

## Numerical Investigation on Effective Parameters on Hydraulic Flows in Chimney Proportional Weirs

RASOUL DANESHFARAZ<sup>1\*</sup>, REZA NOROUZI<sup>2</sup>, HAMIDREZA ABBASZADEH<sup>1</sup>

1. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran.

2. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

(Received: Apr. 26, 2021- Revised: May. 28, 2021- Accepted: May. 31, 2021)

### ABSTRACT

Proportional weirs are of great importance in flow measurement due to providing the required accuracy in estimating the flow rate. In this study, the hydraulic parameters such as velocity distribution and velocity vectors, fluid pressure distribution in channel and weir, Froude number, stage-discharge diagram and discharge coefficient of chimney weirs with angles (The angle of triangular part of weir with the vertical wall) of 37°, 42°, 47.2° and 53° in the range of 2 to 9 liters per second was investigated using FLOW-3D software. In the present study, the RNG turbulence model was selected in comparison with the LES, k-ε and k-ω turbulence models due to low values of relative error percentage and absolute error. The results showed that by increasing angle, at the same water head, the flow rate and Froude number decreases, and by increasing water head above the weir crest, the Froude number increases. Also, based on the results of numerical solution, by decreasing angle, the upstream mean velocity increases. In this study, based on dimensionless parameters, a nonlinear polynomial equation was obtained by combining the data of all modeled weirs to predict the discharge coefficient. Comparing the results of experimental and numerical solution with the presented equation indicates the high accuracy of the presented equation.

**Keywords:** Chimney Weir, Water Head, Froude Number, Velocity Distribution, Discharge Coefficient.

---

\* Corresponding Author's Email: [daneshfaraz@yahoo.com](mailto:daneshfaraz@yahoo.com)

## بررسی عددی پارامترهای مؤثر بر هیدرولیک جریان در سرریزهای تناسبی دودکشی

رسول دانشفراز<sup>۱\*</sup>، رضا نوروزی<sup>۲</sup>، حمیدرضا عباسزاده<sup>۱</sup>

۱. گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.

۲. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۲/۶ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۳/۷ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۳/۱۰)

### چکیده

سرریزهای تناسبی به دلیل تأمین دقت مورد نیاز در برآورد میزان دبی از اهمیت بالایی در اندازه‌گیری جریان برخوردار هستند. در این مطالعه، با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D پارامترهای هیدرولیکی از جمله توزیع سرعت و بردارهای سرعت، توزیع فشار سیال در کانال و سرریز، عدد فرود، نمودار دبی-اشل و ضریب‌دبی سرریزهای دودکشی با زوایای (زاویه قسمت مثلثی سرریز با دیواره قائم)  $37^\circ$ ،  $42^\circ$ ،  $47/2^\circ$  و  $53^\circ$  در محدوده دبی ۲ الی ۹ لیتر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفته است. در تحقیق حاضر مدل آشفتگی RNG در مقایسه با مدل‌های آشفتگی LES،  $k-\epsilon$  و  $k-\omega$  به علت مقادیر کم درصد خطای نسبی و خطای مطلق انتخاب شد. نتایج نشان داد که با افزایش زاویه، در بار آبی یکسان، میزان دبی و عدد فرود کاهش و با افزایش بار آبی بالای تاج سرریز، عدد فرود افزایش پیدا می‌کند. همچنین براساس نتایج حل عددی با کاهش زاویه، سرعت متوسط جریان در بالادست سرریز افزایش می‌یابد. در این مطالعه، براساس پارامترهای بی‌بعد رابطه چند جمله‌ای غیرخطی با تلفیق داده‌های تمامی سرریزهای مدل شده برای پیش‌بینی ضریب‌دبی به‌دست آمد. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و حل عددی با رابطه پیشنهادی در تحقیق حاضر، حاکی از دقت بالای معادله ارائه شده می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: سرریز دودکشی، بار آبی، عدد فرود، توزیع سرعت، ضریب دبی.

### مقدمه

در مواقعی که عمق جریان بالادست دستخوش تغییرات و نوسانات زیادی در سطح آب باشد، باید از سرریزهایی استفاده نمود که نسبت به تغییرات تراز آب بالادست حساس نبوده و دبی ثابتی را تأمین نماید. سرریزهای تناسبی به دلیل این‌که نسبت به تغییرات عمق بالادست سرریز حساسیت کم‌تری دارند، از دقت بالایی در نتایج به‌دست آمده برخوردار می‌باشند. بنابراین به‌جهت تأمین دقت مورد نیاز می‌توان از سرریزهای تناسبی استفاده نمود. سرریزهای دودکشی، یکی از انواع سرریزها هستند که در آن‌ها دبی متناسب با توان یک بار آبی تغییر می‌کند. بنابراین به‌دلیل خطی بودن تغییرات میزان دبی در برابر بار آبی در این سرریزها، خطای قرائت بار آبی به‌صورت خطی در دبی ظاهر خواهد شد. یافتن بهترین شکل هندسی با میزان خطای کم‌تر در محاسبه میزان دبی عبوری از سرریز و کم‌ترین حساسیت به تغییرات عمق جریان بالادست بسیار مهم است. ساترو، سرریز تناسبی خطی را بر روی یک سرریز مستطیلی قرار داد. ایشان با فرض معادلات منحنی در شکل سری توانی و با تطبیق ضرایب و در نظر گرفتن قانون حاکم بر معادلات جریان، روابط مربوطه را گسترش و ثابت‌های معادله را به‌دست آورد. این پیشنهاد منجر به توسعه عملی و

ساخت سرریزی شد که به سرریز ساترو معروف است (به نقل از Keshava Murthy & Giridhar, Singer & Lewis, 1966). (1989) با هدف تسهیل در ساخت، سرریز مثلثی معکوس را در نظر گرفتند و روابط نظری برای استفاده از سرریز مثلثی معکوس را به‌دست آوردند. (1990) Keshava Murthy & Giridhar برای بهبود دامنه تغییرات خطی سرریز مثلثی معکوس یک سرریز مستطیلی به آن اضافه کردند که به سرریز دودکشی معروف است. همچنین آن‌ها به مطالعه آزمایشگاهی سرریز دودکشی پرداخته و مشاهده کردند که دامنه خطی سرریز دودکشی نسبت به سرریز مثلثی معکوس تا بیش از ۲ برابر افزایش یافته است. Chatterjee *et al.* (1998) در بررسی آزمایشگاهی سرریز دودکشی با شرایط جریان مستغرق، رابطه‌ای را برای سرریز دودکشی در حالت مستغرق توسعه داده و با تحقیقات قبلی برای سرریزهای لبه‌تیز مقایسه نمودند. رابطه توسعه داده شده، دارای عملکرد بهتری نسبت به فرمول محققان قبلی داشت. (2002) Chatterjee *et al.* به بررسی آزمایشگاهی خصوصیات دبی سرریز دودکشی تحت شرایط جریان آزاد پرداختند و رابطه‌ای برای ضریب‌دبی ارائه کردند. (2004) Elazizy *et al.* ضریب‌دبی سرریزهای تناسبی از نوع جذری در حالت جریان مستغرق را مورد بررسی قرار دادند و

با توجه به اهمیت موضوع و چگونگی نحوه پاسخ‌دهی نرم‌افزار FLOW-3D در شبیه‌سازی جریان سرریز، در تحقیق حاضر لزوم عملکرد هندسه سرریز اعم از زاویه رأس قسمت مثلثی سرریز و تأثیر آن بر هندسه و میزان بازشدگی سرریز و فاصله عمود بین تاج سرریز تا ابتدای قسمت مستطیلی در سرریز دودکشی بررسی و با کار سایر محققان مقایسه گردید.

## مواد و روش‌ها

### روابط سرریز دودکشی و آنالیز ابعادی

مطابق شکل (۱)، با قراردادن سرریز دودکشی در مسیر جریان عبوری، دو نوع رفتار جریان قابل مشاهده است: اگر بار آبی از قسمت مثلثی معکوس سرریز فراتر نرود و در آن محدوده قرار گیرد، رفتار نوع اول اتفاق می‌افتد. برای سرریزهای دودکشی در محدوده بار آبی  $0 \leq h \leq p$ ، دبی جریان عبوری با استفاده از رابطه (۱)، محاسبه می‌گردد (Keshava Murthy and Giridhar 1990):

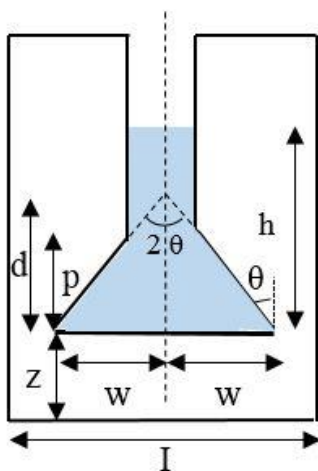
(رابطه ۱)

$$Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} \left( 2wh^{3/2} - \frac{4}{5} \tan \theta h^{5/2} \right) \quad 0 \leq h \leq p$$

اگر حجم آب پشت سرریز به حدی بالا رود که علاوه بر قسمت مثلثی معکوس، محدوده سرریز مستطیلی را نیز در بر- گیرد، رفتار نوع دوم قابل مشاهده خواهد بود. برای سرریزهای دودکشی در محدوده بار آبی  $h > p$  دبی جریان عبوری با استفاده از رابطه (۲)، محاسبه می‌گردد (Keshava Murthy and Giridhar 1990):

(رابطه ۲)

$$Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} \left( 2wh^{3/2} - \frac{4}{5} \tan \theta (h^{5/2} - (h-p)^{5/2}) \right) \quad h > p$$



شکل ۱- سرریز دودکشی

پارامترهای مؤثر بر ضریب‌دبی جریان در سرریز دودکشی

به‌منظور تخمین ضریب‌دبی در شرایط جریان مستغرق، رابطه‌ای را ارائه نمودند. (Hayawi et al. (2005) به بررسی آزمایشگاهی سرریز دودکشی در ارتفاع‌های مختلف از کف کانال در حالت جریان آزاد و مستغرق پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که ضریب‌دبی در حالت جریان آزاد با کاهش بار آبی در بالادست سرریز، افزایش می‌یابد. درحالی‌که ضریب‌دبی برای جریان مستغرق با کاهش نسبت استغراق (نسبت بار آبی در پائین‌دست سرریز به بار آبی در بالادست سرریز) روند افزایشی دارد. (Baddour (2008) معادله‌ای برای سرریزهای چندوجهی<sup>۱</sup> ارائه داد. ایشان با بهینه‌سازی ضرایب سرریز چند وجهی به سرریزی دست یافت که رفتاری مشابه با سرریز تناسبی دارد. (Vatankhah and Kouchakzadeh (2009) با استفاده از تابع گاما شکل کلی رابطه دبی برای سرریزهای چندوجهی از درجه n را توسعه داده و راه-حلی برای سرریز خطی ارائه دادند. (Vatankhah (2012) به‌منظور بهبود دامنه تغییرات خطی سرریز مثلثی معکوس، پیشنهاد کرد که اگر در سرریز دودکشی از مقطع مثلثی به جای مقطع مستطیلی استفاده گردد، میزان خطای انحراف از رابطه خطی کاهش می‌یابد. نتایج مطالعه آزمایشگاهی (Eslahi et al. 2014) نشان داد که در سرریزهای تناسبی از نوع جذری و لگاریتمی رابطه خطی به‌ترتیب میان دبی و جذر بار آبی و لگاریتم بار آبی برقرار می‌باشد. (Kianmehr et al. (2015) به بررسی آزمایشگاهی سرریزهای تناسبی خطی از نوع دودکشی، مثلثی معکوس و دو مثلثی معکوس در مقطع دایره‌ای شکل پرداختند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که شکل مقطع کانال با تأثیر در ضریب‌دبی باعث تغییر آن در بازه ۰/۸-۰/۶۶ شده است. (Ghaffari Gousheh et al. (2018) سرریزهای تناسبی را به‌عنوان سرریز جانبی مورد آزمایش قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که ضریب‌دبی در شرایطی که این سرریزها به عنوان آبگیر جانبی مورد استفاده قرار گیرند، تابعی از نسبت‌های بدون بعد بار آبی به ارتفاع تاج سرریز و طول تاج سرریز به ارتفاع تاج سرریز می‌باشد.

طبق بررسی‌های انجام شده تاکنون مطالعه‌ای در زمینه سرریزهای دودکشی با استفاده از روش حجم محدود (VOF) صورت نپذیرفته است. اما در مورد دیگر سرریزهای لبه‌تیز بررسی-های مختلف عددی از جمله (Norouzi, Salmasi et al. (2019)، (Ghaderi et al. (2021)، (Carrillo et al. (2020)، (Norouzi et al. (2021) و (Daneshfaraz et al. (2021) انجام یافته است. همچنین با دقت در پیشینه تحقیق نیاز به مطالعه در زمینه هندسه سازه و تأثیر آن بر ظرفیت، پارامترهای هیدرولیکی و ضرایب‌دبی متناظر در این نوع سرریزها احساس می‌شود. بنابراین

به صورت زیر قابل بیان است:

(رابطه ۳)  $f_1(h, z, p, I, w, g, \theta, C_d, \rho, \mu, \sigma, V) = 0$   
 در رابطه (۳):  $h$  بار آبی ( $L$ )،  $z$  ارتفاع تاج سرریز از کف کانال ( $L$ )،  $p$  فاصله عمود بین دو قسمت تاج سرریز،  $I$  عرض کانال ( $L$ )،  $w$  نصف طول تاج سرریز ( $L$ )،  $g$  شتاب گرانش زمین ( $LT^{-2}$ )،  $\theta$  نصف زاویه رأس قسمت مثلثی سرریز (رادیان)،  $C_d$  ضریب دبی جریان (بدون بعد)،  $\rho$  جرم مخصوص آب ( $ML^{-3}$ )،  $\mu$  لزوجت دینامیکی ( $ML^{-1}T^{-1}$ )،  $\sigma$  کشش سطحی آب ( $MT^{-2}$ ) و  $V$  سرعت جریان ( $LT^{-1}$ ) می‌باشند. با در نظر گرفتن  $(h, g, \rho)$  به عنوان متغیرهای تکراری و با استفاده از روش پی-باکینگهام، می‌توان رابطه بی بعد (۴) را ارائه کرد:

(رابطه ۴)  $f_2\left(\frac{h}{z}, \frac{h}{p}, \frac{h}{I}, \frac{h}{w}, \theta, C_d, Re, We, Fr\right) = 0$   
 در رابطه (۴)،  $Fr$ ،  $We$  و  $Re$  به ترتیب بیان گر اعداد بدون بعد فرود، رینولدز و وبر می‌باشند. با توجه به این که جریان در بالادست سرریز زیربحرانی و دامنه تغییرات عدد فرود بسیار کوچک و  $0.1145 \leq Fr \leq 0.883$  می‌باشد، بنابراین از تأثیر عدد فرود می‌توان صرف نظر کرد. از آنجائیکه در مطالعه حاضر جریان متلاطم و  $34750 \leq Re \leq 87450$  است، می‌توان از تأثیر عدد رینولدز نیز چشم‌پوشی نمود (Daneshfaraz et al. 2020). همچنین اگر ارتفاع آب روی تاج سرریز از ۳ سانتی‌متر بیشتر باشد، می‌توان اثر کشش سطحی را نادیده گرفت (Norouzi et al. 2020). در تحقیق حاضر حداقل ارتفاع آب روی تاج سرریز ۴ سانتی‌متر می‌باشد. لذا می‌توان از تأثیر عدد وبر نیز صرف نظر کرد. با توجه به اینکه بررسی تأثیر عرض کانال از اهداف مطالعه حاضر نبوده و مقدار ثابتی دارد، لذا از تأثیر پارامتر بی بعد  $h/I$  چشم‌پوشی شد. پارامترهای مورد بررسی در تحقیق حاضر به صورت رابطه (۵) ارائه گردید:

$$C_d = f_3\left(\frac{h}{z}, \frac{h}{p}, \frac{h}{w}, \theta\right) \quad (\text{رابطه ۵})$$

### معادلات حاکم بر جریان

نرم افزار FLOW-3D جهت شبیه سازی جریان، معادلات ناویر

استوکس و معادله پیوستگی را گسسته سازی و این معادلات دیفرانسیل جزئی را به معادلات جبری تبدیل می نماید. روابط (۶) و (۷) به ترتیب معادله پیوستگی و ناویر استوکس را نشان می‌دهد (Ghaderi et al. 2020).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (\text{رابطه ۶})$$

(رابطه ۷)

$$\rho \left( \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + B_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right]$$

در رابطه فوق،  $u_i$ ،  $u_j$  و  $u_k$  به ترتیب مولفه بردار سرعت در راستای فضایی  $i$ ،  $j$  و  $k$ ،  $B_i$  نیروی حجمی در راستای  $i$  و  $\mu$  لزوجت دینامیکی سیال،  $\rho$  جرم مخصوص آب،  $x_i$ ،  $x_j$  و  $x_k$  به ترتیب مختصات جریان در راستای فضایی  $i$ ،  $j$  و  $k$ ،  $\delta_{ij}$  دلتای کروکر که در آن اگر  $i=j$  باشد مقدار آن برابر ۱ و در غیر این صورت مقداری برابر صفر دارد.

**مشخصات حل عددی، شبکه حل، مدل آشفتگی و شرایط مرزی**  
 در تحقیق حاضر تأثیر پارامترهای هندسی اعم از زاویه رأس سرریز ( $2\theta$ )، فاصله عمود بین تاج سرریز تا ابتدای قسمت مستطیلی سرریز و میزان بازشدگی سرریز بر خصوصیات هیدرولیکی با استفاده از نرم افزار FLOW-3D مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور صحت سنجی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی (Eslahi et al. 2014) صورت پذیرفت. لازم به ذکر است که آزمایش‌های (Eslahi et al. 2014) در فلومی به طول ۲ متر و عرض ۰/۲۵ متر با دیواره‌ها و کف از جنس پلکسی گلس در مرکز تحقیقات آب گروه آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران انجام شده است. میزان جریان عبوری توسط فلومتر الکترومغناطیسی با دقت اندازه گیری ۰/۵٪ حداکثر عدد دبی گزارش شده، اندازه گیری شده است. سپس مدل‌ها برای شرایط هیدرولیکی مختلف اجرا گردید. در جدول (۱)، مشخصات هیدرولیکی و هندسی مدل‌های مورد مطالعه آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات هیدرولیکی و هندسی سرریزهای مورد مطالعه

عرض کانال (متر)	عدد رینولدز (بدون بعد)	دبی (مترمکعب بر ثانیه)	بار آبی (متر)
۰/۲۵	۳۴۷۵۰ - ۸۷۴۵۰	۰/۰۰۹ - ۰/۰۰۲	۰/۱۲ - ۰/۰۴
فاصله عمود بین دو قسمت سرریز (متر)	ارتفاع تاج سرریز از کف کانال (متر)	زاویه (درجه)	نصف طول تاج سرریز (متر)
$p = 0.707d$	۰/۰۶	۳۷ - ۴۲ - ۴۷/۲ - ۵۳	۰/۰۸۸۵

حل و ۰/۲ سانتی‌متر در محدوده سرریز با شبیه سازی مدل با سایز مش‌های با ابعاد متفاوت به دست آمد. به طوری که پس از آن با

در این تحقیق، برای شبیه سازی از دو مش پلاک استفاده شده است. مش بهینه با ابعاد مش ۰/۵ سانتی‌متر در کل شبکه

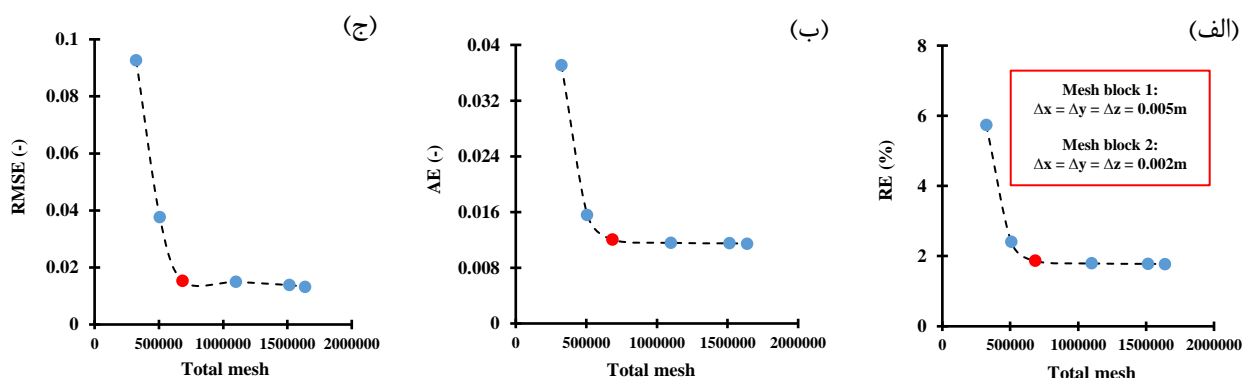
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{exp} - x_{num})^2}{n}} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

در روابط فوق،  $x_{exp}$  و  $x_{num}$  به ترتیب مربوط به نتایج آزمایشگاهی و حل عددی و  $n$  تعداد کل داده‌ها می‌باشند. مقادیر روابط بالا هرچه به عدد صفر نزدیک باشند، نشان‌گر دقت بالای حل عددی در شبیه‌سازی خواهند بود.

کاهش سایز شبکه و به تبع آن افزایش تعداد مش، تغییر چندانی در نتایج مشاهده نگردید (شکل ۲). در تحقیق حاضر برای بررسی عملکرد مدل در شبیه‌سازی و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی از شاخص‌های آماری خطای مطلق ( $AE$ )، درصد خطای نسبی ( $RE\%$ ) و خطای جذر میانگین مربعات ( $RMSE$ ) استفاده گردید:

$$AE = |x_{exp} - x_{num}| \quad (\text{رابطه ۸})$$

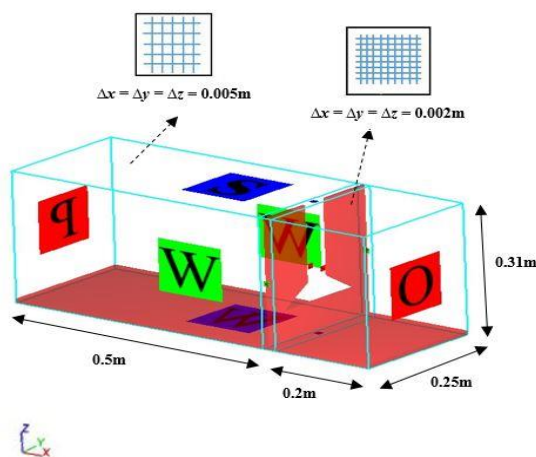
$$RE\% = \left| \frac{x_{exp} - x_{num}}{x_{exp}} \right| \times 100 \quad (\text{رابطه ۹})$$



شکل ۲- آزمون استقلال از مش (الف) درصد خطای نسبی (ب) خطای مطلق (ج) خطای جذر میانگین مربعات

تعریف شده در مش بلاک اول، از شرط مرزی تقارن و برای دیواره-ها و کف کانال از شرط مرزی دیوار استفاده شده است. برای کم کردن مدت زمان شبیه‌سازی جهت پایداری حل، محدوده سیال پشت سرریز، به‌عنوان شرط اولیه به شبیه‌سازی تعریف گردید. همچنین در شبیه‌سازی تمامی مدل‌ها، فشار به‌صورت هیدرواستاتیکی وارد شده است. شکل (۳)، شرایط مرزی و شبکه مش‌بندی در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد.

در این مطالعه انتخاب شرایط مرزی بر اساس دو مش بلاک انجام پذیرفت. در مش بلاک اول برای ورودی جریان از شرط مرزی فشار و برای انتهای کانال به‌منظور عدم تأثیر شرایط بیرون شبکه حل به داخل شبکه مش‌بندی شده از شرط مرزی خروجی استفاده شد. همچنین برای دیواره‌ها و کف کانال از شرط مرزی دیوار و برای مرز بالایی، شرط مرزی تقارن تعریف شده است. در مش بلاک دوم که به‌صورت تودرتو تعریف شده است، برای مرز ورودی، خروجی و بالایی به‌منظور تأثیرپذیری از شرایط مرزی



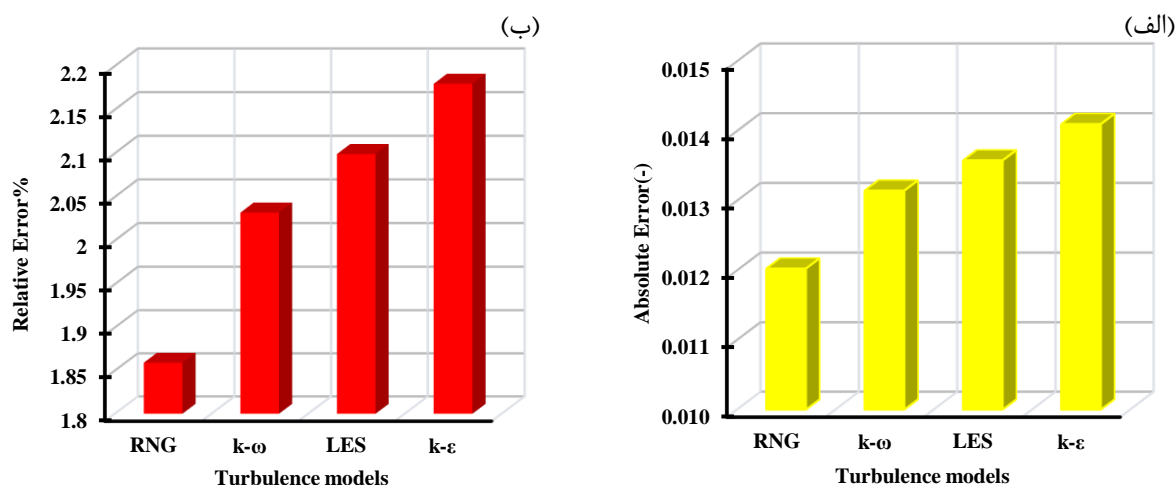
شکل ۳- تعریف شرایط مرزی و شبکه مش‌بندی در تحقیق حاضر

چهار مدل آشفتگی  $k-\epsilon$ ،  $k-\omega$ ،  $RNG$  و  $LES$  شبیه‌سازی انجام و

در تحقیق حاضر برای انتخاب نوع مدل آشفتگی، بر روی

با بررسی ضرایب دبی به دست آمده از مدل‌های آشفتگی و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی، تمامی مدل‌های آشفتگی نتایج قابل قبولی را ارائه نمودند. اما مدل آشفتگی RNG، به دلیل این که درصد خطای نسبی و خطای مطلق کم‌تری نسبت به ۳ مدل آشفتگی  $k-\epsilon$ ،  $k-\omega$  و LES دارد و به نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر است، جهت شبیه سازی انتخاب گردید.

مدل RNG برای ادامه شبیه‌سازی‌ها انتخاب گردید. از دلایل انتخاب این مدل، می‌توان به مواردی همچون اطمینان‌پذیری در پاسخ‌گویی به مسائل گوناگون، حل دقیق معادلات، دقت بالا در نشان دادن جزئیات جریان، عملکرد خوب در شبیه‌سازی نواحی جداسازی جریان و انحنای خطوط جریان و بررسی مطالعات پیشین همچون (Ghaderi et al. 2019 ; Ghaderi et al. 2020 ; Rezazadeh et al. 2020) اشاره کرد. همچنین مطابق شکل (۴)،

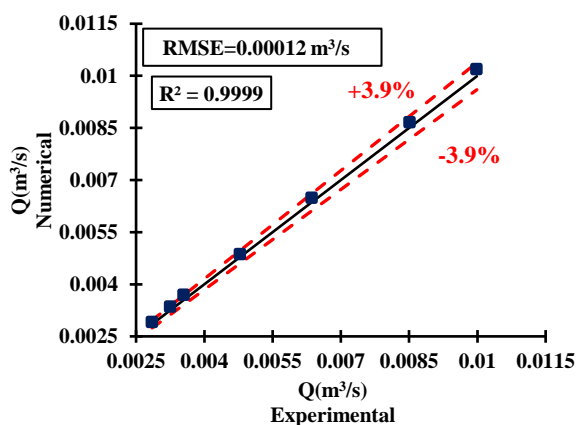


شکل ۴- نتایج حل عددی ضریب دبی برای چهار مدل آشفتگی (الف) خطای مطلق (ب) درصد خطای نسبی

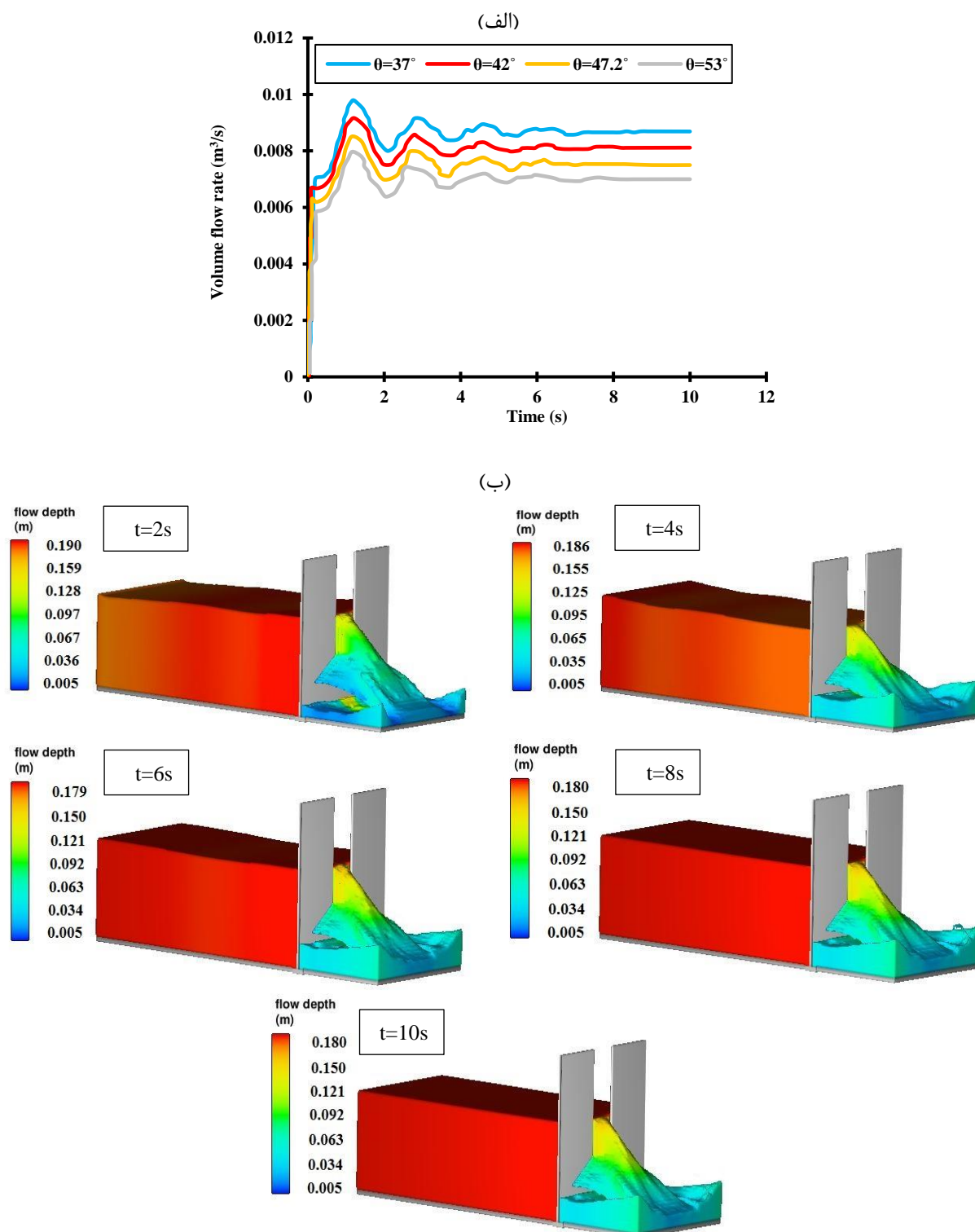
شبیه‌سازی یکنواخت‌تر شده است به طوری که با مقایسه عمق جریان در ثانیه‌های مختلف، مشاهده می‌شود که به دلیل نوسانات ایجاد شده، عمق جریان در بالادست و پائین دست سرریز در ثانیه ۲ به ترتیب افزایش و کاهش داشته و با گذشت زمان در ثانیه‌های ۸ و ۱۰ در یک عمق مشخص تثبیت شده است.

## نتایج و بحث

در این مطالعه از نتایج آزمایشگاهی (Eslahi et al. 2014) که در شرایط جریان آزاد انجام یافته است، استفاده شد. با توجه به شکل (۵)، مشاهده شد که تطابق خوبی مابین نتایج حل عددی با نتایج آزمایشگاهی وجود دارد. به طوری که ضریب همبستگی  $0.99$  بین نتایج وجود داشته و به ترتیب حداکثر مقدار درصد خطای نسبی، میانگین درصد خطای نسبی و خطای جذر میانگین مربعات بین داده‌ها  $3.9\%$ ،  $2.21\%$  و  $0.00012$  متر مکعب بر ثانیه می‌باشد. با توجه به شرایط اولیه و همچنین شرایط مرزی تعریف شده، حل عددی به صورت غیردائمی شروع شده و تا پایدار شدن جریان ادامه می‌یابد. در شکل (۶-الف)، نمودار دبی در برابر زمان برای سرریزهای آزمون شده در تحقیق حاضر رسم شده است. با توجه به شکل (۶-الف)، مشاهده می‌شود که در یک بار آبی مشخص در ثانیه‌های ابتدایی تلاطم جریان زیاد بوده و با گذشت زمان نوسانات جریان کم‌تر می‌شود تا این که در یک دبی مشخص به حالت ماندگار و پایدار می‌رسد. در شکل (۶-ب)، نوسانات جریان در زمان‌های مختلف برای بار آبی  $0.12$  متر بالای تاج سرریز برای سرریز با زاویه  $42^\circ$  نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۶-ب)، مشخص است سطح تراز آب با سپری شدن از زمان



شکل ۵- مقایسه میزان دبی عبوری از سرریز، حاصل از نتایج حل عددی و آزمایشگاهی



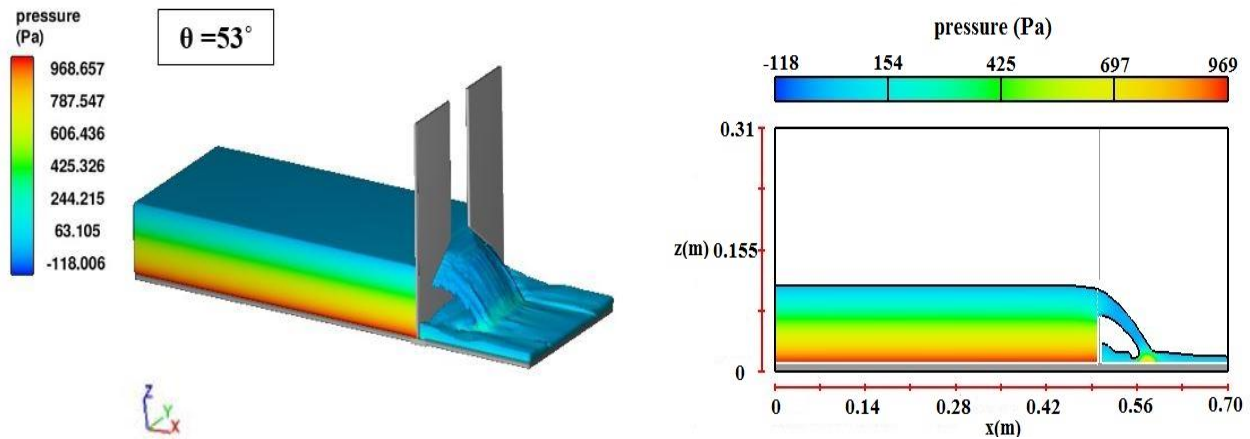
شکل ۶- الف) هیدروگراف دبی-زمان برای بار آبی ۰/۱۲ متر ب) شکل سه بعدی جریان در زمان‌های مختلف برای سرریز با زاویه  $42^\circ$  تحت شرایط جریان آزاد

آب، برابر با فشار اتمسفر و مساوی صفر می‌باشد. در فاصله  $m$   $x=0/56$  مقدار فشار جریان در کف کانال به‌طور ناگهانی در اثر ریزش جریان افزایش یافته است. بنابراین یکی از نکات اساسی در طراحی سرریز، استهلاک انرژی جریان در این ناحیه به‌منظور جلوگیری از فرسایش کف کانال می‌باشد. در جریان‌های برگشتی

در شکل (۷)، توزیع دوبعدی و سه‌بعدی فشار برای سرریز دودکشی با زاویه  $53^\circ$  و بار آبی ۰/۰۴ متر بالای تاج سرریز برای نمونه آورده شده است. همان‌طور که مشخص است مقدار فشار از کف کانال تا سطح آزاد جریان به‌صورت هیدرواستاتیکی بوده و دارای روندی کاهشی است. به‌طوری‌که مقدار فشار در سطح آزاد

تماس بودن با هوا به رنگ آبی تیره می‌باشد. همچنین افزایش میزان دبی منجر به افزایش عمق بالادست و در نتیجه افزایش فشار بر کف کانال و دیواره سرریز خواهد شد.

به سمت بدنه در جلوی سرریز و یا به عبارت دیگر در استخر تشکیل شده در جلوی سرریز، فشار منفی ایجاد شده و توزیع فشار در جریان ریزشی از سرریز به دلیل نازک بودن تیغه ریزشی و در



شکل ۷- توزیع فشار در جریان ریزشی از سرریز دودکشی

مسططیلی شکل برای سرریز با زاویه  $42^\circ$  و با عمق جریان  $0.14$  متر را نشان می‌دهد. این منحنی‌ها با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی ترسیم شده‌اند. براساس شکل (۹-الف)، میزان سرعت جریان در جداره‌ها تقریباً صفر و بعضاً در گوشه‌های کف کانال منفی می‌باشد و با فاصله گرفتن از جداره‌ها افزایش می‌یابد. به طوری که حداکثر سرعت جریان در نزدیکی سطح آب اتفاق می‌افتد. تشکیل جریان‌های ثانویه حول محوری عمود بر صفحه مقطع جریان در کانال را می‌توان علت تشکیل حداکثر سرعت جریان در نزدیکی سطح جریان عنوان نمود که در آن سرعت محوری در نقطه‌ای پائین‌تر از سطح آزاد جریان به حداکثر مقدار خود می‌رسد. مقادیر سرعت جریان ریزشی در فاصله نیم سانتی-متری بعد از سرریز برای سرریز با زاویه  $42^\circ$  در دبی‌های مختلف آورده شده است (۹-ب). همان‌طور که مشخص است، لایه مرزی در مجاورت با تاج سرریز، به دلیل بالا بودن مقدار فشار حاصل از عمق جریان، سرعت بیشتری نسبت به لایه‌های بالایی دارد. همچنین با افزایش بار آبی در میدان سرریز، جریان ریزشی مستقیم‌تر شده و تمایل به سرعت طولی بیشتر می‌شود.

مقطع عرضی کانال در فاصله ۲ سانتی‌متری پشت سرریز برای سرریز با زاویه  $37^\circ$  در دبی‌های مختلف مطابق شکل (۱۰-الف)، ارائه شده است. نتایج حاکی از آن است که سرعت متوسط جریان در کناره‌های کانال نسبت به سرعت متوسط جریان در طول سرریز کم‌تر بوده و با افزایش بار آبی روی تاج، سرعت متوسط جریان افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر با نزدیک شدن به دیواره‌های فلوم، سرعت متوسط جریان روند کاهشی دارد که موید

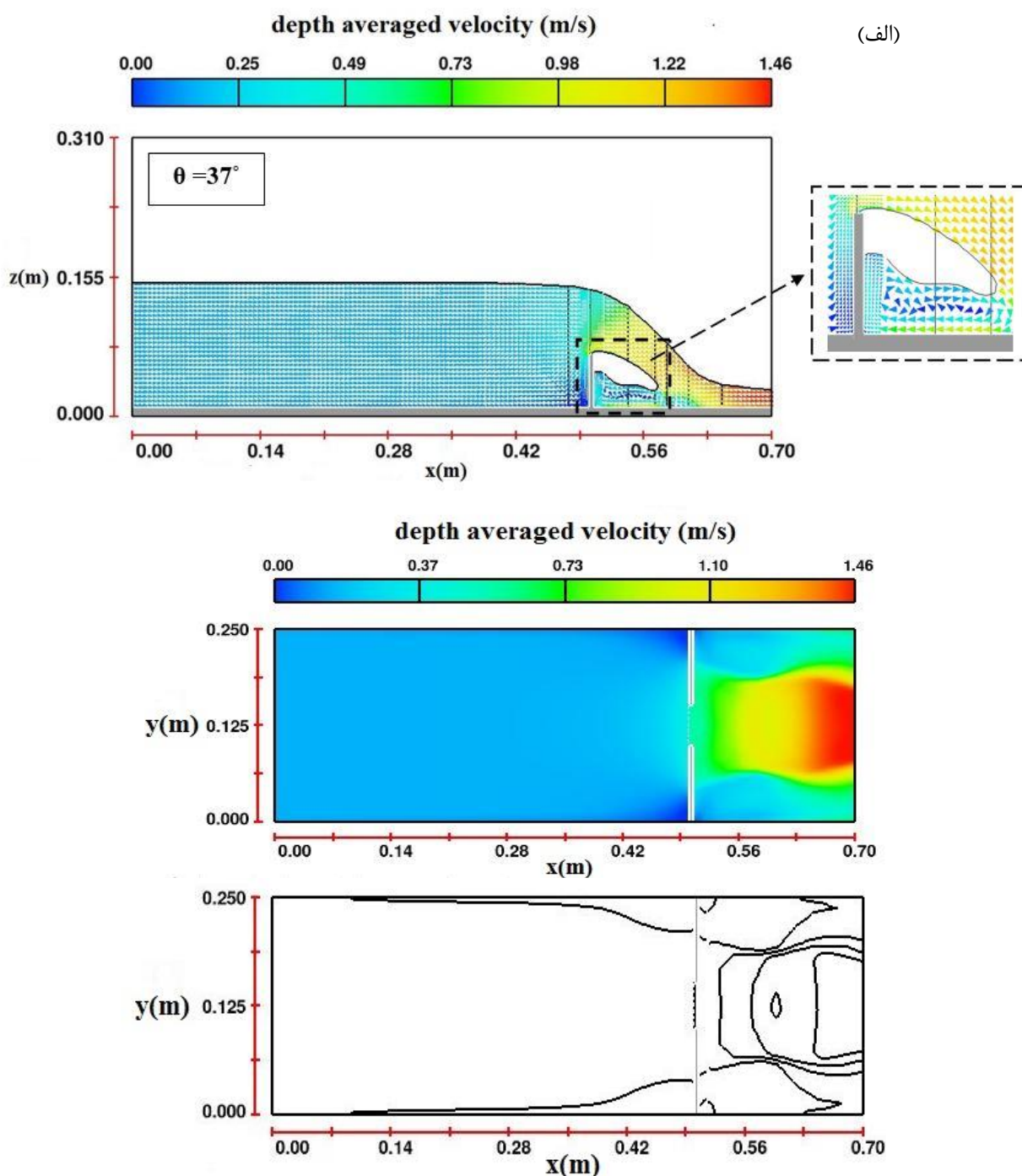
در شکل (۸)، توزیع سرعت و بردارهای متناظر سرعت متوسط جریان در بالادست و پائین‌دست سرریز نشان داده شده است. با دقت در شکل (۸)، مشاهده می‌گردد که سرعت متوسط جریان با عبور از سرریز افزایش یافته و با برخورد جریان ریزشی بر کف کانال، بخشی از بردارهای سرعت تغییر جهت داده و جریان‌های گردابی ایجاد شده است که منجر به کاهش سرعت جریان در آن ناحیه می‌شود. به طوری که سرعت سیال در استخر تشکیل شده در جلوی سرریز به دلیل جریان‌های گردابی به کم‌ترین میزان خود رسیده است. در شکل (۸-ب)، پلان کانال در جهت x-y نشان داده شده است. مطابق شکل (۸-ب)، سرعت جریان در بالادست سرریز در مقایسه با پائین‌دست سرریز مقدار کم‌تری دارد. علت این مسئله را می‌توان به زیربحرانی بودن جریان در بالادست سرریز اشاره کرد، به طوری که  $Fr=0.137$  می‌باشد. همچنین در این شکل محدوده کلی خطوط جریان در جهت طول کانال ترسیم شده است. مشاهده می‌گردد که تمایل جریان در جهت حرکت به سمت دهانه سرریز می‌باشد و مقادیر سرعت متوسط جریان در گوشه‌های پشت سرریز، کم‌ترین میزان را دارا می‌باشند.

با توجه به تأثیر لزجت و کشش سطحی سیال و همچنین اثر جداره‌ها و سطح آزاد جریان، میزان توزیع سرعت در کانال‌ها سه‌بعدی بوده و فرض ثابت در نظر گرفتن سرعت در مقطع جریان صحیح نمی‌باشد و با اندازه‌گیری سرعت طولی جریان در چند قسمت از یک مقطع می‌توان منحنی‌های سرعت را رسم نمود. شکل (۹-الف)، منحنی‌های هم‌سرعت در کانال با مقطع

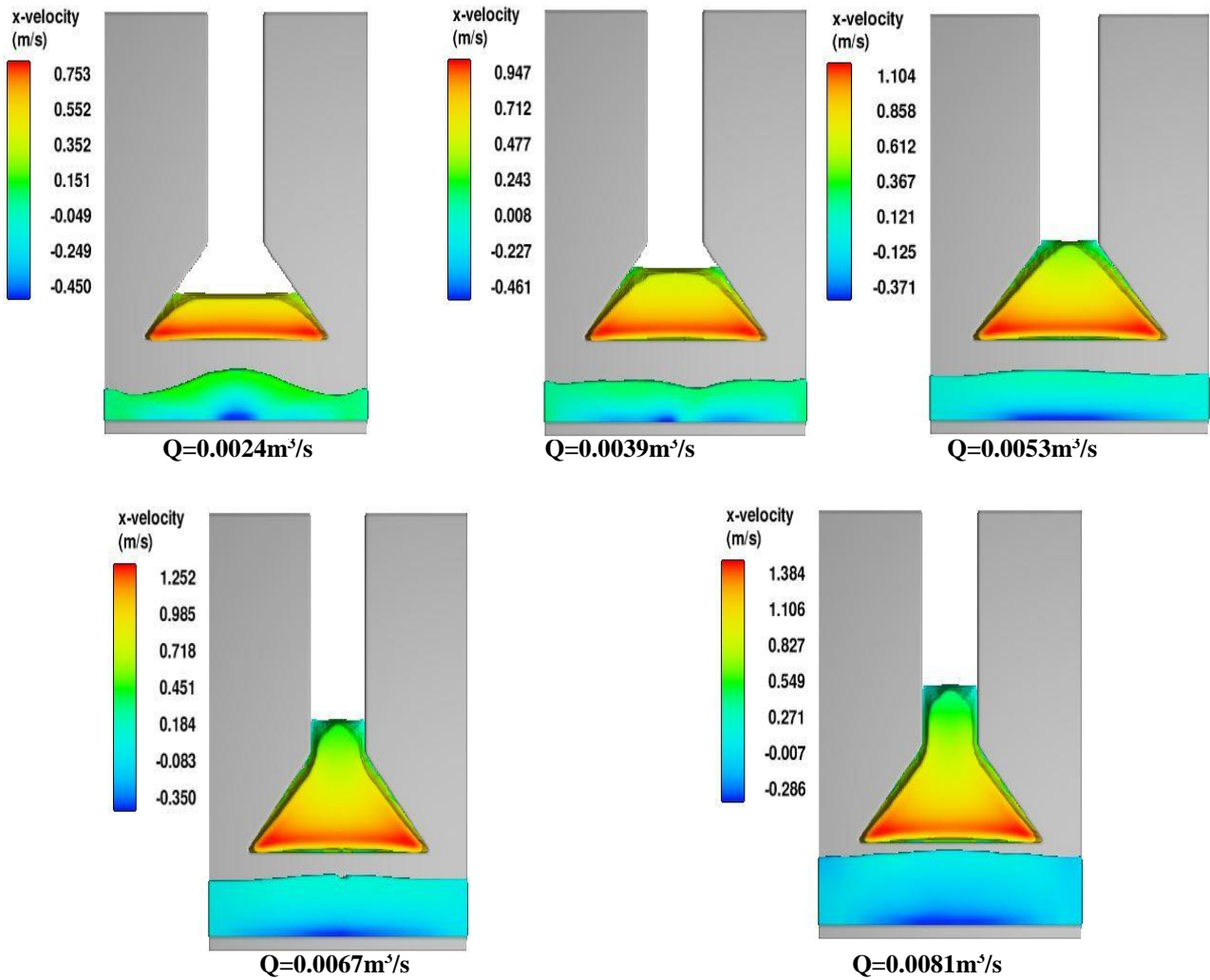
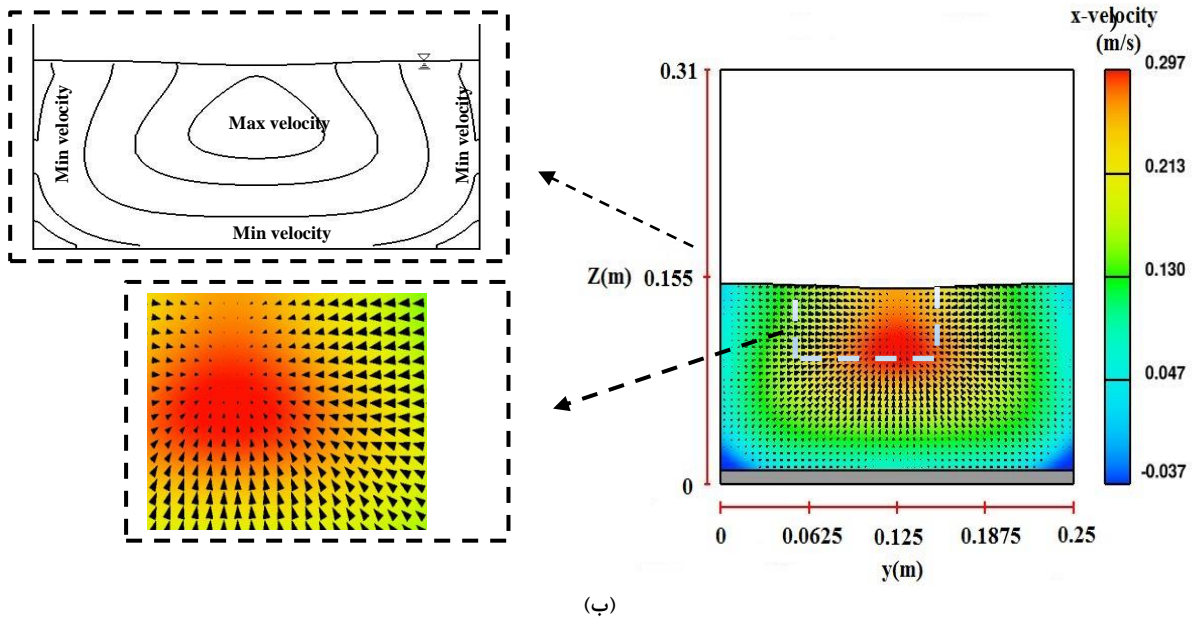


با رسیدن به سرریز و ریزش جریان، سرعت متوسط جریان افزایش پیدا کرده است. سرعت متوسط جریان پس از عبور از سرریز و در پای سرریز تقریباً صفر و آب ساکن است. علت این موضوع را می‌توان به جریان‌های گردابی و برگشتی به سمت پای سرریز عنوان کرد. همچنین مشاهده می‌شود که سرعت متوسط جریان پس از کاهش یک‌باره، به دلیل فوق‌بحرانی بودن جریان، شروع به افزایش کرده و به حداکثر مقدار خود رسیده است.

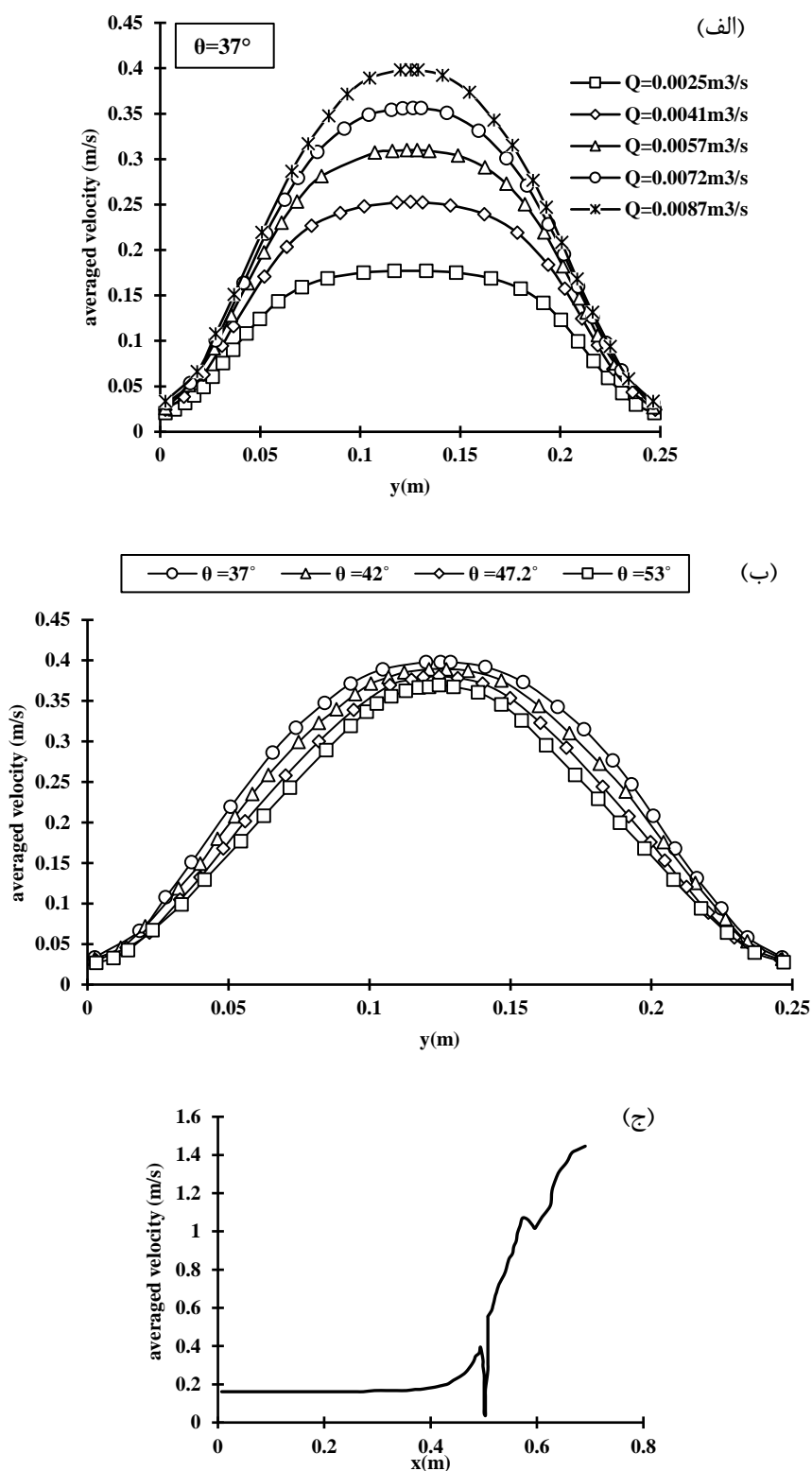
شکل (۸-ب)، نیز می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۱۰-ب)، مشخص است در یک بار آبی یکسان در تمامی سرریزهای مدل شده، با افزایش زاویه و کاهش فاصله عمود بین تاج و اولین نقطه-ای که شیب سرریز تغییر می‌کند، سرعت متوسط جریان هم-گرایی بیشتری پیدا کرده و مقدار آن کم‌تر می‌شود. شکل (۱۰-ج)، توزیع سرعت در راستای طول کانال را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، سرعت جریان در بالادست سرریز تقریباً یکسان بوده و



شکل ۸- توزیع دو بعدی و سه بعدی سرعت متوسط جریان در سرریز دودکشی با زاویه  $37^\circ$



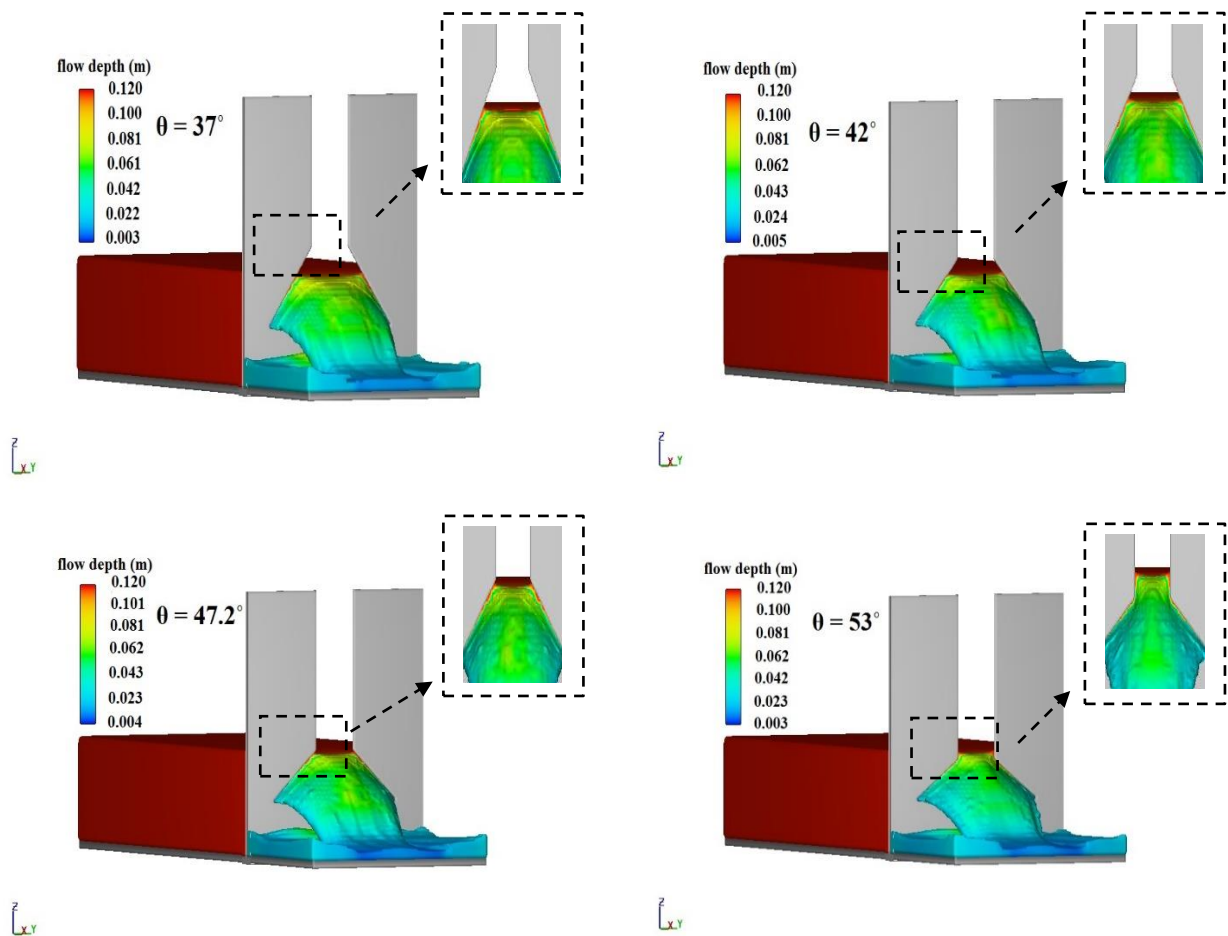
شکل ۹- الف) منحنی هم‌سرعت و بردارهای سرعت طولی در مقطع عرضی کانال ب) سرعت طولی در دبی‌های مختلف در جریان ریزشی از سرریز



شکل ۱۰- توزیع سرعت متوسط جریان

(الف) در راستای طول کانال در مقطع عرضی (ب) در راستای طول کانال در زوایای مختلف (ج) در بالادست و پائین‌دست

مطابق شکل (۱۱)، روند جریان ریزشی از سرریز در یک بار آبی یکسان در سرریزهای مدل شده نشان داده شده است. با توجه به شکل (۱۱)، مشاهده می‌گردد که محدوده بار آبی بالای تاج سرریز در زوایای مختلف متفاوت است. به طوری که با کاهش زاویه راس، سیال در محدوده قسمت مثلثی سرریز و با افزایش زاویه که منجر به کاهش فاصله بین دو قسمت مثلثی و مستطیلی سرریز می‌گردد، بار آبی علاوه بر محدوده قسمت مثلثی، قسمت مستطیلی سرریز را نیز پوشش می‌دهد. بنابراین با توجه به روابط (۱) و (۲) و همچنین محدوده بار آبی، ضرایب‌دبی متفاوت از یکدیگر خواهند شد. به طوری که در یک بار آبی یکسان، با افزایش  $\theta$  ضریب‌دبی روند افزایشی دارد.

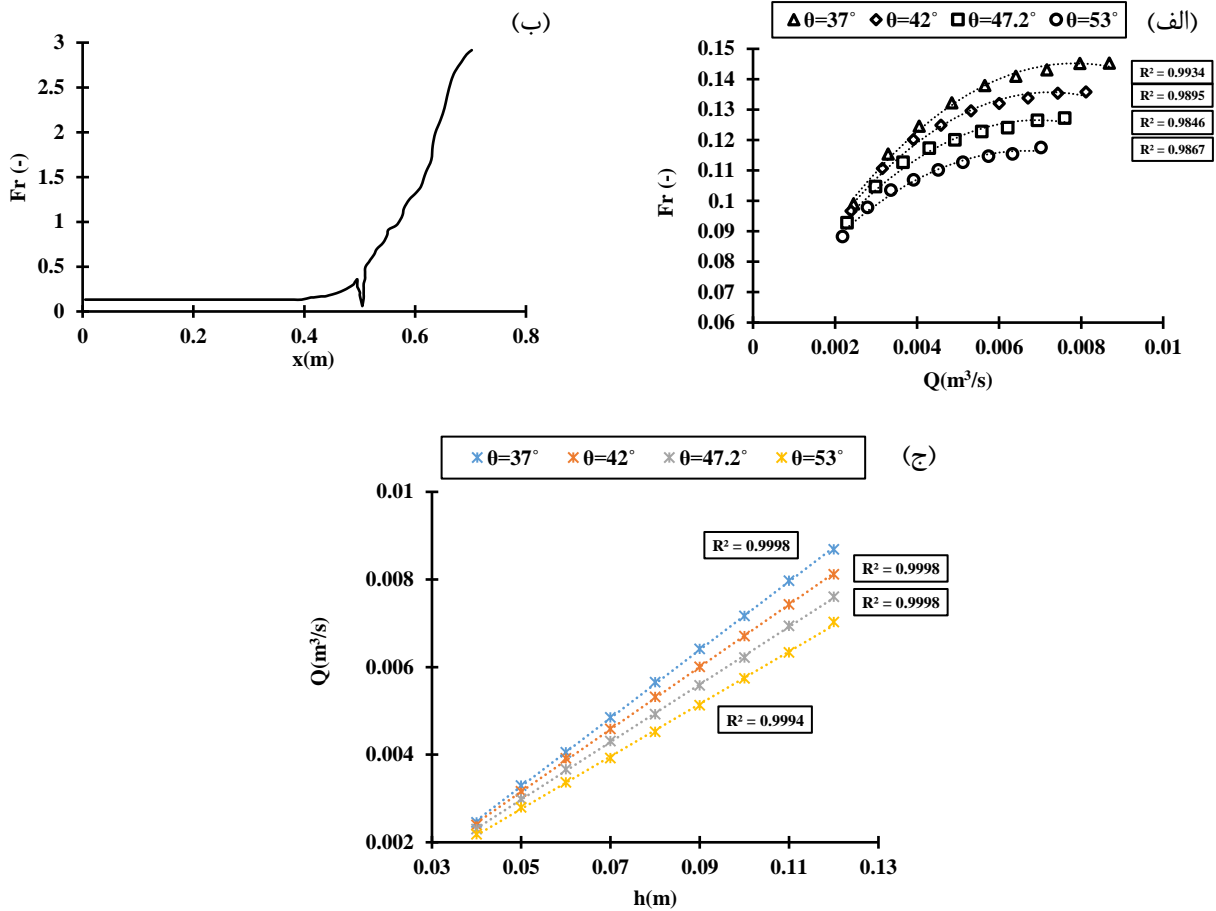


شکل ۱۱- جریان ریزشی در حالت سه بعدی برای سرریز دودکشی با زوایای راس مختلف

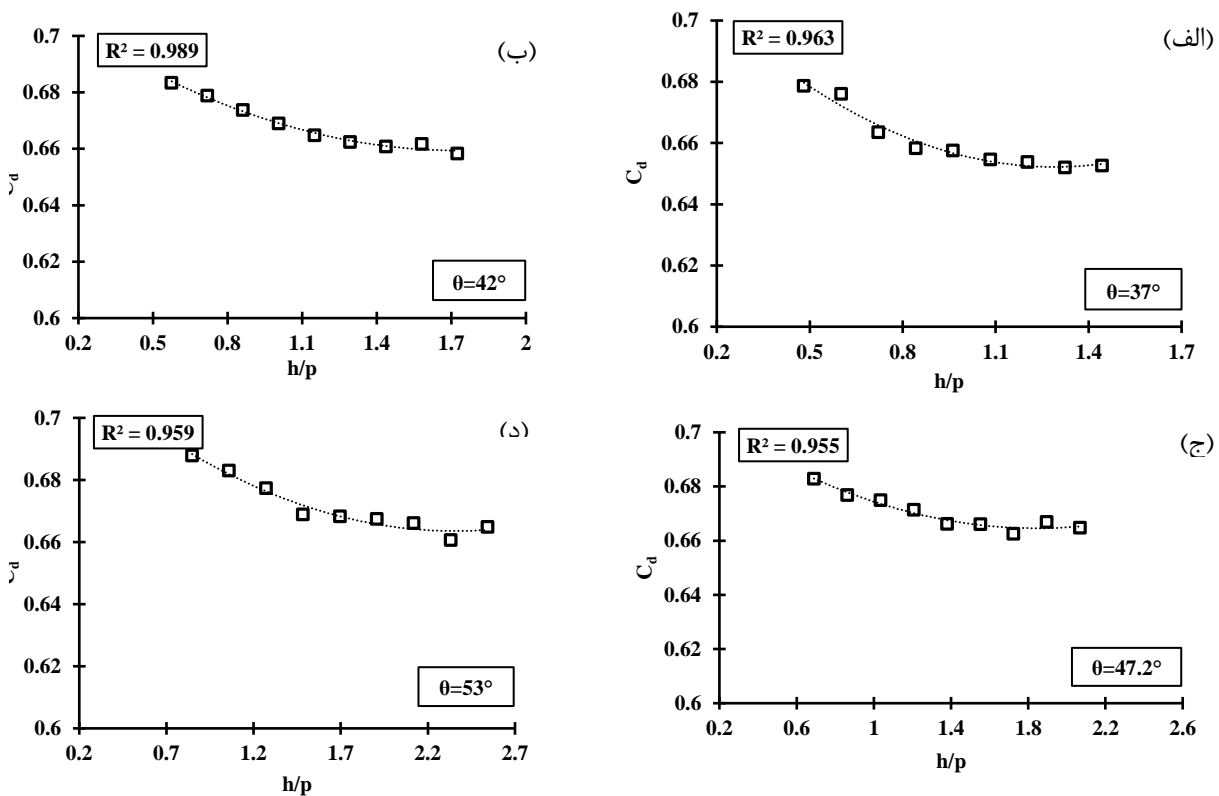
سرریز با زوایای مذکور، به دلیل بازشدگی‌های مختلف سرریز، متفاوت از یکدیگر می‌باشند. به طوری که میزان دبی ورودی به فلوم برای تأمین آب بالادست در بار آبی یکسان، در سرریز با زاویه راس  $37^\circ$  بیشتر از سرریز با زوایای  $42^\circ$ ،  $47.2^\circ$  و  $53^\circ$  است. همان‌طور که مشخص است با افزایش بار آبی در تمامی سرریزهای آزمون شده، میزان دبی عبوری از سرریز افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش زاویه  $\theta$ ، میزان دبی لازم برای تأمین بار آبی مد نظر کم‌تر از سرریز با زاویه کوچک‌تر است که علت این مسئله را می‌توان به بازشدگی کم‌تر قسمت مثلثی سرریز دودکشی اشاره نمود. از طرفی این مسئله رابطه مستقیمی با سرعت جریان بالادست سرریز دارد. به طوری که با افزایش زاویه  $\theta$ ، در یک بار آبی یکسان در تمامی سرریزها، دبی کاهش و به تبع آن کاهش سرعت متوسط جریان بالادست سرریز اتفاق خواهد افتاد، بنابراین مقدار عدد فرود نیز کاهش خواهد یافت.

شکل (۱۳)، تغییرات ضریب دبی حاصل از نتایج حل عددی برای تمامی سرریزهای مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

یکی از مشخصه‌های جریان که در رابطه با شناخت رفتار جریان اهمیت بالایی دارد، عدد فرود جریان است. با توجه به شکل (۱۲-الف)، با مقایسه اعداد فرود بالادست سرریز دودکشی در تمامی سرریزهای مدل شده، مشاهده شد که با افزایش زاویه  $\theta$ ، عدد فرود بالادست به ترتیب برای سرریزهای با زوایای  $37^\circ$ ،  $42^\circ$ ،  $47.2^\circ$  و  $53^\circ$  روند کاهشی دارد. در تمامی مدل‌ها نیز افزایش دبی باعث افزایش عدد فرود شده است. تغییرات عدد فرود در راستای جریان مطابق شکل (۱۲-ب)، ارائه شده است. علت فوق‌بحرانی شدن جریان در پائین‌دست سرریز ریزش جریان و منقبض شدن آن می‌باشد. در شکل (۱۲-ج)، تأثیر زاویه  $\theta$  بر میزان دبی عبوری از سرریز در بار آبی یکسان بررسی شد. در شکل (۱۲-د)، نمودار دبی-اشل برای سرریزهای مدل شده، نشان داده شده است. با برازش خطی بین داده‌ها، ضریب همبستگی بالا بین نتایج به دست آمد که حاکی از وجود رابطه خطی بین دبی و بار آبی می‌باشد. در شبیه‌سازی انجام شده میزان بار آبی بالادست سرریز برای تمامی مدل‌های سرریز با زوایای راس  $37^\circ$ ،  $42^\circ$ ،  $47.2^\circ$  و  $53^\circ$  یکسان وارد شده است. بنابراین میزان دبی ورودی به فلوم در



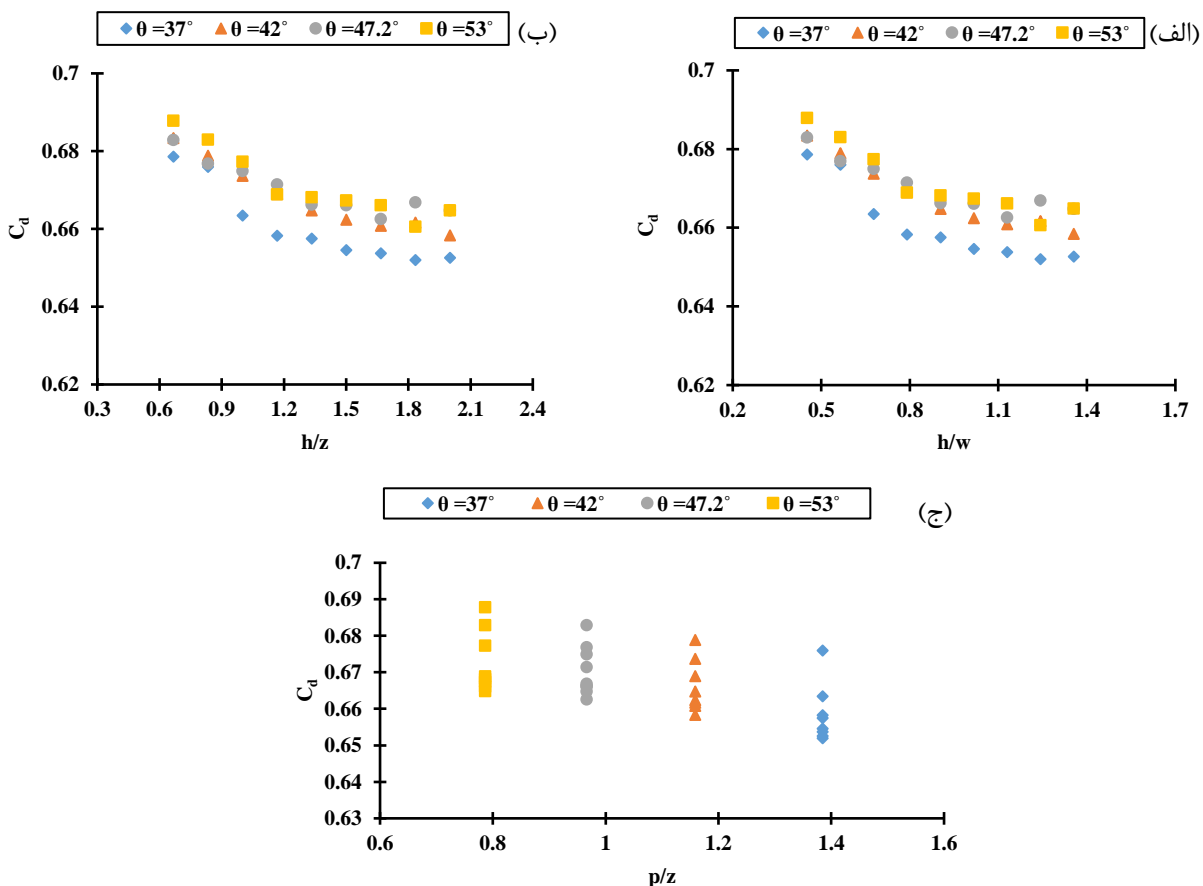
شکل ۱۲- الف) نمودار عدد فرود-دبی (ب) نمودار تغییرات عدد فرود در راستای طول کانال (ج) نمودار دبی-اشل



شکل ۱۳- تغییرات ضریب دبی حاصل از نتایج حل عددی در سرریزهای دودکشی

این موضوع در دیگر سرریزها هم چون سرریز دوزنقه‌ای، مثلثی و دایروی که عرض تراز سطح آب با افزایش دبی، روندی افزایشی یا ثابت دارد، صادق می‌باشد. به طوری که در این سرریزها با افزایش دبی، ضریب دبی افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به شکل (۱۴) تغییرات میزان ضریب دبی در برابر پارامترهای بی‌بعد  $h/z$ ،  $h/w$  و  $p/z$  ارائه شده است. به منظور معنی دار کردن برخی پارامترها و همچنین برازش و تفکیک مناسب داده‌ها از یکدیگر پارامتر بی‌بعد  $p/z$  از تقسیم پارامترهای بی‌بعد  $h/z$  بر  $h/p$  حاصل از آنالیز ابعادی به دست آمده است. با توجه به شکل (۱۴)، نتایج حاصل از شبیه سازی مدل‌ها حاکی از آن است که با ثابت نگه داشتن طول و ارتفاع تاج سرریز در تمامی مدل‌ها و همچنین افزایش فاصله عمود بین تاج سرریز و اولین نقطه‌ای که شیب سرریز تغییر می‌کند، ضریب دبی با افزایش دبی روندی کاهشی دارد.

با افزایش بار آبی روی تاج سرریز در هر یک از مدل‌های شبیه‌سازی شده زمانی که  $h \leq p$  است میزان ضریب دبی با حالت منظمی در حال کاهش است. در حالی که با افزایش زاویه و  $h/p$  و همچنین وقتی که  $p < h$  است نوساناتی در میزان ضریب دبی مشاهده می‌شود و ضریب دبی روند تقریباً کاهشی دارد. به طوری که این کاهش به جهت بالا رفتن سطح تماس جریان با لبه سرریز و همچنین افزایش توزیع فشار آب روی جریان مماسی بر لبه سرریز، ناشی از افزایش عمق آب روی تاج سرریز است که منجر به اصطکاک بیشتر در سطح تماس می‌گردد. لازم به ذکر است که میزان کاهش در ضریب دبی با افزایش عمق کم‌تر شده تا این که مقدار ضریب دبی تحت تأثیر افزایش عمق قرار نمی‌گیرد. همچنین در سرریزهای دودکشی به دلیل کوچک بودن گوشه‌ها و کاهش عرض سطح جریان، کاهش ضریب دبی منطقی می‌باشد. عکس



شکل ۱۴- تغییرات ضریب دبی حاصل از نتایج حل عددی در سرریزهای دودکشی

گردید. نحوه تعیین معادله پیش‌بینی ضریب دبی برای سرریز دودکشی به این صورت بود که با تعیین مقادیر متناظر  $h/p$  و  $h/w$  و  $h/z$  برای تمامی سرریزهای مدل شده و ضرایب دبی حاصل از نتایج حل عددی و همچنین تلفیق داده‌های مذکور، معادله پیش‌بینی شده مطابق روند زیر محاسبه گردید:

در تحقیق حاضر به منظور پیش‌بینی ضریب دبی برای سرریزهای مورد مطالعه، معادله‌ای در محدوده تحقیق حاضر برای سرریز دودکشی با زوایای  $37^\circ$ ،  $42^\circ$ ،  $47/3^\circ$  و  $53^\circ$  به ترتیب در محدود دبی و بار آبی ۲ الی ۹ لیتر بر ثانیه و  $0/04$  الی  $0/12$  متر بالای تاج سرریز در ارتفاع تاج سرریز  $0/06$  متر از کف کانال ارائه

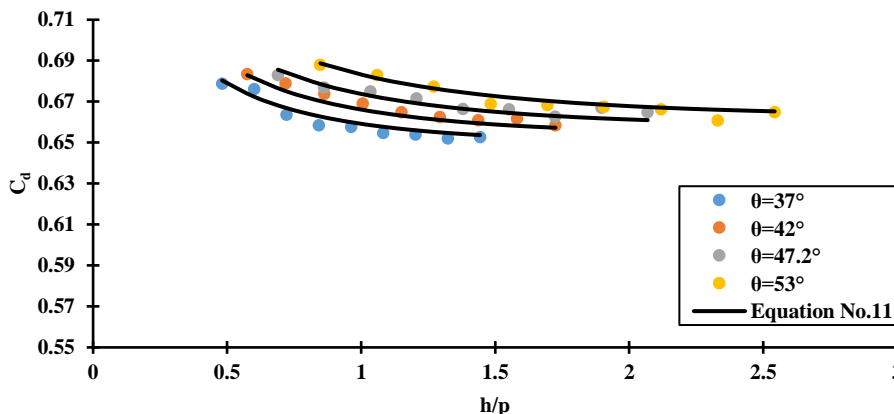
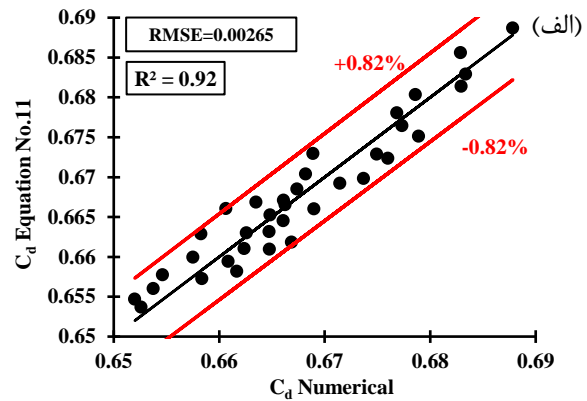
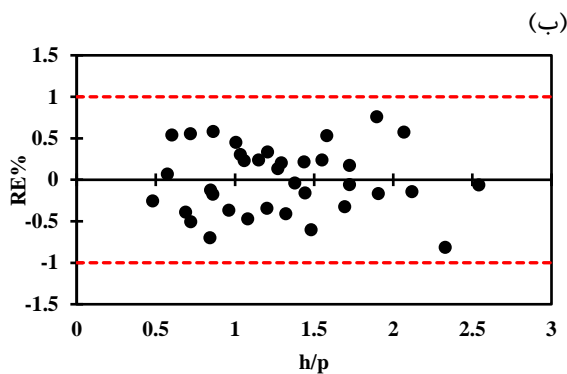
مطلق و خطای جذر میانگین مربعات ضریب‌دبی حاصل از معادله پیشنهادی در مقایسه با نتایج حل عددی به ترتیب ۰/۳۴٪، ۰/۰۲۲۷ و ۰/۰۲۶۵ است. در شکل (۱۵-ب)، پارامتر مستقل  $h/p$  و پارامتر وابسته  $C_d$  جهت بررسی دقت معادله (۱۱)، بررسی شده است. در شکل (۱۵-ب)، نمودار درصد خطای نسبی در برابر پارامتر بی‌بعد مؤثر  $h/p$  نشان داده شده است. در این شکل طیف وسیعی از داده‌ها در باند خطای نسبی  $\pm 1\%$  قرار گرفته‌اند که این موضوع بیانگر این است که رابطه پیشنهادی دقت بسیار مطلوبی در پیش‌بینی  $C_d$  داشته و رفتار خطی مورد انتظار سرریز دودکشی بین بار آبی و دبی وجود دارد که حاکی از دقت بالای رابطه پیشنهادی می‌باشد. در شکل (۱۵-ج)، مقایسه‌ای میان ضرایب-دبی به دست آمده از نتایج حل عددی برای تمامی سرریزها و ضرایب‌دبی حاصل از رابطه پیشنهادی (۱۱)، صورت پذیرفت. در این نمودارها خطوط ممتد نمایانگر ضرایب‌دبی توسط معادله پیشنهاد شده می‌باشد. با توجه به شکل (۱۵-ج)، مشاهده می‌شود که معادله پیشنهادی به صورت غیرخطی و با برازشی مناسب از میان داده‌های حاصل از شبیه‌سازی عبور می‌کند.

ابتدا فرم غیرخطی برای رابطه پیشنهادی ضریب‌دبی به صورت تابعی از چهار پارامتر بدون بعد مؤثر  $\theta$ ،  $h/p$ ،  $h/w$  و  $h/z$  تعیین گردید. شکل کلی معادله پیشنهادی به صورت رابطه (۱۰)، در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که  $\theta$ ، براساس درجه می‌باشد. (رابطه ۱۰)

$$C_d = \left( a \left( \frac{h}{p} \right)^b + c \left( \frac{h}{w} \right)^d + e \left( \frac{h}{z} \right)^f \right) \times (\tan \theta)^g$$

در رابطه بالا ضرایب  $a$ ،  $b$ ،  $c$ ،  $d$ ،  $e$ ،  $f$  و  $g$  در نرم‌افزار اکسل به صورت پیش‌فرض یک در نظر گرفته شد. با بهره‌گیری از Solver نرم‌افزار اکسل، معادله‌ی پیشنهادی به منظور دستیابی به فرم مناسب آن با کم‌ترین میزان خطا مطابق رابطه (۱۱)، ارائه گردید: (رابطه ۱۱)

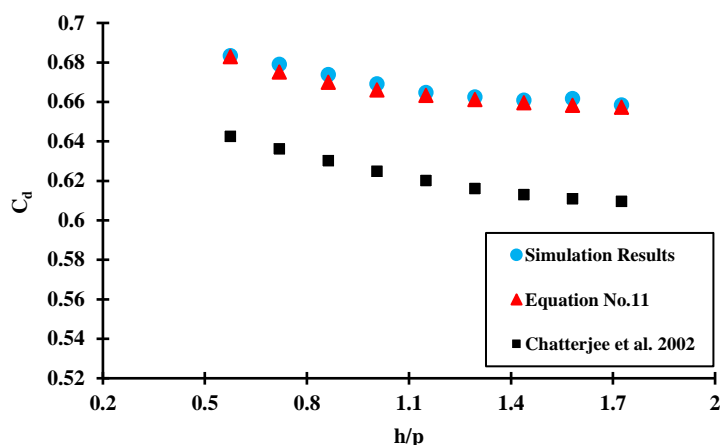
در شکل (۱۵-الف)، نمودار مقایسه مقادیر محاسباتی و عددی ضریب‌دبی رسم شده است. نتایج نشان داد که روند میزان تغییرات ضریب‌دبی حاصل از شبیه‌سازی، همانند مقادیر به دست آمده از رابطه (۱۱)، می‌باشد و ضریب همبستگی بالا میان داده‌ها وجود دارد و حداکثر مقدار درصد خطای نسبی ۰/۸۲٪ می‌باشد. همچنین مقادیر میانگین درصد خطای نسبی، میانگین خطای



شکل ۱۵- الف) مقایسه مقادیر محاسباتی و عددی ضریب‌دبی ب) پراکندگی درصد خطای نسبی داده‌های ضریب‌دبی ج) مقایسه میان ضرایب‌دبی حاصل از معادله پیشنهادی و عددی برای سرریزهای مدل شده

در شکل (۱۶)، ضریب دبی، بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی با رابطه (۱۱) و رابطه ارائه شده توسط محققان قبلی رسم گردید. نتایج حاصل از رابطه ارائه شده در مطالعه حاضر با نتایج مطالعه (Chatterjee *et al.* 2002) مورد مقایسه قرار گرفت. لازم به ذکر است که روابط ارائه شده در تحقیق حاضر و تحقیق (Chatterjee *et al.* 2002) برای شرایط جریان آزاد، صادق می‌باشند.

شکل ۱۶- نمودار مقایسه ضرایب دبی رابطه ارائه شده در تحقیق حاضر با رابطه محققان قبلی



شکل ۱۶- نمودار مقایسه ضرایب دبی رابطه ارائه شده در تحقیق حاضر با رابطه محققان قبلی

سرریز تغییر می‌کند. مهم‌ترین ویژگی که سرریزهای دودکشی را از سایر سرریزها متمایز می‌کند وجود رابطه خطی بین بار آبی و دبی می‌باشد. نتایج نشان داد که در نمودار دبی-اشل، رابطه خطی برای سرریزهای مدل شده وجود داشته و حساسیت هیدرولیکی سرریزها یک می‌باشد. بنابراین اندازه‌گیری میزان دبی در این سرریزها با دقت و درستی بالایی نسبت به سرریزهای دیگر انجام می‌گیرد. بر اساس نتایج به دست آمده در یک بار آبی یکسان، میزان دبی قرائت شده برای سرریزهای مختلف، متفاوت از یکدیگر می‌باشند. به طوری که با کاهش زاویه رأس سرریز میزان دبی افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که در تمامی سرریزهای شبیه‌سازی شده با افزایش دبی، به علت تماس بیشتر جریان با لبه سرریز و بالا بودن مقدار فشار در جریان مماسی با سرریز و همچنین انسداد گوشه‌های سرریز، ضریب دبی تقریباً روند کاهشی دارد. به عبارت دیگر با افزایش تراز سطح آب بالادست، حجم کم-تری از جریان از میان سرریز عبور می‌کند. در تمامی سرریزهای آزمون شده با افزایش دبی، عدد فرود افزایش و در بارهای آبی یکسان با افزایش زاویه  $\theta$ ، عدد فرود کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه لبه سرریز دودکشی هم عرض کانال نیست، بنابراین سرعت جریان در پشت سرریز در کناره‌های دیواره فلوم به کم‌ترین میزان ممکن می‌رسد و با افزایش زاویه و به تبع آن کاهش فاصله عمود بین تاج سرریز و اولین نقطه‌ای که شیب سرریز تغییر می‌کند، سرعت متوسط جریان هم‌گرایی بیشتری پیدا کرده و مقدار آن کم‌تر شده است. با انجام آنالیز ابعادی پارامترهای مؤثر بی بعد  $h/p$

مطابق شکل (۱۶)، با جایگذاری طول سرریز، ارتفاع تاج سرریز، فاصله عمود بین دو قسمت مثلثی-مستطیلی سرریز و بار آبی یکسان در روابط مذکور مشاهده شد که مقادیر ضریب دبی حاصل از مطالعه (Chatterjee *et al.* 2002)، اختلاف بیشتری نسبت به رابطه تلفیقی (۱۱)، دارد. علت این موضوع را می‌توان به پائین بودن ضریب همبستگی و عدم تأثیر زاویه رأس قسمت مثلثی به عنوان پارامتر مؤثر بر ضریب دبی در رابطه (Chatterjee *et al.* 2002) اشاره نمود به طوری که ضریب همبستگی رابطه (Chatterjee *et al.* 2002)،  $0.71$  می‌باشد. این در حالی است که ضریب همبستگی برای رابطه پیشنهادی تخمین ضریب دبی در تحقیق حاضر  $0.92$  بوده و نسبت به روابط ارائه شده قبلی بهبود یافته است.

## نتیجه‌گیری

هدف اصلی مطالعه حاضر، بررسی عددی پارامترهای مختلف هندسی سرریز دودکشی بر خصوصیات هیدرولیکی جریان می‌باشد. شبیه‌سازی بر روی سرریز دودکشی با زوایای  $37^\circ$ ،  $42^\circ$ ،  $47^\circ$  و  $53^\circ$  در ارتفاع تاج  $0.06$  متر از کف کانال برای هر کدام از سرریزها با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D به منظور بررسی خصوصیات خطی و هیدرولیکی سرریز دودکشی تحت شرایط جریان آزاد در یک کانال مستطیلی مورد بررسی قرار گرفتند. محدوده دبی و بار آبی مورد مطالعه در تحقیق حاضر به ترتیب از  $2$  الی  $9$  لیتر بر ثانیه و  $0.04$  الی  $0.12$  متر بالای تاج



دودکشی به‌عنوان عامل مؤثر در محاسبه ضریب‌دبی، سبب شد تا دقت رابطه ارائه شده در این تحقیق، نسبت به رابطه ارائه شده سایر محققان بهبود چشم‌گیری یابد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

## REFERENCES

- Baddour, R.E. (2008). Head-discharge equation for sharp-crested polynomial weir: *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 134(2), 260-262.
- Carrillo, J.M., Matos, J. and Lopes, R. (2020). Numerical modeling of free and submerged labyrinth weir flow for a large sidewall angle: *Environ Fluid Mech* 20, 357-374
- Chatterjee, C., Singh, R., Kar, S. K., Panda, S. N. and Vohra, S. L. (1998). Flow Characteristics of Chimney Weir under Submergence: *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 124(2), 96-101.
- Chatterjee, C., Singh, R. and Kar, S. K. (2002). Discharge Characteristics of Chimney Weir under Free-Flow Conditions: *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2002)128:3(175)
- Daneshfaraz, R., Aminvash, E., Abbaszadeh, H. (2021). Numerical Simulation of Energy Dissipation in Crescent-Shaped Contraction of the Flow Path, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(5), 1299-1314
- Daneshfaraz, R., Majedi Asl, M., Razmi, S., Norouzi, R. and Abraham, J. (2020). Experimental investigation of the effect of dual horizontal screens on the hydraulic performance of a vertical drop: *Environmental Science International Journal of Environmental Science and Technology*, 17(5), 2927-2936.
- Elazizy, I. M., Abou EL-Atta, N. Abd El-Lateef. M. and Mohamed, Elz. F. (2004). Characteristics of Submerged Modified Chimney Weir: *Ain Shams Engineering Journal*, 39, 381-399
- Eslahi, N., Amiri Tokaldany, E. and Vatankhah, A. R. (2014). Experimental Study on Determination of Flow Coefficient of the Linear and Quadratic Proportional Weirs in Rectangular Channels: *Journal of Hydraulics*, 8(4), 43-53. (In Farsi)
- Ghaderi, A., Daneshfaraz, R., Abbasi, S. et al. (2020a). Numerical analysis of the hydraulic characteristics of modified labyrinth weirs. *Int J Energ Water Res* 4, 425-436
- Ghaderi, A., Daneshfaraz, R., Dasineh, M. and Di Francesco, S. (2020b). Energy Dissipation and Hydraulics of Flow over Trapezoidal-Triangular Labyrinth Weirs: *Water*. 12(7), doi.org/10.3390/w12071992
- Ghaffari Gousheh, J., Fatahi Nafchi, R. and Samadi Boroujeni, H. (2018). Proportional weirs performance in the lateral catchment. in: *2nd National Conference on Knowledge and Technology of Agricultural Sciences, Natural Resources and Environment of Iran, Tehran*. (In Farsi)
- Hayawi, H. A. M., Yahya. A. A. G. and Hayawi G. A. M. (2005). Coefficient of Discharge of Chimney Weir Under free and Submerged flow Conditions: *Al-Rafidain Engineering Journal (AREJ)*, 13(1), 62-69.
- Keshava Murty, K. and Giridhar, D. P. (1989). Inverted v-notch: Practical proportional weir: *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 115(6), 1035-1050.
- Keshava Murthy, K. and Giridhar, D. P. (1990). Improved Inverted V-Notch or Chimney Weir: *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 116 (3), 374-386.
- Kianmehr, A., Kouchakzadeh, S. and Vatankhah, A. R. (2015). Experimental study of linear proportional weirs for circle conduit: *Iranian Water Research Journal*, 8(15), 93-101. (In Farsi)
- Norouzi, R., Daneshfaraz, R. and Ghaderi, A. (2019). Investigation of discharge coefficient of trapezoidal labyrinth weirs using artificial neural networks and support vector machines: *Applied Water Science* 9, 148, doi.org/10.1007/s13201-019-1026-5
- Norouzi, R., Arvanaghi, H., Salmasi, F., Farsadzadeh, D. and Ghorbani, M. A. (2020). A new approach for oblique weir discharge coefficient prediction based on hybrid inclusive multiple model: *Flow Measurement and Instrumentation*, 6(11), doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2020.101810
- Norouzi, R., Arvanaghi, H., Salmasi, F., Farsadzadeh, D. and Ghorbani, M. A. (2021). Influence of geometrical parameters on flow hydraulic properties in inclined weirs: *Irrigation and Water Engineering*, 11(3), 35-54. (In Farsi)
- Rezazadeh, H., Manafpour, M. and Ebrahimnezhadian, H. (2020). Three-Dimensional Simulation of Flow Over Sharp-Crested Weirs Using Volume of Fluid Method: *Journal of Applied Engineering Sciences*, 10(1), 75-82.
- Salmasi, F., Nourani, B., Norouzi, R. and Rezaei, F. (2019). Investigation the Stage-Discharge Relationship and Discharge Coefficient in Sharp-Crested Weirs with Triangular Shape in Plan: *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, doi: 10.22060/ceej.2019.16931.6399. (In Farsi)
- Singer, J. and Lewis, D.C.G. (1966). Proportional-flow weirs for automatic sampling or dosing: *Water and Water Engineering*, 70(841), 105-111.
- Vatankhah, A. R. and Kouchakzadeh, S. (2009). Discussion of Head-discharge equation for sharp-crested polynomial weir, by Baddour, R.E. :

با استفاده از Solver نرم‌افزار اکسل  $h/w$ ،  $h/z$  و  $\theta$  حاصل گردید. رابطه چند جمله‌ای بر اساس متغیرهای مذکور به‌دست آمد که برای تخمین ضریب‌دبی با اطمینان بالا در محدوده تحقیق حاضر، می‌تواند به‌کار گرفته شود. تأثیر زاویه رأس قسمت مثلثی سرریز

*Journal of Irrigation and Drainage Engineering*,  
135(3), 393-395.  
Vatankhah, A. R. (2012). Head-discharge equation for

sharp-crested weir with piecewise-linear sides:  
*Journal of Irrigation and Drainage Engineering*,  
138(11), 1011-1018.