز جانبی (نقطه  $P_3$ ).

### استخراج روابط دبی

به منظور بررسی تاثیر هر یک از پارامترهای موثر بر رابطه دبی سرریز، آنالیز حساسیت انجام شد. بدین صورت که ابتدا رابطه دبی، تابعی از هر سه پارامتر  $\frac{h_1}{L}, \frac{L'}{L}, Fr_1$  (مانند رابطه ۱۳) در نظر گرفته شد و مقدار دبی برآورد شده از معادله دبی با مقدار دبی اندازه‌گیری شده عبوری از سرریز مقایسه گردید. سپس یکی از پارامترهای بی‌بعد حذف شده و رابطه دبی به صورت تابعی از پارامترهای بی‌بعد باقی‌مانده در نظر گرفته شد. بدین ترتیب با حذف هر یک از پارامترهای موثر در معادله دبی سرریز جانبی، معیارهای خطا به دست آورده شد که در جدول ۷ نشان داده شده است. افزایش یافتن خطا

در اثر حذف کردن یک پارامتر و ارائه رابطه براساس پارامترهای باقی‌مانده، درجه اهمیت آن پارامتر را در مدل‌سازی نشان می‌دهد. بنابراین پارامتری بیشترین درجه اهمیت را در مدل‌سازی دارد که در اثر حذف آن پارامتر، رابطه ارائه شده در برآورد دبی اندازه‌گیری شده عبوری از سرریز بیشترین خطا را داشته باشد (مهدوی میمند و همکاران ۲۰۱۵).

نتایج حاصل از تحلیل حساسیت در جدول ۷ نشان می‌دهد که پارامتر  $Fr_1$  و  $\frac{L'}{L}$  به ترتیب با  $0.9R^2$  و  $0.91$  و معیار  $RMSE$   $0.781$  و  $0.709$  بیشترین حساسیت و تأثیر را بر روی معادلات دبی داشته و درجه اهمیت تقریباً یکسانی دارند.

نشان داده شده در شکل ۱، روابط مربوط به دبی سرریزهای جانبی استخراج گردید. در این پژوهش تعداد ۶۹ مدل با سه زاویه رأس و بازشدگی برای دبی‌های مختلف شبیه‌سازی شد. بنابراین تعداد ۶۹ سری داده شامل دبی و پروفیل سطح آب استخراج گردید که به صورت تصادفی، ۷۰ درصد داده‌ها برای واسنجی مدل و ۳۰ درصد داده‌ها برای صحت‌سنجی مدل در نظر گرفته شد. روابط به دست آمده برای ۷۰ درصد داده‌ها (واسنجی مدل) و نیز پارامترهای آماری مربوط به هر یک در جدول ۸ ارائه شده است.

همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است، پروفیل سطح آب در سه محور نزدیک سرریز جانبی، وسط کانال اصلی و در مجاورت دیوار مقابل سرریز جانبی متفاوت می‌باشد. رقوم سطح آب در نزدیکی سرریز جانبی تحت تأثیر گردابه‌های شدید جریان آشفته، در مجاورت دیواره متأثر از دیواره کانال بوده و همچنین رقوم سطح آب در وسط کانال اصلی تحت تأثیر جدایش و انحنای جریان به کانال فرعی (آبگیر) قرار می‌گیرد. بنابراین رابطه دبی، برای هر سه محور نشان داده شده در شکل ۱، به دست آمده است.

در ادامه با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS و تحلیل رگرسیونی داده‌های تراز سطح آب در سه محور

جدول ۷- نتایج تحلیل حساسیت عوامل مؤثر بر معادله دبی سرریزهای جانبی مستطیلی و کنگره‌ای.

معیار خطا			پارامتر ورودی	پارامتر حذف شده
RMSE	MRE (%)	R <sup>2</sup>		
۰/۵۴۷	۷/۶۰۳	۰/۹۵	$Q_c, \frac{h_1}{L}, \frac{L'}{L}, Fr_1$	—
۰/۶۱۳	۹/۵۱۴	۰/۹۴	$Q_c, \frac{L'}{L}, Fr_1$	$\frac{h_1}{L}$
۰/۷۸۱	۱۱/۱۶	۰/۹۰	$Q_c, \frac{h_1}{L}, \frac{L'}{L}$	$Fr_1$
۰/۷۰۹	۱۰/۲۱	۰/۹۱	$Q_c, \frac{h_1}{L}, Fr_1$	$\frac{L'}{L}$

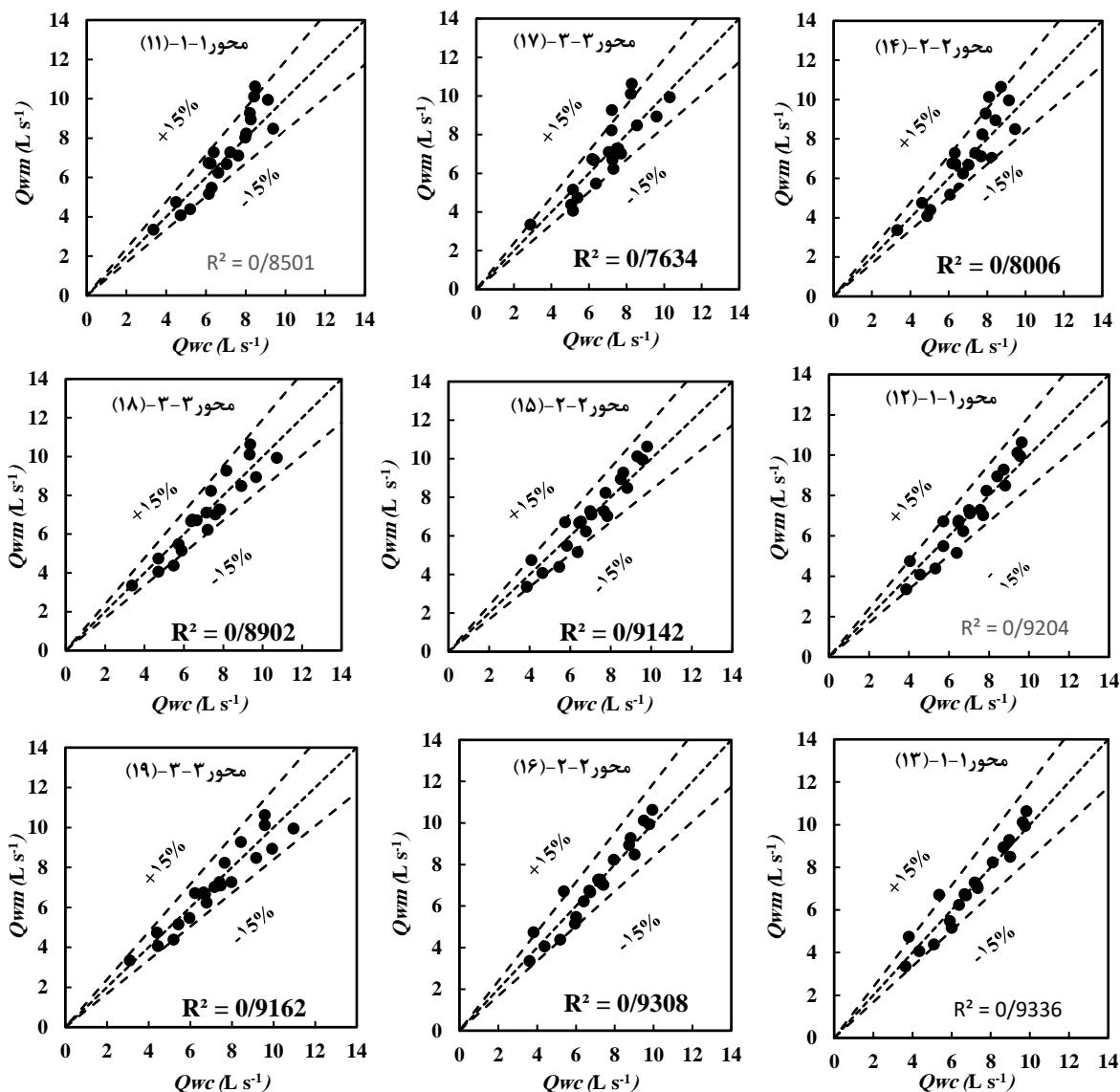
جدول ۸- تعیین پارامترهای آماری معادله دبی پیشنهادی به‌ازای برداشت عمق آب در سه محور شکل ۱ برای ۷۰ درصد داده‌ها.

R <sup>2</sup>	RMSE	رابطه	شماره	محل اندازه‌گیری عمق آب
۰/۸۹	۰/۸۴۰	$Q_w = 2.8 \left(\frac{L'}{L}\right) + 0.801 \left(L\sqrt{y_{CP1}^3 g}\right) - 3.444$	[۱۱]	
۰/۹۴	۰/۶۱۳	$Q_w = 12.132Fr_1 + 1.341 \left(\frac{L'}{L}\right) + 0.390 \left(L\sqrt{y_{CP1}^3 g}\right) - 3.795$	[۱۲]	محور ۱-۱
۰/۹۵	۰/۵۴۷	$Q_w = -0.026 \left(\frac{h_1}{L}\right) + 11.876Fr_1 + 1.264 \left(\frac{L'}{L}\right) + 0.377 \left(L\sqrt{y_{CP1}^3 g}\right) - 2.663$	[۱۳]	
۰/۸۶	۰/۹۲۴	$Q_w = 3.114 \left(\frac{L'}{L}\right) + 0.835 \left(L\sqrt{y_{CP2}^3 g}\right) - 3.956$	[۱۴]	
۰/۹۳	۰/۶۴۶	$Q_w = 12.532Fr_1 + 1.450 \left(\frac{L'}{L}\right) + 0.391 \left(L\sqrt{y_{CP2}^3 g}\right) - 4.054$	[۱۵]	محور ۲-۲

۰/۹۴	۰/۵۸۷	$Q_w = -0.027 \left(\frac{h_1}{L}\right) + 12.175 Fr_1 + 1.359 \left(\frac{L}{L}\right) + 0.383 \left(L\sqrt{y_{CP2}^3 g}\right) - 2.858$	[۱۶]
۰/۸۳	۰/۹۹۵	$Q_w = 2.999 \left(\frac{L}{L}\right) + 1.051 \left(L\sqrt{y_{CP3}^3 g}\right) - 3.901$	[۱۷]
۰/۹۳	۰/۶۵۱	$Q_w = 9.833 Fr_1 + 1.817 \left(\frac{L}{L}\right) + 0.727 \left(L\sqrt{y_{CP3}^3 g}\right) - 4.613$	[۱۸] محور ۳-۳
۰/۹۴	۰/۵۵۷	$Q_w = -0.031 \left(\frac{h_1}{L}\right) + 9.517 Fr_1 + 1.727 \left(\frac{L}{L}\right) + 0.711 \left(L\sqrt{y_{CP3}^3 g}\right) - 3.269$	[۱۹]

تمامی معادله‌ها در حدود  $\pm 15\%$  است. در جدول ۹ مقادیر خطای به دست آمده با ۳۰ درصد داده‌ها (واسنجی مدل) برای هر یک از معادله‌های پیشنهادی ارائه شده است.

در شکل ۵، همبستگی دبی اندازه‌گیری شده عبوری از روی سرریز  $Q_{wm}$  در مقابل دبی به دست آمده از معادله‌های پیشنهادی  $Q_{wc}$ ، به ازای ۳۰ درصد داده‌ها (صحت‌سنجی مدل) نشان داده شده است. خطای نسبی



شکل ۵- مقایسه دبی اندازه‌گیری شده در مقابل دبی محاسباتی (اعتبارسنجی مدل با ۳۰ درصد داده‌ها).

۶۰ و ۴۵ درجه و سه بازشدگی ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۶ متر انجام شد. سپس روابط مربوط به تراز سطح آب در سه محور شکل ۱، برای دبی سرریزهای جانبی مستطیلی و کنگره‌ای ارائه گردید که دارای دقت مناسبی در تعیین دبی بوده و کاربرد آن در شرایط عملی بسیار آسان است. همچنین منحنی دبی سرریز جانبی کنگره‌ای با سرریز جانبی مستطیلی مقایسه شد.

بر طبق بررسی‌های انجام شده ملاحظه گردید که:

(۱) با کاهش بازشدگی سرریز به ازای یک بار آبی ثابت، عرض موثر مجرای عبور جریان کاهش یافته و دبی کاهش می‌یابد.

(۲) همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود کلیه زاویه‌های رأس سرریز با بازشدگی‌های معین دارای نمودار دبی منحصر به فردی می‌باشند.

(۳) در این پژوهش پارامترهای بی‌بعد  $Fr_1$ ،  $\frac{L'}{L}$ ،  $\frac{h_1}{L}$  به‌عنوان پارامترهای مؤثر بر معادله دبی سرریزهای جانبی کنگره‌ای انتخاب گردید و روابط دبی به ازای تراز سطح آب در سه محور نشان داده شده در شکل ۱ استخراج گردید. رابطه دبی سرریز جانبی کنگره‌ای به ازای اندازه‌گیری عمق آب در محور نزدیک به دیواره کانال با  $RMSE=0/84$  و  $R^2=0/89$  (رابطه ۱۱)، بیشترین دقت را داراست. لذا در کارهای عملی، فقط با اندازه‌گیری عمق آب در راستای رأس سرریز، مجاور دیواره کانال اصلی می‌توان دبی سرریز جانبی کنگره‌ای را با دقت مطلوب برآورد نمود. این رابطه می‌تواند جایگزین روش‌های مرسوم فعلی با استفاده از معادله دیمارچی (۱۹۳۴) گردد.

#### سپاسگزاری

بدین‌وسیله از حمایت مالی شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی و نیز زحمات بی‌دریغ سرکار خانم مهندس ندا شیخ رضازاده نیکو قدردانی می‌گردد.

**جدول ۹- تعیین پارامترهای آماری معادله دبی پیشنهادی به ازای برداشت عمق آب در سه محور شکل ۱ برای ۳۰ درصد داده‌ها.**

محل اندازه‌گیری عمق آب	شماره معادله	RMSE	R <sup>2</sup>
محور ۱-۱	۱۱	۰/۹۴۱	۰/۸۰
	۱۲	۰/۶۱۰	۰/۹۲
	۱۳	۰/۵۲۷	۰/۹۳
محور ۲-۲	۱۴	۰/۹۳۴	۰/۸۰
	۱۵	۰/۶۳۳	۰/۹۱
	۱۶	۰/۵۳۸	۰/۹۳
محور ۳-۳	۱۷	۰/۹۴۱	۰/۷۶
	۱۸	۰/۶۱۰	۰/۸۹
	۱۹	۰/۵۲۷	۰/۹۲

با توجه به جدول ۹، روابط پیشنهادی که محل اندازه‌گیری عمق آب در آن‌ها در مجاورت دیوار روبروی سرریز (نقطه P<sub>1</sub> در شکل ۱) است، دارای کمترین مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و بیشترین R<sup>2</sup> می‌باشند. از طرفی روابطی که محل اندازه‌گیری عمق آب در آن‌ها در نزدیکی سرریز (نقطه P<sub>3</sub> در شکل ۱) می‌باشد، به دلیل تشکیل گردابه‌ها و آشفتگی شدید جریان، دقت کمتری نسبت به دیگر روابط دارند. هم‌چنین روابط ۱۳، ۱۶ و ۱۹ که هر سه تابعی از پارامترهای بی‌بعد  $Fr_1$ ،  $\frac{L'}{L}$ ،  $\frac{h_1}{L}$  در سه محور اندازه‌گیری عمق آب می‌باشند، دارای بیشترین دقت در محاسبه جریان عبوری از روی سرریز جانبی می‌باشند. اما با توجه هدف مقاله حاضر که ارائه رابطه دبی کاربردی بوده و نیز محاسبه عدد فرود بالادست که نیازمند اندازه‌گیری عمق آب در بالادست کانال می‌باشد، روابط ۱۱، ۱۴ و ۱۷ که در آن‌ها تنها پارامتر  $\frac{L'}{L}$  به کار رفته است، در عمل کاربردی‌تر و مناسب‌تر می‌باشد. از این میان نیز رابطه ۱۱ به‌عنوان بهترین رابطه انتخاب می‌شود.

#### نتیجه‌گیری کلی

در تحقیق حاضر با استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی سرریز جانبی، شبیه‌سازی عددی جریان بر روی سرریز جانبی مستطیلی و کنگره‌ای با سه زاویه ۹۰،

## منابع مورد استفاده

- Ackers P, 1957. A theoretical consideration of side weirs on storm water overflows. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, London, England, 6(2): 250-269.
- Attarzadeh F, Khodashenas SR and Ziaei AN, 2016. Developing a simple unique stage discharge equation for labyrinth side weir with different angles and a constant opening. The third national and first international conference on applied research in Civil Engineering, Architecture and Urban Management, 9-10, March, International conference center Milad tower, Tehran, Iran.
- Aydin MC and Emiroglu ME, 2013. Determination of capacity of labyrinth side weir by CFD. Flow Measurement and Instrumentation 29: 1-8.
- Aydin MC, 2012. CFD simulation of free-surface flow over triangular labyrinth side weir. Advances in Engineering Software 45(1): 159-166.
- Beihaghi Kondori A, 2013. Numerical modeling of flow pattern on labyrinth weirs and determining discharge coefficient. MSc Thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
- Borghei SM, Jalili MR and Ghodsian M, 1999. Discharge coefficient for sharp crested side weirs in subcritical flow. Journal of Hydraulic Engineering 125 (10): 1051-1056.
- Borghei SM, Nekooie MA, Sadeghian H and Ghazizadeh MRJ, 2013. Triangular labyrinth side weirs with one and two cycles. In Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management 166(1): 27-42.
- Carollo FG, Ferro V and Pampaloni V, 2012. Experimental investigation of the outflow process over a triangular labyrinth weir. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 138(1): 73-79.
- De-Marchi G, 1934. Essay on the performance of lateral weirs. L'Energia Elettrica. Milano. Italy 11(11): 849-860.
- El-Khashab A and Smith KVH, 1976. Experimental investigation of flow over side weirs. Journal of Hydraulic Engineering 102 (9): 1255-1268.
- Emiroglu ME, Kaya N and Agaccioglu H, 2010. Discharge capacity of labyrinth side weir located on a straight channel. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 136(1): 37-46.
- Esmailpour L, Farsadizadeh D and Hosseinzadeh Dalir A, 2016. Investigation of hydraulic characteristics of one-side semi-circular labyrinth side weir. Journal of Water & Soil. 26(1): 187-195.
- Fenton JD, 2016. Hydraulics: science, knowledge, and culture. Journal of Hydraulic Research 54(5): 485-501.
- Ferro V, 2000. Simultaneous flow over and under a gate. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 126(3): 190-193.
- Ghodsian M, 2004. Flow over triangular side weir. Journal of Scientia Iranica 11: 114-120.
- Khameneh HZ, Khodashenas SR and Esmaili K, 2014. The effect of increasing the number of cycles on the performance of labyrinth side weir. Flow Measurement and Instrumentation 39: 35-45.
- Mahdavi Meymanad A, Ahadiyan J and Ehteram M, 2015. Sensitivity analysis of the effective parameters in aeration of weir using artificial intelligence techniques and ANFIS. Journal of Iranian of Irrigation & Water Engineering 5(17): 83-95.
- Nikou NSR, Ziaei AN and Safavi K, 2018. Closure to Extraction of the flow rate equation under free and submerged flow conditions in pivot weirs with different side contractions by N. Sheikh Rezazadeh Nikou, MJ Monem, and K. Safavi. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 144(4)
- Singh R, Manivannan D and Satyanarayana T, 1994. Discharge coefficient of rectangular side weirs. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 120(4): 814-819.
- Subramanya K, Awasthy SC, 1972. Spatially varied flow over side weirs. Journal of Hydraulic Engineering 98(1): 1-10.
- Varjavand P, Farsadizadeh D, Hosseinzadeh Dalir A and Sadraddini AA, 2010. 3D simulation of flow in side spillway with k-ε turbulence model and comparing the results with physical model. Journal of Water & Soil. 20(3): 105-118.
- Zahedi Khameneh HZ, Khodashenas SR and Esmaili K, 2014. The Effect of Semi-circular side weirs on hydraulic properties and discharge coefficient of side weirs. Journal of River Engineering 25(52): 20-25.