

## بررسی خصوصیات هیدرولیکی جریان اطراف سرریزهای مدور قائم با استفاده از مدل

رامین منصوری<sup>1\*</sup>، محمد ذونعمت کرمانی<sup>2</sup> و محمدرضا گرمسیری<sup>3</sup>

1- استادیار گروه مهندسی عمران، واحد سیرجان، دانشگاه آزاد اسلامی، سیرجان، ایران

2- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

3- استادیار مهندسی معدن، واحد سیرجان، دانشگاه آزاد اسلامی، سیرجان، ایران

\*ramin.mansouri@iausirjan.ac.ir

(دریافت مقاله: 96/10/28؛ پذیرش مقاله: 97/4/31)

**چکیده** - سرریز مدور قائم با شکل‌های مختلف ورودی در شرایطی که محدودیت مکانی برای ساخت انواع دیگر سرریز وجود داشته باشد، بسیار مؤثر عمل می‌کند. هیدرولیک جریان در سرریز مدور قائم به سه دسته آزاد، روزنه‌ای و تحت فشار تقسیم می‌شود. در این تحقیق خصوصیات هیدرولیکی در سرریز مدور قائم به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. خصوصیات هیدرولیکی مانند پروفیل رویی و زیرین سرریز مدور قائم ساده، دبی با تراز آب بالادست و ضریب دبی جریان در حالت مدل‌سازی با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه گردید. بهترین شرایط مدل عددی در شبیه‌سازی جریان بر روی سرریز مدور قائم در این تحقیق شامل شبکه محاسباتی با 10602 گره، مدل آشفته دو معادله‌ای  $k-\epsilon$  استاندارد و تابع دیواره استاندارد است. نتایج این تحقیق برای پروفیل رویه و زیرین جت ریزشی تطابق بسیار خوبی بین نتایج عددی و نتایج آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. همچنین بین نتایج تراز آب بر روی تاج سرریز و دبی سرریز شده مشخص شد در ترازهای آب کم، نتایج در مدل‌سازی عددی تقریباً با نتایج آزمایشگاهی تطابق دارد که در مجموع بین نتایج عددی و آزمایشگاهی ضریب  $R^2$  برای داده‌ها برابر 0/991 است، همچنین خطای جذر میانگین مربعات برابر 35/136 بدست آمد؛ اما با افزایش تراز آب بر روی تاج سرریز اختلاف بین مقدار دبی عددی و آزمایشگاهی زیاد می‌گردد. در بررسی ضریب دبی جریان در حالت مدل‌سازی و آزمایشگاهی مشاهده گردید با کاهش نسبت  $P/R$  اختلاف مقادیر ضریب دبی در دو حالت عددی و آزمایشگاهی افزایش می‌یابد.

**کلیدواژگان:** سرریز مدور قائم، مدل عددی، مدل آشفته، ضریب دبی، تابع دیواره.

### 1- مقدمه

انواع مختلفی دارند اما یکی از پرکاربردترین انواع آنها، سرریز مدور قائم است که ورودی آن شکل‌های متفاوتی می‌تواند داشته باشد (شکل 1). این نوع سرریز در شرایطی که محدودیت فضا برای ساخت انواع دیگر سرریز وجود داشته باشد، بسیار مؤثر عمل می‌کند (Wayne Coleman et al., 2004).

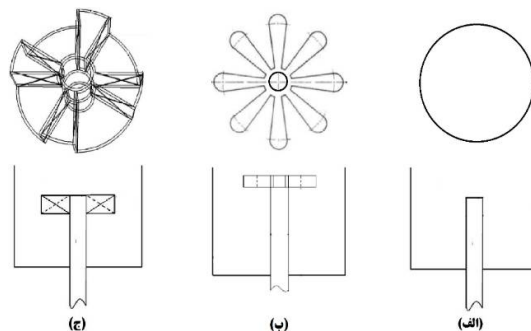
سرریز یکی از مهمترین اجزای یک سد به‌شمار می‌رود که نقش آن عبور آب اضافی از سراب (بالادست) به پایاب (پایین‌دست) سد است. این مسأله نه تنها در کنترل سطح آب پشت سد تأثیرگذار است بلکه عامل مهمی در پایداری سد مخصوصاً در شرایط بحرانی بشمار می‌رود. سرریزها

سازه‌های هیدرولیکی پایین دست خواهد داشت. پدیده‌ی گرداب در مجاری بسته‌ی بزرگ باعث کاهش دبی جریان، ایجاد ارتعاش و جدایی خطوط جریان و نهایتاً کاهش بازدهی توربین‌ها و سیستم‌های پمپاژ می‌شود و در بسیاری از موارد ایمنی سازه را به خطر می‌اندازد. Peterka (1956) با مدل آزمایشگاهی ثابت کرد تشکیل گرداب نتیجه‌ی چرخش جریان در محل انقباض آن است. در این شرایط سرعت زاویه‌ای افزایش یافته و سطح مقطع جریان کاهش می‌یابد. این پدیده عموماً وقتی که جریان با سطح آزاد وارد یک مجرای بسته نظیر لوله‌ی آبگیر و سرریز مدور قائم می‌شود، اتفاق می‌افتد.

Novak and Cabelka (1981) با مطالعه‌ی اثر شکل تیغه‌ها بر جریان در مجاری عمودی، به اصلاح جریان‌های شعاعی ورودی به سرریز پرداختند. کبیری سامانی (1379) با مدل‌سازی آزمایشگاهی سرریز مدور قائم نشان داد که با استفاده از تیغه‌های ضدگرداب، می‌توان قدرت چرخشی جریان در ورودی شفت قائم را به شدت کاهش داد. موسوی جهرمی و السستی (1385) با انجام تحقیقات آزمایشگاهی بر روی سه سرریز با ابعاد مختلف از جنس مس و سفال، به این نتیجه رسیدند که تیغه گردابشکن در ضریب دبی مؤثر است و باعث افزایش آن می‌شود. هرچه طول تیغه گردابشکن بیشتر باشد، تأثیر بیشتری در کنترل گرداب و تلاطم و افزایش ضریب دبی دارد. به نظر می‌رسد که با افزایش تعداد تیغه‌های گردابشکن همیشه وضعیت مطلوب حاصل نمی‌شود؛ زیرا تعداد 3 تیغه گردابشکن راندمان بالاتری نسبت به 12 تیغه گردابشکن داشته است. در آزمایش‌های انجام شده، تعداد گردابشکن کمتر تأثیر بیشتری در کنترل گرداب داشته است.

تحقیقات جامعی پیرامون استفاده از صفحات کاهش گرداب توسط محققان مختلف انجام شده است که از آن جمله می‌توان به تحقیقات (Borghei, Khatsuria (2005), Borghei and Kabiri- and Kabiri-Samani (2010), Wang et al. (2013), Samani (2013), Aghamajidi (2013) و غیره اشاره کرد.

یکی دیگر از روش‌های اصلاح ورودی سرریز مدور قائم، استفاده از ورودی از نوع سرریز کلید پیانویی است. در



شکل 1 نمایی شماتیک سرریز مدور قائم با شکل‌های مختلف ورودی (الف) ساده، (ب) گلبرگی و (ج) کلید پیانویی

هیدرولیک جریان در سرریز مدور قائم به سه دسته آزاد، روزنه‌ای و تحت فشار تقسیم می‌شود. برای ارتفاع‌های کم، جریان آب از روی سرریزهای مدور قائم به وسیله‌ی تاج سرریز کنترل می‌شود. در این صورت تبدیل قائم در پایین تاج، نیمه پر است و جریان به دیواره‌های شفت قائم می‌چسبد. این نوع جریان، جریان آزاد (ریزشی) نامیده می‌شود. با افزایش دبی نقطه‌ی تبدیل و قسمت فوقانی برآمدگی صعود می‌کند. در این صورت جریان ریزشی به صورت یک جت قائم درآمده و در نقطه‌ای به نام تبدیل با سفره‌ی ریزشی برخورد می‌کند. در این حالت جریان به صورت روزنه‌ای است. حد بالایی تراز آب روی سرریز مدور قائم "آستانه استغراق روزنه‌ای" نامیده می‌شود. با افزایش هد آب در اثر افزایش دبی، نقطه‌ی تبدیل مستغرق می‌شود و شفت قائم و تونل انحرافی به صورت تحت فشار عمل می‌کنند (Aghamajidi, 2013).

مطابق نظریه Wagner (1952) اگر  $h/D \leq 0/225$  (نسبت ارتفاع آب روی سرریز از روی تاج مدور به قطر شفت)، سرریز به صورت آزاد عمل می‌کند. اما اگر  $h/D \geq 0/225$  شود، سرریز مستغرق می‌شود و ضریب تخلیه کاهش می‌یابد. برای  $h/D \geq 0/5$ ، تراز آب روی سرریز کاملاً افقی و سرریز به طور کامل مستغرق می‌شود.

تاکنون تحقیقات زیادی بر روی سرریزهای مدور قائم و نیلوفری (شکل تکامل یافته سرریزهای مدور قائم) صورت گرفته است. Gulliver et al. (1986) نشان دادند که ورودی سرریز مدور قائم غالباً مستعد ایجاد جریان‌های گردابی است. این نوع جریان آثار زیانبار قابل توجهی بر

نشان دادند که مدل (RNG)  $k-\varepsilon$  برای این شبیه‌سازی بهترین جواب را ارائه می‌کند.

همان‌طور که بیان گردید بر روی سرریز مدور قائم تحقیقات آزمایشگاهی زیادی صورت گرفته است. اما بر روی سرریز مدور قائم مدل‌سازی عددی تحقیقات محدودی صورت گرفته است. از معدود موارد می‌توان به مدل‌سازی عددی میدان جریان در اطراف سرریزهای مدور قائم با ورودی کلید پیانویی (نصیری و همکاران، 1395) اشاره کرد. در این پژوهش تأثیر طول، ارتفاع و زاویه قطاع‌های کلید پیانویی بر هیدرولیک جریان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از سرریز کلید پیانویی مدور به عنوان ورودی شفت‌های قائم یکی از روش‌های اصلاح ورودی سرریز مدور قائم است که تأثیر چشمگیری بر کاهش قدرت جریان گردابی دارد، ضمن اینکه ضریب دبی جریان را افزایش می‌دهد. در بحث مدل-سازی جریان در سازه‌های هیدرولیکی تحقیقات زیادی صورت گرفته است که می‌توان به تحقیقات Mansouri et al. (2014)، al. (2014)، Rahimzadeh et al. (2012)، Dargahi (2006) و غیره اشاره کرد.

در این پژوهش به بررسی عددی خصوصیات هیدرولیکی جریان بر روی سرریز مدور قائم با استفاده از نرم‌افزار فلوننت پرداخته شده است. در این تحقیق شرایط مدل‌سازی مانند مدل‌های آشفتگی، توابع دیواره، شبکه محاسباتی در اندازه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفتند و بهترین شرایط که نتایج عددی مطابق با نتایج آزمایشگاهی ارائه کند، بدست آمده است. به منظور صحت‌سنجی نتایج مدل‌سازی از نتایج آزمایشگاهی Wagner (1952) استفاده شده است. به منظور شبیه‌سازی جریان در سرریز مدور قائم سه دسته هیدرولیک جریان آزاد، روزنه‌ای و تحت فشار مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## 2- مواد و روش‌ها

### 2-1- اطلاعات آزمایشگاهی مورد استفاده

در این تحقیق از داده‌های آزمایشگاهی مربوط به سرریز مدور قائم ساده که توسط Wagner (1952) بدست آمد، استفاده شده است. در این پژوهش از سرریز مدور قائم با

زمینه این نوع سرریز، محققان پژوهش‌های متعددی انجام داده‌اند که می‌توان به تحقیقات (Lewellen, Bieri, Lempérière and Laugier (2007), et al. (2009) Kabiri-Samani and Javaheri, Ouamane (2003) (2011)، شمشی (1391) و غیره اشاره کرد.

Trivellato (2010) پس از بررسی میدان جریان، ورودی کیف شکلی که شکل جانبی آن از نقاط عطف پروفیل قائم سرعت شعاعی به دست می‌آید، را معرفی نمود.

Schleiss (2012) با بررسی انواع مختلف ورودی سرریزهای مدور، به منظور کاهش معایب ذاتی این نوع سرریز طرح‌های ورودی مختلفی از جمله طرح گلبرگی (گل مینا) را پیشنهاد داد. بر این اساس استفاده از ورودی‌های اصلاح شده مانند گلبرگ، در حالت کلی به صورت کاملاً مؤثر دبی جریان و عمق استغراق را تغییر می‌دهد. همچنین می‌توان به تحقیقات Shamsi and Kabiri-Samani (2016) بر روی مدل‌سازی آزمایشگاهی جریان چرخشی در سرریزهای قائم با ورودی کلید پیانویی اشاره کرد؛ آنها در تحقیق خود نشان دادند که دبی انتقالی در سرریز مدور قائم با ورودی کلید پیانویی شش برابر بیشتر از سرریز مدور قائم ساده است.

در بحث مدل‌سازی جریان در سازه‌های هیدرولیکی تحقیقات زیادی صورت گرفته است که می‌توان به تحقیقات (Mansouri et al. (2014) شبیه‌سازی جریان بر روی شیب شکن، Rahimzadeh et al. (2012) مدل‌سازی آشفتگی در سرریز مدور قائم، Dargahi (2006) مدل‌سازی هیدرولیکی در سرریز ریزشی آزاد و غیره اشاره کرد. در همین راستا می‌توان به تحقیقات Zachoval and Roušar (2015) بر روی شبیه‌سازی خصوصیات جریان در سرریزهای لبه پهن اشاره کرد، آنها در تحقیق خود از معادلات RANS و همچنین مدل آشفتگی دم معادله‌ای SST استفاده کردند. آنها یافتند که این مدل نتایج بهتری را نسبت به دیگر مدل‌های آشفتگی ارائه می‌کند.

همچنین از جدیدترین تحقیقات در زمینه شبیه‌سازی عددی جریان می‌توان به تحقیق Mahtabi and Arvanaghi (2018) اشاره کرد؛ آنها در تحقیق خود بر روی شبیه‌سازی جریان در سرریزهای مستطیلی لبه تیز

PISO که برای جریان‌های گذرا (غیرماندگار) توصیه شده (FLUENT User's Guide, 2003)، استفاده گردید.

$$\frac{\partial p'_s}{\partial x} = \frac{\partial p_s}{\partial x} - \rho_0 g \quad (2)$$

در رابطه (2)،  $\rho_0 g$  فشار هیدرواستاتیک می‌باشد. به‌منظور مدل‌سازی تنش رینولدز از مدل‌های آشفتگی و آرام استفاده شد.

مدل‌های آشفتگی دو معادله‌ای  $k-\varepsilon$ (Standard)،  $k-\varepsilon$ (RNG)،  $k-\varepsilon$ (Realizable) و  $k-\omega$ (Standard) در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. مدل آشفتگی دو معادله‌ای  $k-\varepsilon$ (Standard) یک مدل نیمه تجربی بر اساس معادلات انتقالی برای انرژی جنبشی آشفته ( $k$ ) و نسبت پراکندگی ( $\varepsilon$ ) می‌باشد. برای استفاده از مدل آشفته  $k-\varepsilon$  فرض بر این است جریان کاملاً آشفته بوده و تأثیرات لزجت ملکولی قابل چشم‌پوشی باشد. از این رو مدل  $k-\varepsilon$ (Standard) فقط برای جریان‌های کاملاً آشفته معتبر می‌باشد. انرژی جنبشی آشفته  $k$  و نسبت پراکندگی  $\varepsilon$  از معادلات انتقالی زیر به‌دست می‌آیند.

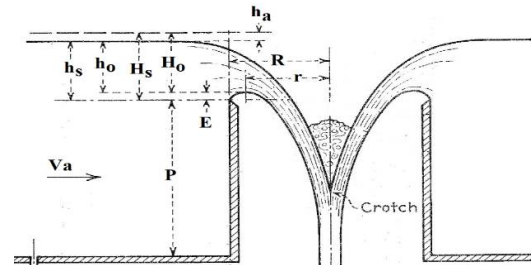
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (4)$$

در معادلات بالا،  $G_k$  تولید شده از معادله انرژی آشفته به علت گرادیان سرعت متوسط،  $G_b$  تولید شده از معادله انرژی آشفته به نیروی بالابرنده (نیروی ارشمیدس)،  $Y_M$  تأثیرات نوسانات انبساطی در آشفتگی‌های فشرده در سرتاسر نسبت پراکندگی،  $C_{1\varepsilon}$ ،  $C_{2\varepsilon}$  و  $C_{3\varepsilon}$  مقادیر ثابت می‌باشند.  $\sigma_k$  و  $\sigma_\varepsilon$  عدد آشفته پراندتل برای  $k$  و  $\varepsilon$  می‌باشند.  $S_k$  و  $S_\varepsilon$  پارامترهای تعریف شده می‌باشند و در نهایت  $\mu_t$  لزجت گردابه‌ای است. مدل  $k-\varepsilon$ (RNG) از روش شدت آماری استنتاج شده است. مدل  $k-\varepsilon$ (Realizable) مدلی جدید از بسط نسبی روابط قبلی می‌باشد. مدل‌های آشفتگی دو معادله‌ای  $k-\omega$  یک مدل تجربی بر پایه‌ی معادلات انتقال برای انرژی جنبشی آشفته ( $k$ ) و نسبت پراکندگی مخصوص ( $\omega$ ) می‌باشد. همچنین روش حجم

قطر داخلی  $50/81 (2R)$  سانتی‌متر (1 فوت و 8 اینچ) و ارتفاع  $50/81 (P)$  سانتی‌متر از کف کانال استفاده شد. نمای شماتیک از سرریز و پارامترهای هیدرولیکی و فیزیکی مورد استفاده توسط Wagner (1952) در شکل 2 نشان داده شده است.

در شکل 2، ارتفاع سرریز  $P$ ، شعاع دهانه ورودی سرریز  $R$ ، تراز آب بر روی تاج سرریز  $h_s$ ، ارتفاع انرژی جنبشی جریان  $h_a$  انرژی کل آب بر روی تاج سرریز  $H_s = h_s + h_a$ ، متوسط سرعت جریان در مخزن  $V_a$ ، ارتفاع آب نسبت به بالاترین نقطه پروفیل زیرین جت ریزشی  $h_o$ ، انرژی کل آب نسبت به بالاترین نقطه پروفیل زیرین جت ریزشی  $H_o = h_o + h_a$  و بیشترین برآمدگی پروفیل زیرین جت ریزشی  $E$  است.



شکل 2 نمایی شماتیک سرریز مدور قائم ساده (Wagner, 1952)

## 2-2- مدل‌سازی عددی

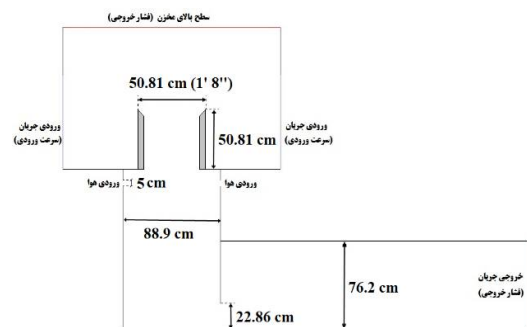
در تحقیق حاضر جهت شبیه‌سازی رایانه‌ای از نرم‌افزار فلوئنت استفاده گردید. مدل‌سازی عددی شامل حل عددی معادلات ناویر استوکس است که بر پایه قوانین بقای جرم و اندازه حرکت برای هر سیال استوار می‌باشند (رابطه 1).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v_r) + \frac{\rho v_r}{r} = S_m \quad (1)$$

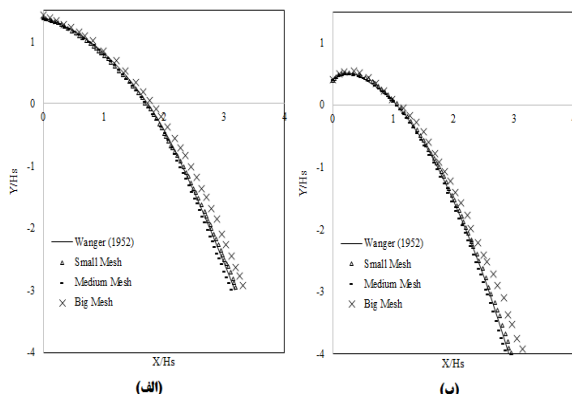
در رابطه (1)،  $x$  محور مختصات شعاعی،  $v_x$  سرعت در راستای  $x$  و  $v_r$  سرعت در راستای  $r$  می‌باشد. در مدل عددی از طرح گسسته‌سازی معادله فشار (رابطه 2) به روش PRESTO که این روش برای جریان‌های با چرخش زیاد، جریان‌های شامل گرادیان شدید فشار یا دامنه‌های با انحنا زیاد هندسی می‌باشد (جوان و همکاران، 1392)، استفاده شد و جریان به‌صورت غیر ماندگار مدل‌سازی گردید. همچنین از الگوریتم کوپل کننده فشار-سرعت،

5854 گره)، صحت نتایج و استقلال حل از شبکه تحقیق شد. همان‌طور که در شکل 4 نشان داده شده پروفیل بالایی و زیرین جت ریزشی در شبکه درشت دارای اختلاف با نتایج آزمایشگاهی است. اما در دو حالت شبکه متوسط و ریز نتایج تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.

ملاحظه می‌شود هرچه پروفیل سطح آب به سمت داخل سرریز و محل طلاقی جت جریان (Crotch) نزدیک‌تر شود، اختلاف بین نتایج عددی و آزمایشگاهی افزایش می‌یابد. دلیل این اختلاف به واسطه آشفتگی زیاد جریان در محل طلاقی است؛ این آشفتگی باعث می‌شود مدل عددی نتواند پروفیل جریان را به خوبی شبیه‌سازی نماید.



شکل 3 مدل سرریز مدور قائم ساده و شرایط مرزی در تحقیق حاضر



شکل 4 بررسی شبکه محاسباتی (الف) پروفیل بالایی جت ریزشی (ب) پروفیل زیرین جت ریزشی

از آنجا که به کمک شبکه متوسط و ریز نتایج رضایتبخشی به دست آمد و با در نظر گرفتن زمان دو برابری مورد نیاز

سیال (VOF) جهت مدل‌سازی سطح آزاد به کار گرفته شد.

در مرز ورودی جریان در مخزن شرط مرزی سرعت ورودی و در مرز فوقانی کانال شرط مرزی فشار و در محل خروجی لوله انتهایی سرریز نیز شرط مرزی فشار و برای قسمت مجرای ورودی هوا شرط مرزی Inlet Vent به برنامه معرفی گردید. علاوه بر آن اثر سطح آزاد آب با توجه به شرایط مرزی با روش حجم سیال نشان داده شد (شکل 3).

در مورد بستر و دیواره‌ها از شرط مرزی غیرلغزشی استفاده شد که بر مبنای آن مولفه سرعت موازی دیوار، روی سطح دیوار برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. به منظور بررسی اثر دیواره‌ها دو نوع تابع دیواره استاندارد و تابع دیواره غیرلغزشی مورد بررسی قرار گرفت.

### 3-2- شبکه عددی

برای حل عددی لازم است که میدان جریان گسسته شود. در این پژوهش میدان محاسباتی شامل مخزن تامین جریان، کانال‌های بالادست و پایین‌دست و حوضچه آرامش با استفاده از شبکه‌بندی منشوری منظم به کمک نرم‌افزار Gambit گسسته گردید.

### 3- نتایج و بحث

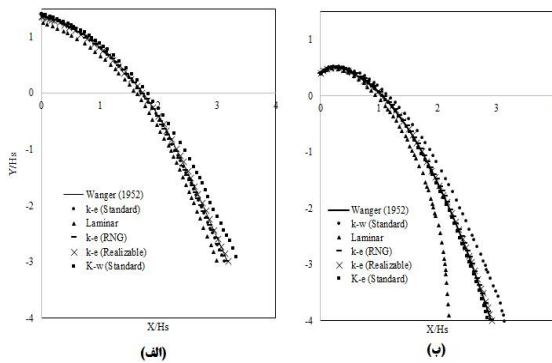
در مرحله نخست با هدف بدست آوردن شرایط بهینه، مدل‌سازی شرایط مختلف سرریز مدور قائم ساده بررسی شد و بهترین شرایط برای تعیین دیگر خصوصیات هیدرولیکی استفاده گردید. به منظور مقایسه نتایج عددی در شرایط مختلف با نتایج آزمایشگاهی (Wagner (1952)، پروفیل بالا و زیرین جت ریزشی جریان در حالت  $H_s/R=0.2$  در حالات مختلف با هم مقایسه گردید. پس از بدست آوردن بهترین شرایط مدل‌سازی حالات دیگر نسبت  $H_s/R$  نیز مدل‌سازی گردید.

### 3-1- بهترین شرایط مدل‌سازی

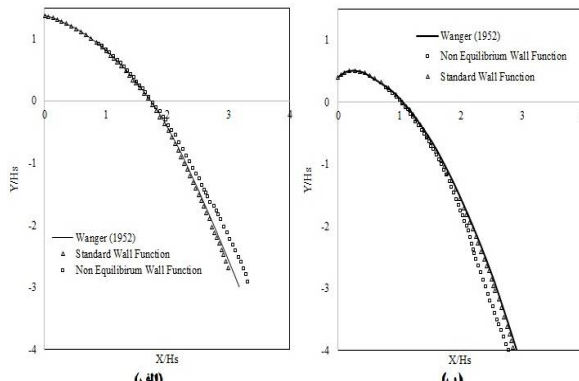
در اولین قدم یک دبی با استفاده از شبکه‌های محاسباتی ریز (18732 گره)، متوسط (10602 گره) و درشت

و تابع دیواره غیرلغزشی در حالت  $H_s/R=0.2$  مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از مقایسه پروفیل رویی و زیرین جت ریزشی در دو نوع تابع دیواره با نتایج آزمایشگاهی در شکل 6 نشان داده شده است.

نتایج تحقیقات نشان داده است که ادغام مدل آشفته دو معادله‌ای  $k-\varepsilon$  که از طریق منطقه نزدیک دیواره بهتر شبیه‌سازی را انجام می‌دهد و استفاده از شرایط بدون لغزش نتایج نامطلوب را به دست می‌دهد (Launder and Spalding, 1974). در شکل 6 نیز نتایج تحقیقات گذشته ثابت گردید، همان‌طور که مشخص است در حالت تابع دیواره غیرلغزشی از آنجا که مدل مورد استفاده تحقیق مدل آشفته دو معادله‌ای  $k-\varepsilon$  است، نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی اختلاف زیادی را نشان می‌دهد.



شکل 5 بررسی مدل‌های آشفتگی و آرام (الف) پروفیل بالایی جت ریزشی (ب) پروفیل زیرین جت ریزشی



شکل 6 بررسی تابع دیواره (الف) پروفیل بالایی جت ریزشی (ب) پروفیل زیرین جت ریزشی

اما در مدل تابع دیواره استاندارد که خود این تابع دیوار در

برای اجرای شبکه ریز نسبت به شبکه متوسط، بنابراین شبکه متوسط با 10602 گره که دارای تطابق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی بود انتخاب شد. از شبکه‌های با اندازه سلول‌های مشابه این شبکه برای مدل‌سازی جریان در حالات دیگر استفاده گردید.

در ادامه با استفاده از شبکه متوسط که دارای نوسانات کم‌تر و تطابق مطلوبی با نتایج آزمایشگاهی بود، اثر مدل آرام و مدل‌های آشفتگی دو معادله‌ای  $k-\varepsilon$  (Standard),  $k-\varepsilon$  (RNG),  $k-\varepsilon$  (Realizable) و  $k-\omega$  (Standard) برای سرریز مدور قائم ساده در در حالت  $H_s/R=0.2$  مورد بررسی قرار گرفت. در این حالت نیز مطابق شکل 5 پروفیل بالایی و زیرین جت ریزشی در حالات مختلف با نتایج آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت.

بررسی نتایج نشان می‌دهد که مدل آرام با توجه به اینکه قادر نیست آشفتگی جریان را در محل طاقی جت ریزشی مدل‌سازی نماید بنابراین از نظر نتایج تفاوت بسیار زیادی با نتایج آزمایشگاهی دارد. در مدل آرام همان‌طور که مشاهده می‌شود با نزدیک تر شدن پروفیل زیرین جت ریزشی به انتهای لوله قائم سرریز، اختلاف بیشتری بین نتایج آزمایشگاهی و مدل مشاهده می‌شود. از آنجایی که در مدل آشفته  $k-\omega$  (Standard) به دلیل اینکه مدل آشفتگی دو معادله‌ای  $k-\omega$  یک مدل تجربی بر پایه‌ی معادلات انتقال برای انرژی جنبشی آشفته ( $k$ ) و نسبت پراکندگی مخصوص ( $\omega$ ) است، قادر نیست در محل طاقی جت ریزشی، پروفیل جریان را به خوبی شبیه‌سازی نماید؛ زیرا معادله نسبت پراکندگی مخصوص ( $\omega$ ) در خود تأثیر اثرات ضریب پخش را دارد. در ادامه بررسی نتایج شبیه‌سازی مشاهده می‌شود تفاوت معنی داری بین سه مدل آشفته  $k-\varepsilon$  (Standard),  $k-\varepsilon$  (RNG),  $k-\varepsilon$  (Realizable) این نتایج تطابق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. به علت نتایج مناسب، از مدل آشفته دو معادله‌ای  $k-\varepsilon$  استاندارد برای ادامه تحقیقات برای تمامی حالت‌ها استفاده شد.

به منظور یافتن بهترین تابع دیوار در این تحقیق، شبیه‌سازی با شبکه محاسباتی متوسط و مدل آشفته دو معادله‌ای  $k-\varepsilon$  استاندارد برای دو نوع تابع دیواره استاندارد

جریان صورت گرفت و نتایج پروفیل رویی و زیرین جت ریزشی آب در دو حالت عددی و آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه گردید. نتایج حاصل از این مقایسه در شکل 7 ارائه شده است.

همان‌طور که از شکل 7 ملاحظه می‌شود، در  $H_s/R=0.2$  نقطه طلاقی جت ریزشی دور تا دور سرریز مدور در انتهای لوله عمودی بوده است که هیدرولیک جریان در این حالت آزاد یا ریزشی نام دارد. با افزایش مقدار  $H_s/R$  نقطه‌ی تبدیل (نقطه طلاقی) و قسمت فوقانی برآمدگی صعود می‌کند. در این صورت جریان ریزشی به صورت یک جت قائم درآمده و در نقطه‌ای به نام تبدیل با سفره‌ی ریزشی برخورد می‌کند. در این حالت جریان به صورت روزنه‌ای است. از آنجایی که در مدل شبیه‌ساز اختلاط جریان در نقطه تلاقی بسیار زیاد است و سلول‌های شبکه محاسباتی از آب و هوا پر می‌باشند، در محل آستانه استغراق روزنه‌ای، اختلاط و آشفتگی زیادی مشاهده می‌شود.

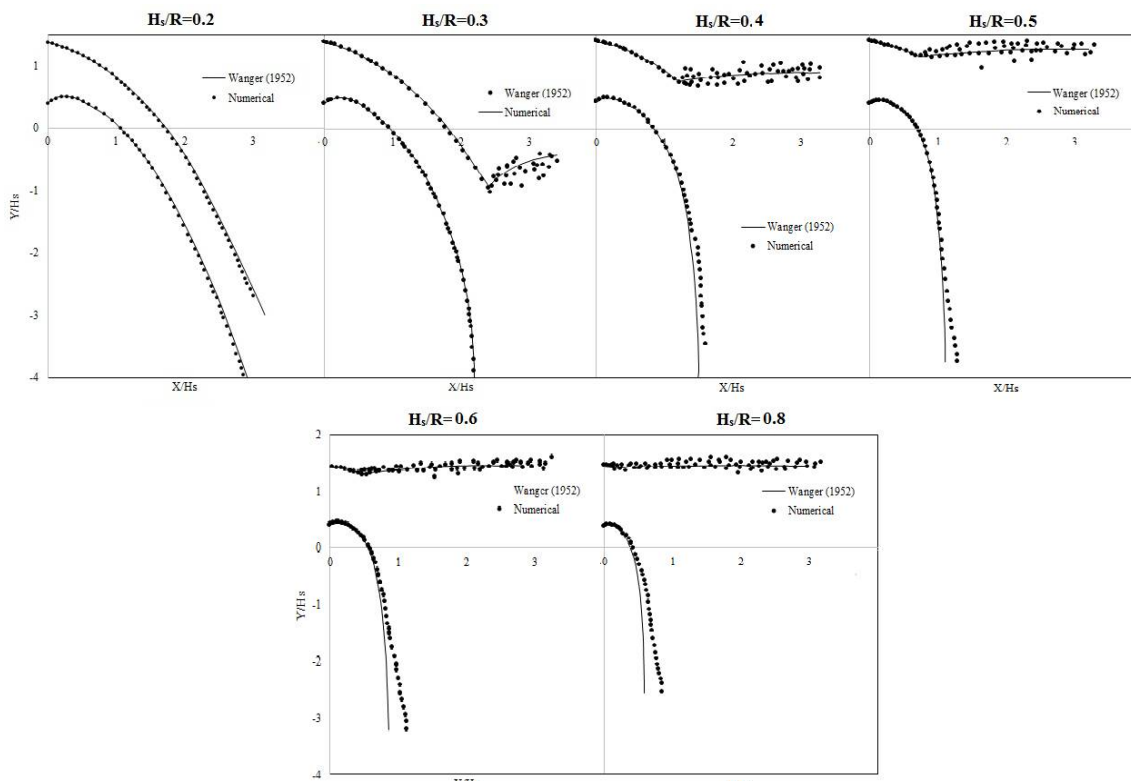
نزدیکی دیواره دو لایه ایجاد کرده و تأثیر دیواره را در این دولایه شبیه‌سازی می‌کند؛ از اینرو تابع دیواره استاندارد با مدل آشفته  $k-\epsilon$  استاندارد نتایج منطبق با نتایج آزمایشگاهی ایجاد می‌کند.

نتایج حاصل از مدل‌سازی در سرریز مدور قائم ساده را می‌توان به صورت زیر تقسیم‌بندی و بررسی کرد.

- (1) بررسی پروفیل رویی و زیرین سرریز مدور قائم ساده
- (2) بررسی رابطه دبی با تراز آب بالادست
- (3) بررسی ضریب دبی جریان در حالت مدل‌سازی و آزمایشگاهی

### 3-2- بررسی پروفیل رویی و زیرین جت جریان سرریز مدور قائم ساده

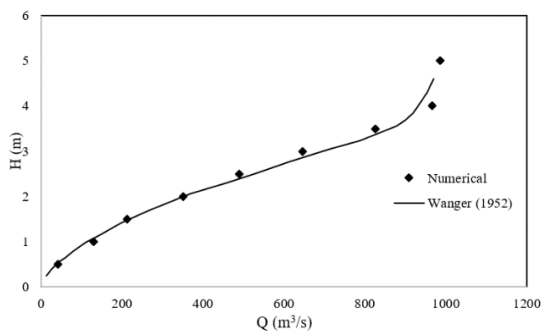
پس از مشخص شدن بهترین شرایط مدل‌سازی به بررسی پروفیل رویی و زیرین جت ریزشی در ترازهای مختلف آب بر روی تاج سرریز پرداخته می‌شود. در این بررسی برای مقادیر  $H_s/R$  0/2، 0/3، 0/4، 0/5، 0/6 و 0/8 شبیه‌سازی



شکل 7 بررسی پروفیل رویی و زیرین جت ریزشی در سرریز مدور قائم ساده

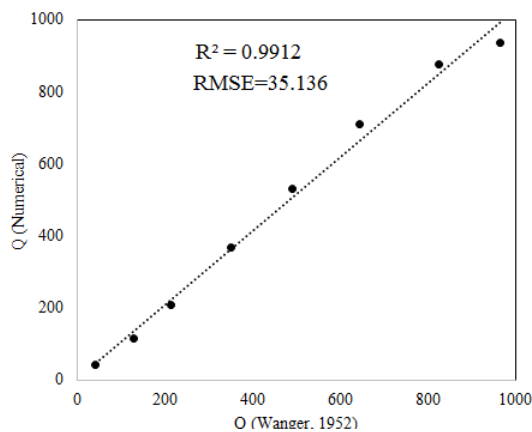
تحت تأثیر قرار می‌دهد. در مجموع بین نتایج عددی و آزمایشگاهی پارامترهای آماری اندازه‌گیری شده مشخص گردید که ضریب  $R^2$  برای داده‌ها برابر 0/991 است، همچنین خطای جذر میانگین مربعات (رابطه 5) برابر 35/136 بدست آمد (شکل 9).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{1,i} - X_{2,i})^2}{n}} \quad (5)$$



H	Q	
	Numerical	Wanger (1952)
0.5	42.3409	43.3164
1	129.436	117.793
1.5	212.637	209.479
2	350.526	368.351
2.5	489.856	530.411
3	645.417	710.286
3.5	826.924	878.003
4	967.065	936.233
5	987.022	-

شکل 8 رابطه بین تراز آب بر روی تاج سرریز و دبی سرریز شده جریان



شکل 9 مقایسه دبی سرریز شده محاسباتی و آزمایشگاهی در ترازهای مختلف آب

همچنین مشخص است با افزایش نسبت  $H_s/R$  پروفیل زیرین جت ریزشی به سمت دیواره‌های سرریز نزدیک شده و آستانه استغراق روزه‌ای به سمت بالاتر می‌رود تا زمانی که هیدرولیک جریان به صورت مستغرق در آید. که در این حالت لوله قائم سرریز به صورت کاملاً پر عمل کرده و دیگر پروفیل زیرین جت ریزشی مشاهده نمی‌شود.

همچنین با افزایش نسبت  $H_s/R$ ، اختلاف پروفیل زیرین جت ریزشی در دو حالت عددی و آزمایشگاهی زیاد می‌گردد. از آنجا که با افزایش نسبت  $H_s/R$ ، در واقع دبی جریان ورودی بیشتر می‌گردد، در محل طلاق اغتشاش زیادی رخ می‌دهد و هرچه دبی جریان زیادتر باشد باعث می‌گردد سرعت جریان زیادتر شود و این افزایش سرعت باعث افزایش عدد فرود جریان می‌شود. همان‌طور که در تحقیقات گذشته نیز بیان شده با افزایش عدد فرود، آشفتنگی جریان افزایش می‌یابد و مدل آشفته  $k-\epsilon$  استاندارد قادر نیست جریان در این حد آشفته را به خوبی شبیه‌سازی کند (Mansouri et al., 2014). در ترازهای بالای آب آشفتنگی ایجاد شده بر روی تاج سرریز ایجاد می‌شود که باعث می‌گردد این آشفتنگی بر روی پروفیل زیرین جت جریان تأثیر گذار باشد.

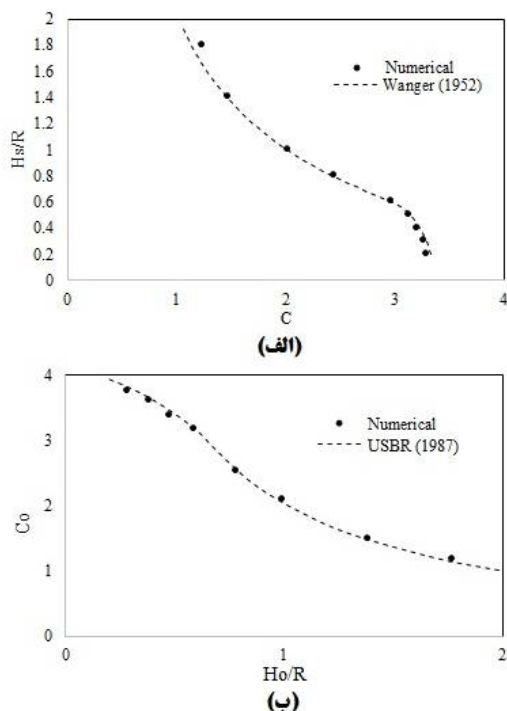
### 3-3- بررسی رابطه دبی با تراز آب بالادست

در سرریز مدور قائم با افزایش تراز آب بر روی تاج سرریز ( $h_s$ ) دبی جریان سرریز شده افزایش می‌یابد اما این افزایش دبی با افزایش تراز آب رابطه خطی ندارد. در این بخش تحقیق به بررسی رابطه تراز آب بر روی تاج سرریز و دبی سرریز شده در مدل عددی پرداخته شده است. بدین منظور در ترازهای 0/5، 1، 1/5، 2، 2/5، 3، 3/5، 4 و 5 مدل‌سازی جریان صورت گرفت و پس از محاسبه دبی سرریز شده، نتایج در شکل 8 ارائه گردید.

همان‌طور از شکل 8 مشخص است در ترازهای آب کم، نتایج در مدل‌سازی عددی تقریباً با نتایج آزمایشگاهی تطابق دارد؛ اما با افزایش تراز آب بر روی تاج سرریز اختلاف بین دبی عددی و آزمایشگاهی زیاد می‌گردد. دلیل این اختلاف همان‌طور که ذکر گردید ایجاد اغتشاش زیاد بر روی تاج سرریز است که دبی جریان سرریز شده را



محل طلاقی جت ریزشی به سمت ورودی سرریز کشیده شود و این عامل باعث آشفته‌گی بیش از اندازه در دهانه ورودی سرریز مدور قائم می‌گردد بنابراین مدل عددی قادر نمی‌باشد این شرایط جریان را به‌خوبی شبیه‌سازی کند. در ادامه برای مقادیر مختلف  $P/R$  (0/15، 0/2 و 0/3) ضریب دبی ( $C_0$ ) نسبت به  $H_0/R$  مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در شکل 11 ارائه شده است.



شکل 10 بررسی ضریب دبی در دو حالت (الف) Wagner و (ب) USBR (1987) و (1952)

### 3-4- بررسی ضریب دبی جریان در حالت مدل-ساز و آزمایشگاهی

در این تحقیق بر اساس تحقیقات Wagner (1952) و USBR (1987) دو نوع ضریب دبی ضریب دبی مورد بررسی قرار گرفت. در ضریب دبی نوع اول ( $C$ )، مقدار این ضریب از انرژی کل آب بر روی تاج سرریز ( $H_s$ ) بدست می‌آید که در رابطه (6) مشاهده می‌گردد.

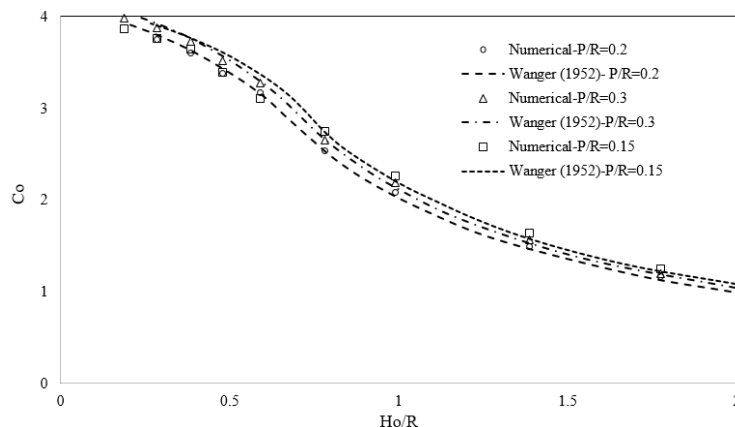
$$C = \frac{Q}{2\pi R H_s^{\frac{3}{2}}} \quad (6)$$

در ضریب دبی نوع دوم که از تحقیقات USBR (1987) استخراج شده است، مقدار ضریب از انرژی کل آب نسبت به بالاترین نقطه پروفیل زیرین جت ریزشی ( $H_0$ ) محاسبه می‌گردد (رابطه 7).

$$C_0 = \frac{Q}{2\pi R H_0^{\frac{3}{2}}} \quad (7)$$

در بررسی ضریب دبی در دو حالت فوق‌الذکر برای نسبت  $P/R=0.2$  در شکل 10- الف نتایج عددی و آزمایشگاهی برای 9 نسبت  $H_s/R$  برابر 0/2، 0/3، 0/4، 0/5، 0/6، 0/8، 1، 1/4 و 1/8 نشان داده شده است. همچنین در شکل 10- ب نسبت  $H_0/R$  برابر 0/188، 0/286، 0/384، 0/48، 0/59، 0/781، 0/991، 1/386 و 1/774 ارائه شده است. قابل ذکر است که نسبت‌های  $H_0/R$  معادل نسبت‌های  $H_s/R$  می‌باشند. همان‌طور که در شکل 10 مشخص است، با افزایش تراز آب بر روی تاج سرریز ( $H_s/R$  و  $H_0/R$ ) اختلاف بین ضریب دبی عددی و آزمایشگاهی افزایش می‌یابد.

از آنجایی که با افزایش تراز سطح آب باعث می‌گردد که



شکل 11 بررسی ضریب دبی ( $C_0$ ) نسبت به  $H_0/R$  برای ارتفاع‌های مختلف سرریز ( $P/R$ )

عددی و آزمایشگاهی زیاد می‌گردد. در مجموع بین نتایج عددی و آزمایشگاهی ضریب  $R^2$  برای داده‌ها برابر  $0/991$  است، همچنین خطای جذر میانگین مربعات برابر  $35/136$  بدست آمد. در بررسی ضریب دبی جریان در حالت مدل‌سازی و آزمایشگاهی مشاهده گردید با کاهش نسبت  $P/R$  اختلاف مقادیر ضریب دبی در دو حالت عددی و آزمایشگاهی افزایش می‌یابد به طوری که در مقدار  $P/R=0.15$  اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و عددی نسبتاً زیاد است.

از اینرو می‌توان بجای ساخت مدل پر هزینه آزمایشگاهی و نیاز به تجهیزات گران قیمت برای بررسی خصوصیات جریان در این سازه، با استفاده از این مدل عددی نتایج قابل قبولی را بدست آورد و فقط برای روشن شدن جزئیات در صورت نیاز تحقیقاتی به مدل‌سازی آزمایشگاهی روی آورد.

#### 5- فهرست علائم

$C$	ضریب دبی (بی بعد)
$E$	بیشترین برآمدگی پروفیل زیرین جت ریزشی
$h_a$	ارتفاع انرژی جنبشی جریان
$h_o$	ارتفاع آب نسبت به بالاترین نقطه پروفیل زیرین جت ریزشی
$H_o = h_o + h_a$	انرژی کل آب نسبت به بالاترین نقطه پروفیل زیرین جت ریزشی
$h_s$	تراز آب بر روی تاج سرریز
$H_s = h_s + h_a$	انرژی کل آب بر روی تاج سرریز
$P$	ارتفاع سرریز
$Q$	دبی جریان
$R$	شعاع دهانه ورودی سرریز
$V_a$	متوسط سرعت جریان در مخزن

#### 6- منابع

جوان، م.، صادق فام، س. و اقبال‌زاده، ا. (1392). "مقایسه روش‌های اختلاطی و حجم سیال برای شبیه‌سازی عددی اختلاط آب و هوا در جریان غیرریزشی روی سرریزهای پلکانی". نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، دوره 20، شماره 4، ص.ص. 75-97.

کبیری سامانی، ع. ر. (1379). طراحی بهینه صفحات ضد گرداب در آبگیرها. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی

همان‌طور که مشاهده می‌گردد با کاهش نسبت  $P/R$  اختلاف مقادیر ضریب دبی در دو حالت عددی و آزمایشگاهی افزایش می‌یابد به طوری که در مقدار  $P/R=0.15$  اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و عددی نسبتاً زیاد است. دلیل این پدیده را می‌توان در ارتفاع کم سرریز نسبت به قطر سرریز دانست که باعث می‌گردد جریان بر روی تاج سرریز نیز دچار آشفتگی باشد و مدل عددی قادر به شبیه‌سازی این حالت نمی‌باشد. در تمامی حالاتی که آشفتگی جریان بسیار زیاد می‌گردد مدل عددی قادر به شبیه‌سازی دقیق جریان نمی‌باشد.

#### 4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به منظور بررسی خصوصیات هیدرولیکی جریان بر روی سرریز مدور قائم از مدل عددی فلوئنت استفاده گردید. برای صحت سنجی نتایج مدل‌سازی از نتایج آزمایشگاهی Wagner (1952) و USBR (1987) استفاده شده است. به منظور شبیه‌سازی جریان در سرریز مدور قائم سه دسته هیدرولیک جریان آزاد، روزه‌ای و تحت فشار مورد بررسی قرار می‌گیرد. بررسی شبکه محاسباتی نشان می‌دهد که بهترین نتایج عددی برای شبکه متوسط با 10602 گره بدست آمده است و مدل آشفته دو معادله‌ای  $k-\epsilon$ (Standard) بهترین نتایج را که تطابق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی برای سرریز مدور ساده داشت، تولید نمود. همچنین پس از بررسی اثر تابع دیواره، تابع دیواره استاندارد به عنوان اثر تابع دیواره انتخاب گردید.

در بررسی پروفیل رویه و زیرین جت ریزشی تطابق بسیار خوبی بین نتایج عددی و نتایج آزمایشگاهی دیده شد. همچنین مشخص است با افزایش نسبت  $H_s/R$  پروفیل زیرین جت ریزشی به سمت دیواره‌های سرریز نزدیک شده و آستانه استغراق روزه‌ای به سمت بالاتر می‌رود تا زمانی که هیدرولیک جریان به صورت مستغرق در آید. در بررسی رابطه بین نتایج تراز آب بر روی تاج سرریز و دبی سرریز شده مشخص شد در ترازهای آب کم، نتایج در مدل‌سازی عددی تقریباً با نتایج آزمایشگاهی تطابق دارد؛ اما با افزایش تراز آب بر روی تاج سرریز اختلاف بین دبی

- Khatsuria, R.M. (2005). "Hydraulics of spillways and energy dissipators", *Civil and Environmental Engineering*, 132(2), pp. 649-651.
- Laugier, F. (2007). "Design and construction of the first Piano Key weir spillway at Goulours dam", *International Journal of Hydropower and Dams*, 14(5), pp. 94-100.
- Lauder, B.E. and Spalding D.B. (1974). "The numerical computation of turbulent flows". *Comp. Methods Appl. Mech. Eng.*, 3, pp. 269-289.
- Lempérière, F. and Ouamane, A. (2003). "The piano keys weir: a new cost-effective solution for spillways", *International Journal of Hydropower and Dams*, 10(5), pp. 144-149.
- Lewellen, W.S. (1962). "A solution for three dimensional vortex flow with strong circulation", *Aerospace Corporation Rep. TD R-930*, (2210-14) TN-1.
- Mahtabi, G. and Arvanaghi, H. (2018). Experimental and numerical analysis of flow over a rectangular full-width sharp-crested weir, *Water Science and Engineering*, 11(1), pp. 75-80.
- Mansouri, R. Ziaei, A.N. and Hinkelmann, R. (2014). "Comparison of numerical, experimental and empirical results for flows over vertical drops", *Progress in Computational Fluid Dynamics*, 14(2), pp. 118-129.
- Novak, P. and Cabelka, J. (1981). "Models in hydraulic engineering". Pitman, London, UK.
- Peterka, A.J. (1956). *Morning-glory shaft spillways: performance tests on prototype and model*, Trans. A.S.C.E. 121.
- Rahimzadeh, H. Maghsoodi, R. Sarkardeh, H. and Tavakkol, S. (2012). "Simulating Flow Over Circular Spillways by Using Different Turbulence Models", *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 6:1, pp. 100-109.
- Schleiss A. J. (2011). *From labyrinth to piano key weirs*. Ecolepoly technique Federal de Lausanne, Switzerland.
- Shamsi, R. and Kabiri-Samani, A.R. (2016). "Swirling flow at vertical shaft spillways with circular piano-key inlets", *Journal of Hydraulic Research*, 55(2), pp. 248-258.
- Trivellato, F. (2010). "Anti-vortex devices: Laser measurements of the flow and functioning". *Optics and Lasers in Engineering*, 48, 589-599.
- USBR. (1987). *Design of Small Dams*, U. S. Bureau of Reclamation, Denver, CO.
- عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران ایران.
- شمشی، ر. (1391). بررسی تأثیر ورودی کلید پیانویی بر هیدرولیک جریان در سرریزهای مدور قائم، پایان نامه کارشناسی ارشد، گرایش آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.
- موسوی جهرمی، ح؛ و الستی، ک. (1385). "تأثیر تیغه‌های گردابشکن بر جریان سرریزهای نیلوفری"، همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، 12 تا 14 اردیبهشت ماه.
- نصیری، س؛؛ کبیری سامانی، ع.ر. و اصغری، ک. (1395). "مدلسازی عددی میدان جریان در اطراف سرریزهای مدور قائم با ورودی کلید پیانویی". هیدرولیک، دوره 11، شماره 1، ص.ص. 53-66.
- Aghamajidi, R. (2013). "Computerized simulation of hydraulic behavior of shaft spillway vortex breaker on crest and semi long stepped chamber throat". *Technical Journal of Engineering and Applied Sciences*, 23(3), pp. 3325-3332.
- Bieri, M. Ribeiro, M.L. Boillat, J.L. Schleiss, A. Lauger, F. Delorme, F. and villard, J.F. (2009). *Rehabilitation de la capacite d'evacuation des crues Integration de PK-Weirs sur des barrages existants*, Colloque CFBR-SHF, Paris, [In French].
- Borghiei, S.M. and Kabiri-Samani, A.R. (2010). "Effect of anti-vortex plates on critical submergence at a vertical intake, Sientia Iranica", *Transaction A: Civil Engineering*, 17(2), pp. 89-95.
- Borghiei, S.M. and Kabiri-Samani, A.R. (2013). "Effects of anti-vortex plates on air entrainment by free vortex", *Sientia Iranica*, 20(2), pp. 251-258.
- Dargahi, B. (2006). "Experimental study and 3D numerical simulations for a free-overflow spillway". *ASCE J. Hydraulic Engineering*, 132(9), pp. 899-912, (10):1061/0733-9429.
- FLUENT User's Guide* (2003). Fluent Inc., Centerra Resource Park, 10 Cavendish Court Lebanon, NH 03766
- Gulliver, J. Rindels, A.J. and Lindblom, K.C. (1986). "Design intakes to avoid free surface", *Water Power and Dam Construction*, 38(9), pp. 224-232.
- Kabiri-samani, A.K. and Javaheri, A. (2011). "Discharge coefficient for free submerged flow over piano key", *Journal of Hydraulic Research*. 50(1), pp.114-120.

Wayne Coleman, H. Wei, C. Y. and Lindell, J. E. (2004). *Hydraulic design of spillway*. McGraw-Hill, New York.

Zachoval, Z. and Roušar, L. (2015). "Flow structure in front of the broad-crested weir", EPJ Web Conf., 92, pp. 1-4, doi:10.1051/epjconf/20159202117

Wagner, W.E. (1954). *Morning-glory shaft spillways determination of pressure-controlled profiles*, A.S.C.E. Proceedings. 80.

Wang, Y. K. Jiang, C. B. and Liang, D. F. (2010). "Investigation of air-core vortex at hydraulic intakes", Journal of Hydrodynamics, 22(5), pp. 696-701.