

## شبیه سازی جریان در سرریزهای استوانه‌ای با استفاده از مدل Fluent و

### مقایسه نتایج با مدل فیزیکی

پیمان ورجاوند<sup>1</sup>، داود فرسادی زاده<sup>2\*</sup>، پیام خسروی نیا<sup>1</sup>، زهرا رفیعی<sup>3</sup>

تاریخ دریافت: 87/11/19 تاریخ پذیرش: 88/3/17

1- دانشجویان سابق کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز

2- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز

3- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشگاه مازندران

\*مسئول مکاتبه  
E-mail: [Farsadi\\_d@yahoo.com](mailto:Farsadi_d@yahoo.com)

#### چکیده

سرریز استوانه‌ای یکی از انواع سرریزهای لبه پهن بوده، که بدلیل الگوی جریان پایدار و سهولت عبور اجسام معلق دارای کاربرد گسترده‌ای می‌باشد. در تحقیق حاضر وضعیت جریان بر روی پنج مدل فیزیکی سرریز استوانه‌ای مورد آزمون قرار گرفت و تاثیر پارامترهای قطر سرریز، بار هیدرولیکی در بالادست و فشار منفی روی سطح سرریز بر روی مشخصه‌های جریان بررسی شد. همچنین جریان بر روی سرریز استوانه‌ای با استفاده از مدل Fluent و کاربرد مدل آشفتگی  $k-e$  شبیه سازی و نتایج آن با مدل فیزیکی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که ضریب دبی با افزایش بار کل آب در بالادست و افزایش فشار منفی بر روی سطح سرریز، افزایش می‌یابد. همچنین میانگین خطای نسبی مدل Fluent در شبیه سازی عمق آب بالادست سرریز ۰/۹۱۴ درصد، عمق آب بر روی سرریز ۱/۳۹ درصد و ضریب دبی جریان ۴/۱۷۲ درصد بدست آمد. تطابق خوبی بین مدل Fluent و مدل فیزیکی در بررسی مشخصه های هیدرولیکی جریان در سرریزهای استوانه‌ای حاصل شد.

واژه‌های کلیدی: سرریز استوانه‌ای، ضریب دبی، فلوئنت، مدل آشفتگی  $k-e$ ، مدل حجم سیال

## Simulation of Flow Over Cylindrical Weirs Using Fluent Model and Comparison with Experimental Data

P Varjavand<sup>1</sup>, D Farsadizadeh<sup>2\*</sup>, P Khosravinia<sup>1</sup>, Z Rafieey<sup>3</sup>

Received: 7 February 2009 Accepted: 7 June 2009

<sup>1</sup>Former MSc Students, Dept. of Water Engine. Univ. of Tabriz, Iran

<sup>2</sup>Assist. Prof., Dept. of Water Engin. Univ. of Tabriz, Iran

<sup>3</sup>MSc Student, Dept. of Water Engine. Univ. of Mazandaran, Iran

\*Corresponding author: [E-mail:Farsadi\\_d@yahoo.com](mailto:E-mail:Farsadi_d@yahoo.com)

### Abstract

Cylindrical weir is one of the broad-crested weirs used extensively due to steady state flow pattern and free passing of suspended materials over it. In this study, flow conditions over five physical models of cylindrical weir were tested and the effects of parameters such as weir diameter, hydraulic head at the upstream side and negative pressure on the weir were investigated. The flow was also simulated using  $k - e$  turbulence model by Fluent software and the results were compared with those from the physical model. There was a rise in coefficient of discharge when the total head of flow and negative pressure over the weir were increased. The average relative errors of Fluent software in simulation of upstream flow depth, depth of flow over the weir and coefficient of discharge were 0.914%, 1.39% and 4.172%, respectively. By considering the hydraulic properties of flow over the cylindrical weir, a good agreement between the results of Fluent software and physical model was confirmed.

**Keywords:** Coefficient of discharge, Cylindrical weir, Fluent,  $k - e$  Turbulence model, VOF.

### مقدمه

به دلیل سادگی و هزینه ساخت در سیستم‌های توزیع و انتقال آب کاربرد زیادی در اندازه‌گیری جریان و تنظیم سطح آب دارند. بررسی تغییرات ضریب دبی و عوامل موثر بر آن در سرریزهای استوانه‌ای، به دلیل انحنای زیاد خطوط جریان بر روی این سرریزها، در طراحی و کاربرد این سازه‌ها اهمیت زیادی دارد.

بر اساس مطالعات بازین طی قرن ۱۹ پیشرفتهایی برای بهبود ظرفیت دبی این سرریزها صورت گرفت که در نهایت منجر به طراحی سرریزهای تاج دایره‌ای شد. کریگر (۱۹۱۷) مطالعات بازین را برای شناسایی پروفیل سرریز اوجی توسعه داد. او همچنین آزمایشاتی در مورد پروفیل سرریزهای تاج دایره‌ای انجام داد که بعداً

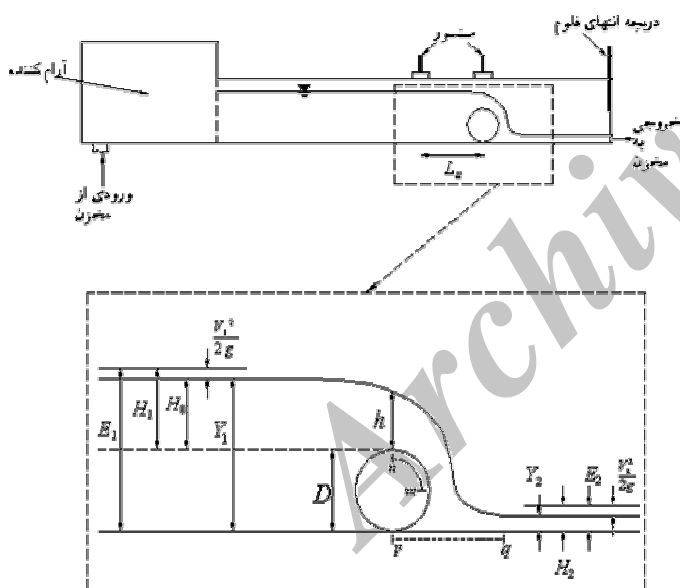
سرریزها یکی از سازه‌های هیدرولیکی با اهمیت هستند که امکان خروج سیلاب‌های اضافه بر ظرفیت در سدها و همچنین اندازه‌گیری و کنترل جریان در کانال‌ها را میسر می‌سازند. سرریزهای استوانه‌ای<sup>۱</sup> یکی از انواع سرریزها است که کاربرد وسیعی در مهندسی هیدرولیک به عنوان سازه تخلیه آب داشته و برای کنترل سطح آب در کانال‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. سرریزهای استوانه‌ای به طور گسترده در قرن نوزدهم و اوایل قرن بیستم قبل از ساخته شدن سرریزهای اوجی به کار می‌رفتند (رامامورتی ۱۹۹۳). امروزه سرریزهای استوانه‌ای

<sup>1</sup> Cylindrical weir

با مدل فیزیکی مقایسه کرد. وی مدل فیزیکی خود را در فلومی با طول ۴ متر، عرض ۰/۴۰۳ و عمق ۰/۶ متر ساخت و پروفیل سطح آب و پروفیل سرعت را در نقاط مختلف مدل بررسی نمود. وی برای شبیه سازی عددی آشفتگی جریان از مدل  $k-e$  استاندارد و RNG<sup>۵</sup> استفاده نمود.

هدف از این تحقیق، بررسی تغییرات ضریب دبی و پارامترهای هیدرولیکی جریان در سرریزهای استوانه‌ای با استفاده از مدل آشفتگی  $k-e$  و مقایسه آن با نتایج مدل فیزیکی برای تعیین قابلیت این مدل‌ها در شبیه سازی وضعیت جریان در سرریزها می‌باشد.

شکل ۱- طرح شماتیک سرریز استوانه ای در فلوم آزمایشگاهی



#### مواد و روش‌ها

##### مدل فیزیکی

تحقیق حاضر در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز در فلومی به طول ۱۰ متر،

در طراحی سد پانت<sup>۱</sup> دربورگوندی<sup>۲</sup> فرانسه به کار برده شد (سویج و جانسون ۲۰۰۱).

مطالعات انجام یافته بر روی تاثیر مکش و هوادهی تیغه ریزش آب در این نوع سرریز انجام دادند. نتایج نشان داد که مکش تیغه ریزشی آب مانع جدایی جریان شده و ضریب دبی را ۱۵ تا ۲۰ درصد افزایش می‌دهد (رامامورتی و وو ۱۹۹۳).

چانسون و مونتس (۱۹۹۸) آزمایشاتی در سرریزهای استوانه‌ای با ۸ قطر مختلف و ۵ شرایط متفاوت در بالادست به منظور بررسی ضریب دبی انجام دادند. نتایج نشان داد که تغییر شیب بالادست تاثیری در ضریب دبی ندارد ولی سایر شرایط بررسی شده ضریب دبی را به شدت تحت تاثیر می‌دهد.

حیدرپور و همکاران (۱۳۸۱) با به کارگیری تابع جریان در اطراف یک استوانه، توزیع سرعت روی تاج را تعیین و یک مدل ریاضی برای تعیین ضریب جریان در سرریزهای تاج دایره‌ای ارائه دادند. آنها نیم‌رخ توزیع سرعت و مدل ریاضی ضریب جریان را با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده از مدل فیزیکی سرریزهای استوانه‌ای، نیم‌استوانه‌ای و نیم‌استوانه‌ای با ارتفاعات مختلف ارزیابی نمودند.

لی‌وو و هوئی (۲۰۰۲) سرریز تاج دایره ای را بصورت دو بعدی مدل کردند. آنها بازه انجام محاسبات را ۵۰D و ۲.۲D در نظر گرفتند که D قطر سرریز است. روش حل عددی معادلات، روش حجم کنترل بوده و برای شبیه سازی جریان چند فاز از روش حجم سیال<sup>۳</sup> و مدل بازسازی هندسی<sup>۴</sup> استفاده کردند. برای تحلیل جریان آشفتگی از مدل  $k-e$  استاندارد استفاده شد و نتایج عددی با مدل فیزیکی تطابق خوبی نشان داد.

درگاهی (۲۰۰۴) سرریز اوجی را بصورت سه‌بعدی و با استفاده از مدل CFD شبیه سازی نمود و نتایج را

<sup>۱</sup> Pont

<sup>۲</sup> Burgundy

<sup>۳</sup> Volume of fluid (VOF)

<sup>۴</sup> Geo-reconstruct model

<sup>۵</sup> Re-normalization group model

$$f_1\left(\frac{Y_1}{D}, \frac{B}{Y_1}, \frac{L_u}{Y_1}, \frac{P}{D}, \frac{H_1}{D}, \frac{t}{D}, S, \frac{Q}{g^{0.5} Y_1^{2.5}}, \frac{rg^{0.5}}{Y_1^{4.5} m}, \frac{s}{m(Y_1^{0.5} g)}\right) = 0 \quad [2]$$

عدد رینولدز در محدوده ۲۵۴۰ تا ۱۰۴۰۴ است، بنابراین اثر لزجت  $m$  ناچیز می باشد. با توجه به اینکه عمق آب روی سرریز در محدوده ۴/۷۲ تا ۱۱/۱۴ می باشد، می توان از اثر نیروی کشش سطحی  $S$  صرفنظر کرد. همچنین به دلیل ثابت بودن شیب کانال  $S$ ، فاصله ایستگاه اندازه گیری در بالادست  $L_u$  و عرض فلوم  $B$ ، از پارامتر بی بعد مربوط به آنها در معادله ۲ چشم پوشی گردید و نتیجه به صورت رابطه ۳ خلاصه شد. در آن رابطه که در آن تاثیر عمق آب در بالادست  $Y_1$ ، دبی جریان  $Q$ ، فشار بر روی سطح سرریز برحسب متر آب  $P$ ، تنش برشی وارد بر کف برحسب متر آب  $t$ ، بار کل آب بر روی سرریز در بالادست  $H_1$  و قطر سرریز  $D$  در نحوه جریان، با پارامترهای بی بعد زیر بیان می گردد.

$$f_1\left(\frac{Y_1}{D}, \frac{Q}{g^{0.5} Y_1^{2.5}}, \frac{P}{D}, \frac{t}{D}, \frac{H_1}{D}\right) = 0 \quad [3]$$

از آنجائی که سرریز استوانه ای در حقیقت سرریز لوله ای با ارتفاع و شیب بدنه صفر می باشد، این سرریزها همانند سرریزهای لبه پهن عمل می کنند. بنابراین تحلیل جریان در سرریزهای استوانه ای بر اساس رابطه سرریزهای لبه پهن نشان می دهد که ضریب دبی در این سرریزها به صورت معادله ۴ می باشد (باس ۱۹۷۸):

$$cd = \frac{q}{g^{0.5} \left(\frac{2}{3} H_1\right)^{1.5}} \quad [4]$$

که در این رابطه:  $C_d$  ضریب دبی جریان و  $q$  دبی عبوری از روی سرریز در واحد عرض آن  $(m^3/s/m)$ ،  $g$  شتاب ثقل  $(m/s^2)$  و  $H_1$  ارتفاع تراز آب در بالادست  $(m)$  می باشد.

ارتفاع ۴۰ سانتی متر و عرض ۲۵ سانتی متر انجام گرفت. یک سیستم آرام کننده در ابتدای فلوم نصب شده و جریان آب در انتهای فلوم با سرریز مثلثی اندازه گیری می شود. به منظور اندازه گیری سطح آب در دو نقطه از سنسورهای اولتراسونیک با دقت ۰/۱ میلی متر که خروجی آنها به کامپیوتر منتقل و با نرم افزار مربوطه پردازش می گردد، استفاده شد. برای اندازه گیری پروفیل سطح آب در فواصل کوتاه که با سنسورها امکان پذیر نبود، از سطح سنج مکانیکی با دقت ۰/۱ میلی متر استفاده شد. مدل های سرریز در این تحقیق، لوله هایی از جنس P.V.C با قطرهای ۹۱، ۱۱۱، ۱۲۵، ۱۶۰ و ۲۰۰ و به طول ۲۵۰ میلی متر برابر عرض فلوم بود. سرریزها پس از آب بندی به وسیله نوار لاستیکی در فلوم نصب می شدند. جریان آب با دبی ثابت در کانال برقرار شده و ارتفاع سطح آب بر روی سرریز و در بالادست آن در فاصله  $L_u$  با سنسور اندازه گیری می شد. این مراحل برای کلیه سرریزها در محدوده دبی های بین ۵/۲۲ تا ۱۷/۷۵ لیتر در ثانیه با جریان آزاد انجام شد. شکل ۱ طرح شماتیک مدل سرریز استوانه ای در فلوم آزمایشگاهی را نشان می دهد.

#### تحلیل ابعادی

تابع جریان در سرریز استوانه ای بر اساس خصوصیات هندسی، سینماتیکی و دینامیکی جریان به صورت معادله ۱ به دست آمد:

$$f(Y_1, D, B, L_u, P, H_1, t, S, Q, S, m, r, g) = 0 \quad [1]$$

که در آن  $B$  عرض کانال،  $P$  فشار بر روی سطح سرریز،  $t$  تنش برشی وارد بر کف،  $S$  شیب طولی کانال،  $Q$  دبی جریان،  $S$  کشش سطحی،  $m$  لزجت دینامیکی و  $r$  چگالی مخصوص سیال می باشند. پارامترهای دیگر بر روی شکل ۱ مشخص شده اند. تحلیل ابعادی با استفاده از تئوری  $p$  باکینگهام صورت گرفت و پارامترهای بی بعد موثر در جریان به صورت معادل ۲ به دست آمد:

## مدل Fluent

در تحقیق حاضر جریان بر روی سرریز استوانه ای با استفاده از مدل Fluent به روش حجم محدود شبیه سازی شد و نتایج آن با نتایج مدل فیزیکی مقایسه گردید. شبیه سازی جریان در سرریزهای استوانه ای با حل معادلات پیوستگی و مومنتوم با استفاده از مدل های آشفتگی، روش های بررسی جریان چندفازی<sup>۱</sup>، روش حل عددی حجم محدود<sup>۲</sup> و الگوریتم های حل همزمان سرعت فشار (الگوریتم SIMPLEC<sup>۳</sup> و PISO<sup>۴</sup>) انجام شد. برای شبیه سازی جریان چند فازی از مدل حجم سیال و برای شبیه سازی جریان آشفته از روش آشفتگی  $k-e$  و مدل های Standard، RNG و Realizable استفاده شد و روش حل معادلات مربوطه، روش حجم محدود می باشد. برای تحلیل جریان در کنار دیواره از مدل تابع دیواره نامتقارن<sup>۵</sup> و تابع دیواره استاندارد<sup>۶</sup> استفاده شد.

روش بررسی حجم که غالباً به عنوان روش حجم سیال نامیده می شود بوسیله نیکولس و هیرت (۱۹۷۵) بوجود آمد. این مدل بر این اساس استوار است که دو یا چند سیال با هم ترکیب نمی شوند. برای هر فاز یک متغیر در مدل در نظر گرفته می شود که همان نسبت حجمی آن فاز در سلول محاسباتی است. در هر حجم کنترل مجموع نسبت های حجمی تمامی فازها یک می باشد (چن و همکاران ۲۰۰۲). مرز بین دو فاز در روش حجم سیال نقطه ای در نظر گرفته می شود که مقدار عددی پارامتر کسر حجمی<sup>۷</sup> در آن ۰/۵ باشد (درگاهی ۲۰۰۴).

اگر نسبت حجمی سیال  $q$  در سلول بصورت  $a_q$  نشان داده شود یکی از سه شرایط زیر وجود دارد:

الف)  $a_q = 0$ ، سلول از سیال  $q$  خالی می باشد.

ب)  $a_q = 1$  سلول پر از سیال  $q$  می باشد.

پ)  $0 < a_q < 1$ ، سلول حاوی سطح مشترک بین سیال  $q$  و یک یا چند سیال دیگر می باشد.

معادله حاکم بر جریان در سرریز استوانه ای، معادلات پیوستگی و مومنتوم ناویر- استوکس می باشد. در این تحقیق از روش متوسط رینولدزی برای حل معادلات در جریان آشفته استفاده شده است. معادله پیوستگی رینولدز بصورت زیر می باشد (اندرسون و همکاران ۱۹۸۴).

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{r} u_j + \bar{r}' u_j') = 0 \quad [5]$$

فرم کلی معادله مومنتوم ناویر- استوکس متوسط رینولدزی بصورت زیر است (اندرسون و همکاران ۱۹۸۴).

[۶]

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} [(\bar{r} + \bar{r}')(\bar{u} + \bar{u}')] + \\ & \frac{\partial}{\partial x} [(\bar{r} + \bar{r}')(\bar{u} + \bar{u}')(\bar{u} + \bar{u}') + (\bar{p} + \bar{p}') - t_{xx}] + \\ & \frac{\partial}{\partial y} [(\bar{r} + \bar{r}')(\bar{u} + \bar{u}')(\bar{v} + \bar{v}')] + \\ & \frac{\partial}{\partial z} [(\bar{r} + \bar{r}')(\bar{u} + \bar{u}')(\bar{w} + \bar{w}') - t_{zx}] = 0 \end{aligned}$$

مدل  $k-e$  در واقع یکی از مدل های آشفتگی در حل معادلات پیوستگی و مومنتوم ناویر- استوکس متوسط رینولدزی بشمار می رود، که بر سه نوع استاندارد، RNG و Realizable می باشد. این مدل دارای دو معادله براساس  $k, e$  است. در این مدل  $k$  معرف انرژی جنبشی اغتشاش<sup>۸</sup> و  $e$  معرف نرخ تلفات انرژی جنبشی اغتشاش<sup>۹</sup> می باشد.

معادلات انتقال در مدل RNG بصورت زیر هستند (چادری ۱۹۹۳).

<sup>۱</sup>Multi phase flow

<sup>۲</sup>Finite volume method

<sup>۳</sup>Semi-implicit method for pressure-linked equations consistent

<sup>۴</sup>Pressure-implicit with splitting of operators

<sup>۵</sup>Non-equilibrium wall function

<sup>۶</sup>Standard wall function

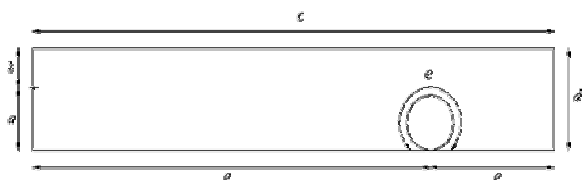
<sup>۷</sup>Volume fraction

<sup>۸</sup>Turbulent kinetic energy

<sup>۹</sup>Dissipation rate of turbulent kinetic energy

حدود ۰/۱ تا ۰/۱۵ استفاده شد و پس از پیشروی زمان جریان، ضرایب همگرایی به مرور زیاد شد تا در نهایت با حداکثر گام زمانی ۰/۰۰۵ ثانیه به مقدار ۰/۸ تا ۱ افزایش یافتند.

در ورودی مدل عددی سرریز از دو نوع شرط مرزی سرعت ورودی و فشار ورودی استفاده شد. شیب فلوم که مقدار آن ۰/۰۰۲۲ می‌باشد، با تفکیک کردن شتاب ثقل در دو امتداد جهت جریان و عمود بر جهت جریان در مدل تاثیر داده شد. برای قطر ۲۰۰ میلیمتر با دبی ۱۷/۰۵ لیتربرثانیه و قطر ۹۱ میلیمتر با دبی ۵/۸۴ لیتر بر ثانیه بوسیله کد نویسی به زبان C++ شرط مرزی فشار ورودی با مشخص بودن عمق ورودی جریان بصورت هیدرواستاتیک تعریف شد. بدلیل اینکه بر روی تشکیل پروفیل سرعت و مقدار سرعت متوسط در مدل کنترل وجود نداشت، مقدار دبی بین ۳۰ تا ۴۰ درصد بیشتر از دبی موجود در مدل فیزیکی بدست آمد. با این وجود بدلیل تشکیل سریعتر پروفیل سرعت، زمان ماندگار شدن جریان نسبت به شرط مرزی سرعت ورودی کمتر بدست آمد. در نهایت همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، برای شبیه‌سازی جریان در مدل سرریز از شرط مرزی سرعت ورودی برای سطح a و فشار ورودی هوا برای سطح b که مقدار نسبی صفر به آن اختصاص داده شد، فشار خروجی هوا برای سطح c که مقدار آن نیز صفر می‌باشد، فشار خروجی صفر برای سطح d و شرط مرزی دیواره برای سطح e استفاده شد.



شکل ۲- تصویر شماتیک از شرایط مرزی تعریف شده برای مدل

$$\frac{\partial}{\partial t}(rk) + \frac{\partial}{\partial x_i}(rku_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( a_k m_{eff} \frac{\partial}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b + re - Y_M \quad [V]$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(re) + \frac{\partial}{\partial x_i}(reu_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( a_k m_{eff} \frac{\partial}{\partial x_j} \right) + C_{1z} \frac{e}{k} (G_k + C_{3z} G_b) - C_{2z} r \frac{e^2}{k} - R_z \quad [A]$$

در معادلات مذکور  $a_k, a_e$  بترتیب عکس اعداد اغتشاش پراتنل برای  $k, e$  و  $m_{eff}$  ویسکوزیته موثر می‌باشند.

از آنجایی که در جریان‌های آشفته، جریان بشدت تحت تاثیر بستر قرار دارد، تحلیل مناسب جریان در نزدیکی دیواره بمنظور تشکیل پروفیل سرعت مناسب دارای اهمیت است. روش‌های شبیه سازی جریان در نزدیکی دیواره بر دو نوع هستند. در روش اول لایه درونی تحلیل نمی‌شود بلکه بوسیله روابط نیمه تجربی از نزدیک دیواره به لایه بیرونی تعمیم داده شده که این روش تابع دیواره<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. در روش دوم لایه درونی تحلیل شده و پس از آن به تحلیل لایه بیرونی پرداخته می‌شود، که این روش مدل نزدیک دیواره<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. در روش دوم چون نیاز به تعدادی المان در زیر لایه لزج می‌باشد، زمان و هزینه محاسبات را به شدت زیاد می‌کند. به همین دلیل برای تحلیل جریان کنار دیواره از مدل تابع دیواره نامتقارن که زیر مجموعه روش اول می‌باشد، استفاده شد (کیم و چادری ۱۹۹۵، چن و پتل ۱۹۸۸).

برای معادلات مومنتوم، انرژی جنبشی اغتشاش و نرخ استهلاك انرژی اغتشاش، از روش گسسته سازی مرتبه دوم بالادست<sup>۳</sup> و برای معادله کسر جمعی از روش بازسازی هندسی و برای معادله فشار از روش PRESTO<sup>۴</sup> استفاده شده است. در ابتدای جریان بدلیل همگرایی نسبتا دشوار از ضرایب همگرایی<sup>۵</sup> کوچک در

<sup>1</sup>Wall function method

<sup>2</sup>Near wall treatment model

<sup>3</sup>Second order upwind

<sup>4</sup>Pressure staggering option

<sup>5</sup> Under relaxation

جدول 1- خطای نسبی (درصد) مدل Fluent در حالت‌های مختلف

D= 91mm Q= 5/84 l/s		D= 200mm Q= 17 l/s		جزئیات مدل بکاررفته
Y <sub>1</sub>	h	Y <sub>1</sub>	h	
0/39	1/5	0/79	0/91	3D,k-e,standard, VOF, Simplec
0/40	1/54	0/82	0/98	2D,k-e,standard, VOF, Simplec
0/15	1/08	0/37	0/67	2D,k-e,RNG, VOF, Simplec
0/12	0/99	0/35	0/64	3D,k-e,Realizable, VOF,Simplec
0/14	1/06	0/37	0/65	3D,k-e,RNG, VOF, PISO

مدل دو بعدی استفاده شد. در مدل‌های دو بعدی اجرا شده خطای نسبی روش Standard نسبت به روش RNG بیشتر بوده و در روش Realizable تقریباً مشابه با خطای روش RNG می‌باشد. لذا بدلیل ناپایداری بیشتر حل در روش Realizable نسبت به روش RNG، در نهایت از روش RNG برای شبیه‌سازی استفاده شد. بدلیل کم بودن ضریب چولگی شبکه‌بندی مدل، اختلاف محسوسی بین دو روش SIMPLEC و PISO مشاهده نشد و بدلیل زمان محاسبات بیشتر در روش PISO، در نهایت از روش SIMPLEC برای شبیه‌سازی همه سرریزها با مدل دوبعدی VOF به روش  $k-e$  با الگوریتم فشار-سرعت SIMPLEC استفاده شد. نتایج به دست آمده از مدل فیزیکی سرریزهای استوانه‌ای و شبیه‌سازی جریان با مدل Fluent به صورت پارامترهای بی بعد مورد مقایسه قرار گرفت.

شکل ۳ تغییرات  $h/D$  در مقابل  $H1/D$  را در مدل Fluent و مدل فیزیکی نشان می‌دهد. در این نمودار با افزایش عمق آب در بالادست عمق آب روی سرریز افزایش می‌یابد. این نمودار بیانگر تطابق خوبی بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با مدل Fluent و آزمایشات فیزیکی می‌باشد. خطای نسبی مدل Fluent در شبیه‌سازی عمق آب بالادست  $Y1$  بین ۰/۰۳۵ تا

برای شبکه‌بندی بازه محاسبات از المان‌های مربعی از نوع sub map و مثلثی از نوع pave استفاده گردید. برای مستقل از شبکه کردن مدل، برای قطر ۲۰۰ میلیمتر دبی ۱۷/۰۵ لیتربرثانیه و قطر ۹۱ میلیمتر دبی ۵/۸۴ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شد و چهار مدل با تعداد المان ۲۵۲۶۸، ۱۶۵۸۴، ۱۱۵۶۸ و ۸۶۲۴ اجرا شد. طبق نتایج بدست آمده بین نتایج مدل‌های ۲۵۲۶۸، ۱۶۵۸۴ و ۱۱۵۶۸ اختلاف محسوسی وجود نداشت ولی با کاهش تعداد المان به ۸۶۲۴ مشاهده شد که خطا نسبت به مدل فیزیکی افزایش چشمگیری پیدا کرد. به همین دلیل برای همه مدل‌ها از شبکه‌های یکسان با تعداد تقریبی ۱۱۵۰۰ المان محاسباتی استفاده شد. از المان لایه مرزی نیز برای کنترل معیار  $y^+$  در حدود ۲۸۰، با الگوی تبدیل ۴:۲ برای کاهش تعداد المان استفاده شد. مدل تابع دیواره نامتقارن، برای پذیرفتن توزیع لگاریتمی پروفیل سرعت، مقدار معیار  $y^+$  باید بین ۳۰ تا ۳۰۰ باشد.

## نتایج و بحث

در این تحقیق برای یافتن مدل بهینه جهت شبیه‌سازی جریان بر روی سرریز ابتدا حالت‌های دوبعدی و سه‌بعدی برای حل عددی معادلات جریان در سرریز استوانه‌ای استفاده شد. برای شبیه‌سازی جریان از مدل‌های آشفتگی  $k-e$  شامل Standard، RNG و Realizable، همچنین از الگوریتم‌های SIMPLEC و PISO استفاده شد (جدول ۱).

خطای نسبی مدل Fluent در حالت‌های مختلف بر حسب درصد جدول ۱ آورده شده است. نتایج به دست آمده از مدل سه‌بعدی به دلیل تقارن جریان نسبت به خط مرکزی فلوام اختلاف محسوسی با حالت دو بعدی در شرایط مشابه نشان نداد. با توجه به اینکه برای اجرای مدل‌های سه‌بعدی نیاز به محاسبات و زمان بیشتری می‌باشد، لذا برای حل عددی کلیه حالت‌های سرریز از

<sup>1</sup>Transition pattern

بدلیل کمتر محاسبه شدن عمق جریان به ازای یک دبی ثابت در مدل Fluent نسبت به مدل فیزیکی در روش حجم سیال می‌باشد. از آنجایی که اختلاف عمق جریان در روش حجم سیال در جریان‌های زیر بحرانی نسبت به مدل فیزیکی ثابت می‌باشد و مبنای مقایسه و ارزیابی مدل Fluent، مدل آزمایشگاهی است، لذا با کاهش مقدار عمق در مدل آزمایشگاهی خطای برآورد عمق جریان در مدل Fluent بیشتر می‌شود، از آنجاییکه بازه تغییرات  $H_1$  نسبت به  $D$  کمتر است، در یک دبی ثابت با کاهش قطر سرریز مقدار  $H_1/D$  افزایش می‌یابد و با کاهش قطر سرریز عمق جریان بالادست کاهش می‌یابد، لذا با افزایش  $H_1/D$  در واقع مقدار خطا در برآورد عمق جریان و در نتیجه آن  $C_d$  افزایش می‌یابد. به همین دلیل است که در شکل ۴ در  $H_1/D$  های کوچکتر تطابق نمودارهای مربوط به مدل Fluent و مدل فیزیکی بهتر می‌باشد. در حالت کلی مشاهده می‌شود که خطا در برآورد ضریب دبی بیشتر از خطای برآورد عمق جریان است که این اختلاف در اثر آن توان  $1/5$  بار کل آب در بالای سرریز طبق معادله ۴ می‌باشد.

همانطور که در شکل ۴ مشخص است روند تغییرات ضریب دبی نسبت به  $H_1/D$  را می‌توان به سه بخش تقسیم کرد.

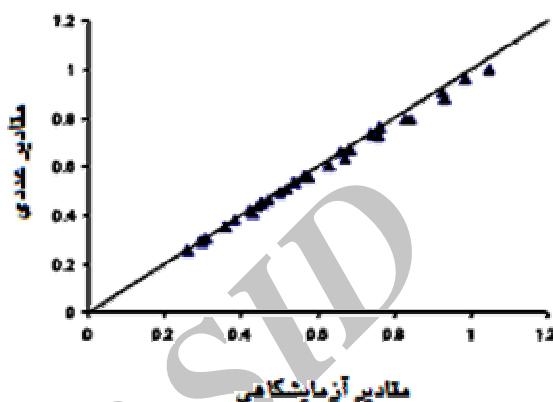
۱) افزایش  $H_1/D$  تا حدود  $0.7$  روند تغییرات ضریب دبی را تحت تاثیر قرار می‌دهد و ضریب دبی در سرریز را به مقدار زیادی افزایش می‌دهد.

۲) روند افزایش مقدار  $C_d$  با افزایش  $H_1/D$  در بازه  $0.7$  تا  $0.95$ ، با آهنگ کمتری انجام می‌یابد.

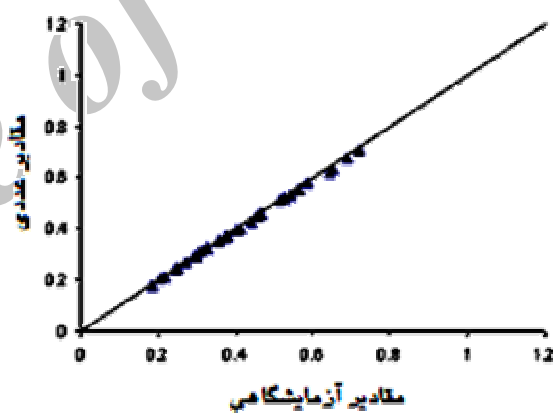
۳) مقدار  $C_d$  در  $H_1/D$  های بزرگتر از  $0.95$  تقریباً ثابت شده و افزایش  $H_1/D$  تاثیر چندانی در ضریب دبی سرریز ندارد.

در مطالعه مشابیهی حیدر پور و همکاران (۱۳۸۱) تغییرات ضریب دبی جریان را در مقادیر مختلف  $H_1/R$  سرریزهای تاج دایره ای و استوانه ای بررسی کردند که  $R$  شعاع استوانه می‌باشد. نتایج نشان داد که در

$3/0.31$  درصد و عمق آب بر روی سرریز  $h$  بین  $0.219$  تا  $3/0.28$  درصد می‌باشد.



الف



ب

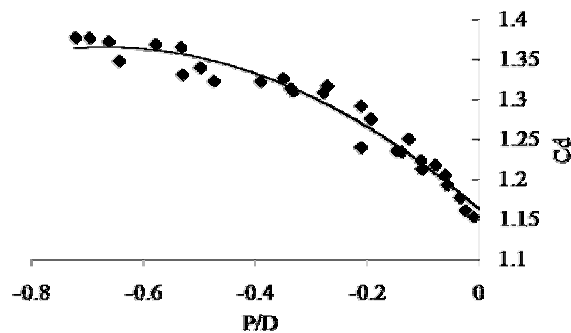
شکل 3- مقایسه نتایج مدل Fluent با مدل فیزیکی الف -

$H_1/D$  ب-  $h/D$

روند تغییرات ضریب دبی  $C_d$  در مقابل  $H_1/D$  برای مدل Fluent و مدل فیزیکی در شکل ۴ نشان داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که در هر دو مدل با افزایش بار کل آب در بالادست ( $H_1$ ) ضریب دبی افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که ضریب دبی در مدل Fluent برای همه مقادیر  $H_1/D$  همواره بیشتر از ضریب دبی در مدل فیزیکی است. این روند یکسان



مشاهده می‌شود. تغییرات فشار نسبت به  $H1$  طبق شکل ۵ خطی است، از آنجایی که در معادله، تغییرات ضریب دبی نسبت به  $H1$  غیرخطی می‌باشد انتظار می‌رود که رابطه بین فشار منفی بر روی سرریز و ضریب دبی نیز غیرخطی باشد. شکل ۶ دلالت بر غیرخطی بودن رابطه فشار و ضریب دبی دارد.

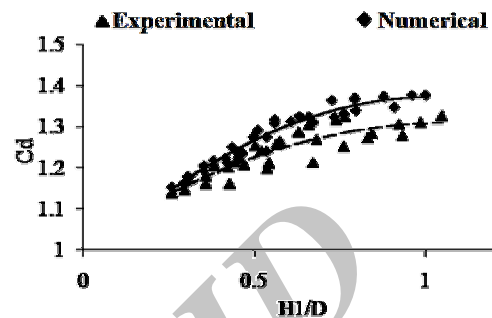


شکل ۶- تغییرات  $C_d$  در مقابل  $P/D$

همچنان که گفته شد یکی از خصوصیات بارز سرریزهای استوانه‌ای انحنا زیاد خطوط جریان در این سرریزها است. در شکل ۷ نمودار تغییرات انحنای جریان با معیار  $h/H0$  در سرریزهای استوانه‌ای، با قطرهای مختلف ترسیم شد. نمودار حاصل نشان می‌دهد که با افزایش  $H1/D$  مقدار  $h/H0$  نیز با شیب ملایمی افزایش می‌یابد. در تحقیقی که قبلاً بر روی سرریزهای استوانه‌ای انجام شده، نتایج مشابهی بدست آمده است (رامامورتی و وو ۱۹۹۳).

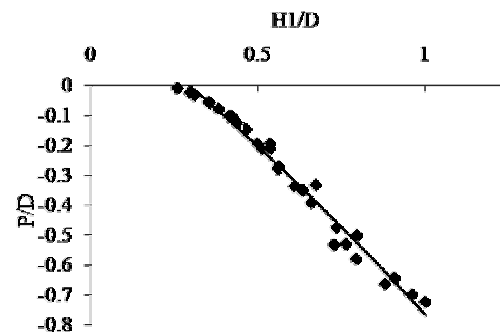
تنش برشی در محدوده  $pq$  به طول ۳۰ سانتیمتر (شکل ۱) ناشی از برخورد بردارهای سرعت سیال عبوری از روی سرریز به کف قابل بررسی می‌باشد. با توجه به اینکه سرعت، پارامتری برداری است، با تغییر در زاویه برخورد آن با کف، مقدار تنش برشی نیز تغییر می‌کند. هرچه این زاویه برخورد به حالت قائم نزدیک‌تر باشد مقدار تنش افزایش می‌یابد. شکل ۸ روند تغییرات  $t/D$  را در مقابل  $H1/D$  برای قطرهای مختلف سرریز نشان می‌دهد. همانطور که از شکل مشخص

سرریز استوانه‌ای با افزایش  $H1/R$  ضریب دبی جریان افزایش می‌یابد.



شکل ۴- تغییرات ضریب دبی  $C_d$  نسبت به  $H1/D$  در مدل Fluent و مدل فیزیکی

فشار منفی در سرریزهای استوانه‌ای در سطح  $m-n$  (شکل ۱) ایجاد می‌شود. همانطور که شکل ۵ نشان می‌دهد با افزایش مقدار  $H1$  فشار منفی  $P$  بر روی سطح مذکور به صورت خطی افزایش می‌یابد.



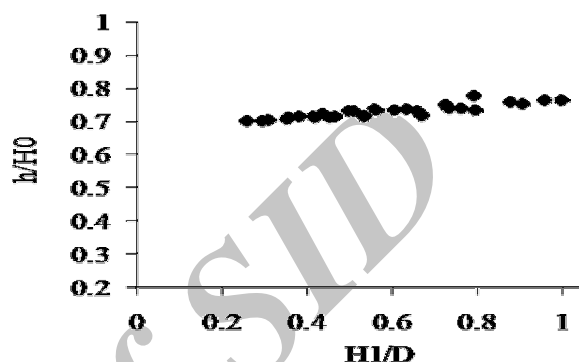
شکل ۵- تغییرات فشار منفی  $P$  بر روی سرریز (در سطح  $m-n$ ) در مقابل بار آب در بالادست  $H1$

شکل ۶ روند تغییرات  $C_d$  را در مقابل  $P/D$  نشان می‌دهد. با توجه به این شکل تغییرات  $C_d$  تا  $P/D = -0.6$  افزایشی بوده و برای  $P/D < -0.6$  افزایش محسوسی در مقدار ضریب دبی دیده نشده و به مقدار ثابت حدود  $1/37$  نزدیک می‌شود. این روند تغییرات در نمودار مربوط به نتایج عددی شکل ۴ برای  $H1/D > 0.95$  نیز

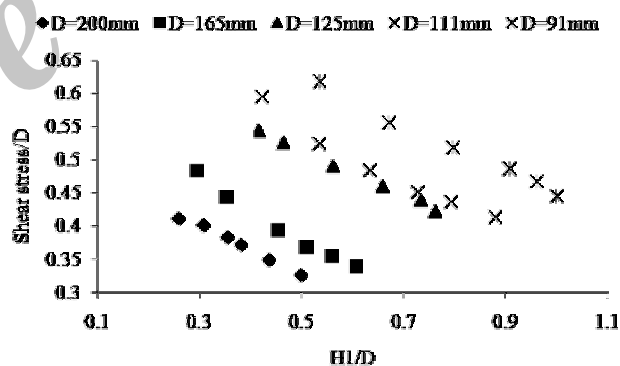
### نتیجه‌گیری

- مقایسه نتایج حاصل از مدل فیزیکی و مدل *Fluent* بیانگر تطابق خوبی بودند. لذا می‌توان مدل *Fluent* را به دلیل هزینه کمتر و زمان بهینه‌تر جایگزین مدل فیزیکی کرد.
- ضریب دبی در سرریزهای استوانه‌ای بدلیل انحنای زیاد بیشتر از سایر سرریزهای لبه پهن می‌باشد. این ضریب با افزایش نسبت بار کل هیدرولیکی در بالادست سرریز به قطر آن تا حد معینی افزایش می‌یابد. نتایج مدل *Fluent* و مدل فیزیکی هر دو موید این قضیه می‌باشند.
- با افزایش بار آب در بالادست سرریز فشار منفی بر روی سطح سرریز بصورت خطی تغییر یافته و متعاقب آن ضریب دبی تا مقدار معینی افزایش می‌یابد. این مقدار حدود  $1/37$  تخمین زده می‌شود.
- خطای نسبی مدل *Fluent* در شبیه سازی عمق آب بالادست سرریز بین  $0/035$  تا  $3/031$  درصد و در عمق آب بر روی سرریز بین  $0/219$  تا  $3/028$  درصد می‌باشد.
- استفاده از روش RNG در مدل  $k-e$  برای شبیه‌سازی آشفتگی جریان و مدل حجم سیال برای شبیه‌سازی جریان چندفازی در تحلیل جریان بر روی سرریز استوانه‌ای نتایج بهتری نشان دادند.

است با افزایش بار آب بر روی سرریز جریان از حالت ریزشی به حالت جت آب نزدیک شده و در اثر کاهش زاویه برخورد آب با کف مقدار تنش برشی کاهش می‌یابد. همچنین در یک نسبت ثابت  $H1/D$ ، با افزایش قطر سرریز  $t/D$  کاهش می‌یابد.



شکل 7- تغییرات انحنای جریان با معیار  $h/H0$  در سرریزهای استوانه‌ای



شکل 8- تغییرات  $t/D$  بر حسب  $H1/D$  در قطرهای مختلف سرریز

### منابع مورد استفاده

حیدرپور م، افضل‌ی مهر ح و خرمی الف، ۱۳۸۱. کاربرد تابع جریان در اطراف سیلندر دایره ای شکل در سرریزهای تاج دایره ای. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان، شماره ۶ صفحه‌های ۵۱ تا ۶۰.

Anderson D, Tannehill J and Pletcher R, 1984. Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer. Hemisphere Publishing Corporation, New York.

- Bos MG, 1978. Discharge Measurement Structures. 3rd ed., Publication 20, International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands.
- Chanson H and Montes JS, 1998. Over flow characteristics of circular weirs: Effects of inflow conditions. J Irrig and Drain Engin, ASCE, 124:152-161.
- Chen Q, Dai G and Liu H, 2002. Volume of fluid model for turbulence numerical simulation of stepped spillway overflow. J Hydraul Engin, ASCE, 128:683-688.
- Chaudhury D, 1993. Introduction to the renormalization group method and turbulence modeling. Fluent Inc. Technical Memorandum TM-107.
- Dargahi B, 2004. Experimental study and 3D numerical simulations for a free over flow spillway. J Hydraul Engin, ASCE, 132:899-907.
- Chen HC and Patel VC, 1988. Near-wall turbulence models for complex flows including separation. AIAA Journal, 26:641-648.
- Kim SE and Chaudhury D. 1995. A near-wall treatment using wall functions sensitized to pressure gradient. In: ASME FED Vol. 217, Separated and Complex Flows, ASME.
- Liu C, Huhe A and Wenju MA, 2002. Numerical and experimental investigation of flow over a semicircular weir. Acta Mechanica Sinica, 18:594-602.
- Ramamurthy AS and Vo ND, 1993. Characteristics of circular-crested weir. J Hydraul Engin, ASCE, 119:1055-1062.
- Savage BM and Johnson C, 2001. Flow over ogee spillway: Physical and numerical model case study. J. Hydraul Engin, ASCE, 127:640-649.