

## آنالیز عددی مشخصه‌های جریان عبوری از سرریز استوانه‌ای با استفاده از مدل Flow3D

حجت کرمی<sup>۱</sup>، سعید فرزین<sup>۲\*</sup>، الهام ضمیری<sup>۳</sup>، شهاب نیر<sup>۴</sup>

تاریخ ارسال: ۱۳۹۵/۰۴/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۷/۱۷

### چکیده

سرریز از رایج ترین وسایل اندازه گیری شدت جریان در مجاری روباز هستند. سرریز استوانه ای یکی از انواع سرریز های لبه پهن می باشد که به دلیل الگوی جریان پایدار و سهولت عبور اجسام معلق دارای کاربرد گسترده ای می باشد. لذا در این بررسی، جریان بر روی سرریز استوانه‌ای با قطر ۷/۵ سانتی متر در کانال مستطیلی با استفاده از مدل آشفتگی  $k - \epsilon$  در نرم افزار Flow3D به صورت سه بعدی شبیه‌سازی شد و با استفاده از نتایج آزمایشگاهی صحت سنجی انجام گرفت. درصد خطای RMSE حاصل از مقایسه ضریب دبی عددی با مقادیر فیزیکی ۰/۳۴۲۷ به دست آمد که بیانگر تطابق بالای مشخصات هیدرولیکی به دست آمده از مدل عددی با نتایج مدل فیزیکی است. همچنین مشخص گردید که ضریب دبی برای سرریز استوانه‌ای به مقادیری بیش از ۱ میل می‌کند. نسبت بی‌بعد هد آب به شعاع سرریز نیز پارامتری موثر بر ضریب دبی شناخته شد که رشد ۱۰۰٪ آن موجب افزایش بیش از ۱۰۰٪ ضریب دبی گردیده است. در مدل عددی سرریز استوانه‌ای، پارامترهای سرعت، فشار و عمق جریان و انرژی جنبشی و اشفتگی در مقطعی از کانال با توجه به موقعیت سرریز بررسی و مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد، عمق و فشار جریان در مقطع قبل از سرریز، مقادیری بزرگتری نسبت به مقادیر مربوط به مقطع بعد از سرریز دارند، لیکن نتایج مربوط به پارامتر سرعت، عکس فشار و عمق جریان می‌باشد. در نهایت رابطه‌ای جهت تعیین انرژی جنبشی جریان عبوری از سرریز استوانه‌ای ارائه شده است.

واژه های کلیدی: سرریز استوانه‌ای، ضریب دبی، مدلسازی عددی، مشخصات هیدرولیکی، Flow3D.

<sup>۱</sup> استادیار، عضو هیئت علمی دانشکده عمران، گروه مهندسی آب و سازه هیدرولیکی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران. ۰۹۱۲۴۸۰۳۳۵۰  
[hkarami@semnan.ac.ir](mailto:hkarami@semnan.ac.ir)

<sup>۲\*</sup> استادیار، عضو هیئت علمی دانشکده عمران، گروه مهندسی آب و سازه هیدرولیکی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، ۰۹۱۷۴۱۱۲۸۹۱  
[Saeed.farzin@semnan.ac.ir](mailto:Saeed.farzin@semnan.ac.ir)

<sup>۳</sup> کارشناسی مهندسی عمران دانشگاه سمنان، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت آب، گروه مهندسی آب و سازه هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، سمنان، بلوار قائم، خیابان شهید دربان ۰۹۳۷۸۱۲۳۱۹۰  
[Elham.zamiri90@yahoo.com](mailto:Elham.zamiri90@yahoo.com)

<sup>۴</sup> کارشناسی مهندسی عمران دانشگاه سمنان، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی اب و سازه هیدرولیکی، گروه مهندسی آب و سازه هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، سمنان، شهرک تعاون، خیابان ۱۱ غربی، ۰۹۱۲۸۳۱۱۵۷۴  
[Sh.nayyer@semnan.ac.ir](mailto:Sh.nayyer@semnan.ac.ir)

## مقدمه

برآورد دبی جریان در شبکه های انتقال آب و مجاری فاضلاب از اهمیت زیادی برخوردار است. سرریزها از جمله وسایل کنترل و اندازه گیری جریان در رودخانه ها و کانال های روباز بوده که در بسیاری از تحقیقات مهندسی مورد استفاده قرار می گیرند. برای اندازه گیری دبی جریان از دریچه ها و سرریزها بدلیل داشتن رابطه دبی - اشل ساده، بسیار استفاده می شود (حیدری مریم و همکاران، ۱۳۹۱). از جمله کاربرد سرریزها در کانال های روباز کنترل سیلاب ها، تخلیه جریان اضافی در هنگام سیلاب و استفاده از سرریز به عنوان ابزار اندازه گیری آب در شبکه های انتقال آب می باشد (Dabbling and Tullis, 2012). طول سرریز و شکل تاج آن بر میزان دبی سرریز تاثیرگذار خواهند بود (اسمعیلی ورکی، ۱۳۹۲). سرریز استوانه ای نیز به عنوان یکی از انواع سرریزها مورد استفاده قرار می گیرد که از لحاظ شباهت با سد لاستیکی در مطالعه سازه های انعطاف پذیر نیز مورد اهمیت قرار گرفته است (هنر و مظلوم شهرکی، ۱۳۹۳). از دیگر مزایای این سرریز می توان به بالا بودن ضریب دبی جریان در این سرریز نسبت به سرریزهای لبه پهن اشاره نمود (عباسپور، هاشمی کیا، ۱۳۹۲). رامامورتی (۱۹۹۳) به بررسی تاثیر شیب بالادست و پایین دست بر سرعت جریان و ضریب دبی پرداختند و دریافتند، افزایش شیب بالادست بر میزان ضریب دبی تاثیر نداشته، لیکن افزایش شیب پایین دست موجب افزایش ضریب دبی گشته - است (Ramamurthy and Vo 1993).

(جانسون و مونتس، ۱۹۹۸) چگونگی رفتار جریان در سرریزهای استوانه ای را بررسی کردند، نتایج آزمایشات آنان نشان داد که با افزایش بار کل در بالادست ضریب دبی افزایش می یابد. (حیدریور و چمنی، ۲۰۰۶) روشی برای پیش بینی سرعت جریان عبوری از سرریز استوانه ای یافتند. مقایسه نتایج حاصل از این روش با مقادیر آزمایشگاهی، دلالت بر دقت بالای این روش دارد. در ادامه نیز معادله ای برای تخمین ضریب دبی به دست آوردند. نتایج بررسی ایشان نشان داد، هد بالادست بر ضریب دبی مؤثر می -

باش (Heidarpour and Chamani 2006). نقوی و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی پارامترای جریان در سرریزهای استوانه ای به صورت آزمایشگاهی و عددی پرداختند و سرعت و فشار در این سازه هیدرولیکی را مورد بررسی قرار دادند، همچنین مشخصات جریان بحرانی را وابسته به قطر و موقعیت جریان ورودی وابسته دانستند. نتایج این بررسی حاکی از تطابق بالای نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی است (Naghavi et al, 2011).

کبیری سامانی در تحقیق خود، پارامتر  $H_1/R$  را به عنوان مؤثرترین عامل در تعیین مشخصات هیدرولیکی جریان دانستند و روابطی جهت دستیابی به ضریب دبی و سرعت جریان در سرریز استوانه ای ابداع کردند که می تواند ضریب دبی را با حداکثر خطای ۵٪ پیش بینی نماید. (Kabiri-Samani 2014) عزیزاده و همکاران با بررسی شرایط و عملکرد سرریز استوانه ای و نیم استوانه ای بهترین زاویه ممکن برای افزایش ضریب آبگذری در سرریز نیم استوانه ای را ارائه دادند (Alizadeh et al. 2016). (Kim, 2016) ویژگی های سرعت سرریز دایره ای را با استفاده از مدل عددی بررسی کرده و رابطه ای برای ضریب دبی با توجه به سرعت جریان بر روی سرریز دایره ای ارائه کرد. از دیگر تحقیقاتی که در داخل کشور بر روی این موضوع انجام شده است، می توان به مطالعه (حیدریور و همکاران، ۱۳۸۴) اشاره نمود که در ۱۸ مدل آزمایشگاهی، سرریز استوانه ای و نیم استوانه ای را مورد تحقیق قرار دادند و دریافتند، شیب بالادست بر مقدار ضریب دبی بی اثر بوده و هد کل بالادست بر ضریب دبی تاثیرگذار خواهد بود. (اسماعیلی و همکاران ۱۳۸۹) تغییرات فشار و سرعت در سرریز استوانه ای را به طور آزمایشگاهی اندازه گرفتند و با نتایج مدل سازی با مدل Fluent مقایسه کردند. نتایج به دست آمده حاکی از تطابق بالای الگوی جریان روی سرریز در آزمایشگاه و نرم افزار دارد. با مروری بر تحقیقات انجام شده در خصوص مدل سازی سرریز استوانه ای و بررسی سرعت و فشار جریان روی این سرریز با نرم افزار Flow3D مطالعات چندان جامعی انجام نشده است لذا در این پژوهش سعی شده تغییرات سرعت، فشار و

بدنه ی صلب مشخص باشد با روشی مشابه روش VOF می توان مرز صلب را داخل شبکه ثابت مشخص کرد. این مرز برای تعیین شرایط مرزی دیواره که جریان باید از آن تبعیت کند، به کار برده می شود (Hirt, & Richardson, 1999).

ضریب دبی در سرریز استوانه‌ای، مانند سرریز لبه پهن از رابطه باس ۱۹۷۸ (رابطه ۲) حاصل می‌شود:

$$C_d = \frac{q}{g^{0.5} \frac{\rho 2H_1^{1.5}}{\rho 3 \theta}} \quad (2)$$

در رابطه ۲،  $C_d$  ضریب دبی جریان،  $g$  شتاب ثقل ( $m/s^2$ )،  $q$  دبی عبوری از واحد عرض سرریز ( $m^3/s/m$ ) و  $H_1$  ارتفاع تراز آب در بالادست می‌باشد (حیدریپور و همکاران، ۱۳۸۴).

در این تحقیق مدل عددی جریان از روی سرریز استوانه ای شبیه سازی شد و با نتایج آزمایشگاهی قره گزلی (۱۳۹۱) مقایسه شد و کالیبراسیون انجام شد. مدل سازی در  $\gamma$  دبی مختلف و با ۳ مدل آشفتگی K- $\epsilon$ ، LES و RNG با کمک نرم افزار Flow3D انجام شد. معادله K- $\epsilon$  شامل دو معادله انتقال برای انرژی جنبشی آشفتگی و اتلاف آن است که K معرف انرژی جنبشی آشفتگی و  $\epsilon$  (m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>)، کمیت اتلاف آشفتگی می‌باشد. معادله انتقال برای اتلاف آشفتگی،  $\epsilon_T$  مطابق رابطه (۳) تعریف می‌شود:

$$\frac{\partial \epsilon_T}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \frac{\partial}{\partial x} (u A_x \epsilon_T) + v A_y \frac{\partial \epsilon_T}{\partial y} + w A_z \frac{\partial \epsilon_T}{\partial z} = \frac{CDIS1 \cdot \epsilon_T}{K_T} (P_T + CDIS3 \cdot G_T) + Diff_\epsilon - \frac{CDIS2 \cdot \epsilon_T^2}{K_T} \quad (3)$$

در رابطه (۳)، CDIS1، CDIS2 و CDIS3 پارامترهای بی‌بعدی هستند که مقدارشان برای مدل K- $\epsilon$ ، به ترتیب دارای مقادیر پیش فرض ۱/۴۴، ۱/۹۲، ۰/۲ هستند (Dimitris et al. 2010). مدل آشفتگی RNG، قادر است ضرایبی که در مدل K- $\epsilon$  به صورت تجربی استخراج شده‌اند را به‌طور صریح بیان کند. این مدل در جریان‌های با نواحی برشی قوی و شدت آشفتگی کم، نتایج دقیق تری را تولید می‌کند. و مقدار پارامترهای CDIS1 و CDIS2 در این مدل، به

ضریب دبی در سرریزهای استوانه‌ای با استفاده از مدل آشفتگی  $k - \epsilon$  در نرم افزار Flow3D تعیین شود، تا قابلیت این مدل در شبیه سازی وضعیت جریان در سرریزها تعیین شود. همچنین این مطالعه امکان به-دست آوردن ضریب دبی جریان برای این سرریز را در شرایط مختلف دبی، عمق و ... با استفاده از برازش نمودارها فراهم می‌کند.

## مواد و روشها

تئوری جریان در سرریزهای استوانه‌ای تحت تأثیر پارامترها و خصوصیات سینماتیکی، دینامیکی و هندسی است که بر اساس رابطه ۱ تعریف می‌شود (ورجاوند و همکاران، ۱۳۸۵):

$$f(H, H_w, B, m, g, s, Q, R, r, s, d) = 0 \quad (1)$$

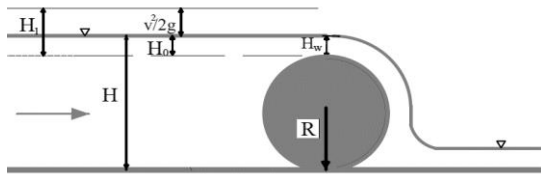
که در آن، B عرض کانال، g شتاب گرانش،  $\mu$  لزجت دینامیکی، s شیب کف کانال،  $\rho$  چگالی مخصوص سیال،  $\sigma$  کشش سطحی و  $\delta$  ضریب تراکم است همچنین R شعاع استوانه، H عمق آب بالادست و  $H_w$  عمق آب بر روی سرریز است.

مدل Flow-3D با به‌کارگیری سلول‌های سه-بعدی مستطیلی و با کمک روشهای VOF<sup>۱</sup> و FAVOR<sup>۲</sup> به شبیه‌سازی مدل هیدرولیکی مورد نظر می‌پردازد. هنگامی که جریان دارای سطح آزاد است از روش VOF استفاده می‌شود. روش FAVOR یکی از روش‌های جز حجمی است که از آن برای شبیه سازی سطوح و احجام صلب مثل مرزهای هندسی استفاده می‌شود (Kabiri-Samani and Bagheri 2014). جز حجمی سیال داخل هر سلول شبکه برای تعیین موقعیت سطح سیال بکار برده می‌شود، همچنین کمیت جز حجمی ( $V_f$ ) برای تعیین سطح بدنه صلب استفاده می‌شود. از طرفی این کمیت می‌تواند در مشخص کردن حجمی از سلول که توسط بدنه صلب اشغال نشده است ( $V_f$ ) نیز استفاده شود. زمانی که در هر سلول، حجم اشغال شده توسط

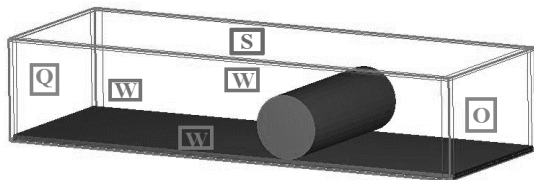
<sup>1</sup> Volume of Fluid

<sup>2</sup> Fractional Area-Volume Obstacle Representation

بودن بالادست با عمقی ثابت و پایین دست خالی از آب می‌باشد. دیوار جانبی و کف کانال به صورت دیواره و برای سطح خروجی، دبی خروجی تعریف شده است و برای سطح آزاد، شرایط مرزی با فرض صفر بودن فشار مدلسازی شد. در شکل ۲ نمای سه بعدی شرایط مرزی کانال مدلسازی شده آن نمایش داده شده است.



شکل ۱- مدل شماتیک سرریز استوانه‌ای



شکل ۲- نمای سه بعدی شرایط مرزی کانال مدلسازی شده

## نتایج و بحث

### بررسی مش‌بندی

در مدلسازی از دو مدل با تعداد مش‌های ۳۰۰۸۵۰ و ۳۴۴۴۴۸ استفاده شد. به دلیل اهمیت مقادیر پارامترهای هیدرولیکی در راستای z، از مش‌های با ابعاد ریز تری نسبت به جهت x و y استفاده شد. با کاهش تعداد مش‌ها به ۳۰۰۸۵۰ خطای مدلسازی نسبت به حالت فیزیکی ۷/۶۹ درصد افزایش می‌یابد. همچنین برای مش با تعداد ۳۴۴۴۴۸ مدلسازی انجام شد، مقدار معیار خطای RMSE برای  $H_w/R$  برابر با ۰/۲۵۰۸ و برای ضریب دبی و دبی به ترتیب برابر با ۰/۰۵ و ۰/۰۱۳ به دست آمده است که نشان دهنده تطابق بالای نتایج مدلسازی عددی با نتایج آزمایشگاهی می‌باشد.

در شکل ۳ نمایی از مقطع مش‌بندی شده کانال مشخص شده است. در مدلسازی سرریز استوانه‌ای از مدل آشفتگی K-E، LES و RNG استفاده شد. خطای به دست آمده از مدلسازی با این سه مدل

ترتیب ۱/۴۲ و ۱/۶۸ می‌باشد (Sabbagh-Yazdi et al. 2007). این مدل آشفتگی وابسته به زمان بوده و سه‌بعدی می‌باشد، همچنین بایستی به نوسانات مقدار اولیه داده شود و یا در مرزهای ورودی تعریف شوند. مجموعه این اعمال پرهزینه بوده، لیکن نسبت به مدل آشفتگی RNG، نتایج با جزئیات بیشتری را ارائه می‌دهد (Yin, B et al. 2016). با استفاده از سه معیار میانگین مطلق خطا (MAE)<sup>۱</sup>، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)<sup>۲</sup> و ضریب همبستگی ( $R^2$ ) مورد ارزیابی قرار گرفت که به صورت روابط ۴، ۵ و ۶ تعریف شده است.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum |y_i^* - y_i| \quad (۴)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i^* - y_i)^2} \quad (۵)$$

$$R^2 = \frac{Cov(y_i^*, y_i)}{S_{y_i^*} S_{y_i}} \quad (۶)$$

در روابط (۴) و (۵) منظور از  $y_i^*$ ،  $y_i$  و n به ترتیب مقادیر به دست آمده در مدل عددی، مقادیر آزمایشگاهی و تعداد کل داده‌ها می‌باشند. در رابطه (۶) نیز  $Cov(y_i^*, y_i)$  و  $\sigma_{y_i}$  و  $\sigma_{y_i^*}$  به ترتیب کوواریانس مقادیر مدل عددی و آزمایشگاهی و انحراف معیارهای آن‌ها می‌باشد. برای مدل عددی استوانه‌ای با قطر ۷۵ میلی‌متر در کانالی به طول ۵ متر، عرض ۷/۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۴ سانتی‌متر شبیه‌سازی شد و اندازه‌گیری عمق آب در مدل آزمایشگاهی با استفاده از گیج نقطه‌ای و با دقت ۱ میلی‌متر انجام شده است. مدلسازی برای دبی‌های مختلف در محدوده ۰/۵ تا ۲ لیتر بر ثانیه انجام شد. شکل ۱ مدل آزمایشگاهی را به طور شماتیک نمایش می‌دهد.

برای شبیه‌سازی جریان در مدل سرریز از شرط مرزی دبی ورودی برای سطح ورودی استفاده شد و مقدار اولیه عمق جریان در زمان صفر در حالت پر

<sup>۱</sup> Mean Absolute Error

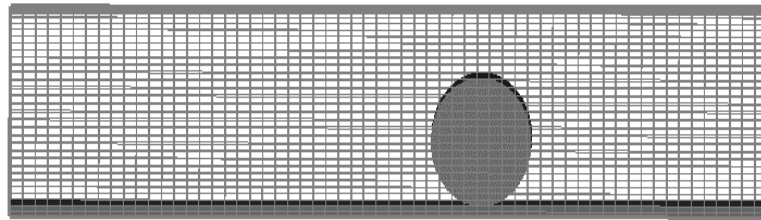
<sup>۲</sup> Root Mean Square Error

farzin et al. ) و (samadi et al. 2014)، (۱۳۹۲) نیز مدل  $k-\epsilon$  را مدلی مناسب برای مدل سازی سرریز استوانه ای معرفی کرده اند. در جدول ۲ مقادیر خطای مربوط به دبی، ضریب دبی و  $H_w/R$  در مدل  $k-\epsilon$ ، نشان داده شده است.

آشفته گی حاکی از آن است که مدل  $k-\epsilon$  نتایج مطلوب تری را حاصل می کند و خروجی های حاصل از مدل عددی شبیه سازی شده با این مدل با نتایج فیزیکی تطابق بهتری دارد (مطابق جدول ۱). همچنین پژوهشگرانی از جمله (عباسپور و هاشمی کیا،

جدول ۱- مقادیر مربوط به خطای مدل های آشفته گی برای پارامتر  $H_w/R$

مدل آشفته گی	MAE	RMSE	$R^2$
RNG	۰/۳۷۴۶	۰/۳۷۵	۰/۸۰۱۱
$k-\epsilon$	۰/۲۲۶۹	۰/۲۴۱۷	۰/۹۰۵۳
LES	۰/۳۸۲	۰/۳۹۰۱	۰/۸۰۰۴



شکل ۳- نمای دو بعدی مش بندی مدل عددی مورد بررسی

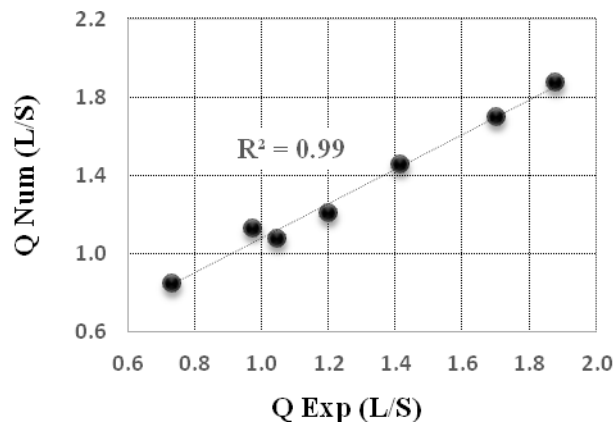
جدول ۲- مقادیر مربوط به خطای دبی، ضریب دبی و  $H_w/R$

$R^2$	MAE	RMSE	خطای مربوط به دبی
۰/۹۸۷۲	۰/۰۵۱۳۳	۰/۰۷۵۵	خطای مربوط به ضریب دبی
۰/۹۳۶۷	۰/۳۰۰۶	۰/۳۴۲۷	خطای مربوط به $H_w/R$

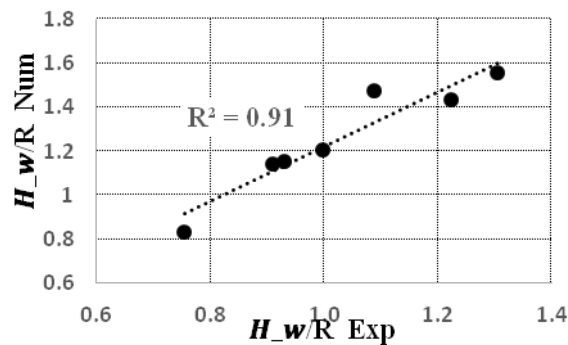
### بررسی ضریب دبی

و آزمایشگاهی، عدد رگرسیون  $0/9053$  برای مقایسه عددی و آزمایشگاهی  $H_w/R$  اثبات کننده این تطابق می باشد. رابطه ی دبی ورودی به فلوم با ضریب دبی در شکل ۶ نشان داده شده است، که بیانگر رابطه ی خطی بین این دو پارامتر است.

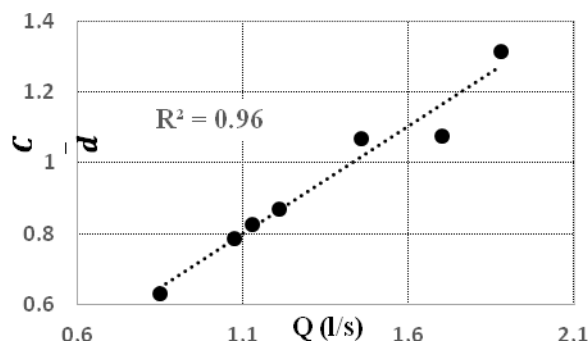
شکل ۴ نشان دهنده تغییرات دبی و شکل ۵ تغییرات  $H_w/R$  را در دو مدل فیزیکی و مدل Flow3D مورد مقایسه قرار می دهد. این مقایسه نمایشگر تطابق بالای مدل فیزیکی با مدل عددی است که عدد رگرسیون  $0/9872$  برای مقایسه دبی عددی



شکل ۴ - مقایسه دبی مدل فیزیکی با مدل عددی



شکل ۵ - مقایسه نتایج (H<sub>w</sub>/R) مدل فیزیکی با مدل عددی



شکل ۶ - رابطه ی خطی بین دبی ورودی و ضریب دبی

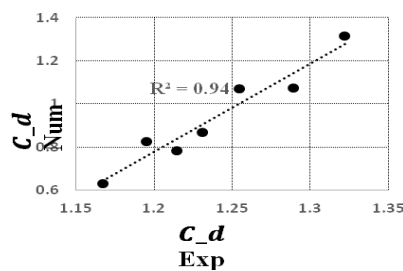
همچنین مشاهده می شود ضریب دبی در سرریزهای استوانه‌ای به تدریج از ۱ بزرگتر می شود. (naghavi et al. 2011) در تحقیق مشابهی پارامترهای مختلف جریان بر روی سرریز استوانه‌ای را بررسی کردند و دریافتند ضریب دبی در سرریز استوانه‌ای، برخلاف سایر سرریزها به مقداری بزرگتر از ۱ میل می کند.

در شکل ۷ ضریب دبی حاصل از مدل فیزیکی با ضریب دبی به دست آمده از مدل عددی با هم مقایسه شده اند و درصد خطای نسبی حاصل از مقایسه ۲/۷۱ درصد به دست آمد، عدد رگرسیون حاصل از رسم نمودار ۰/۹۳۶۷ به دست آمده که بیانگر تطابق خوب داده های عددی با داده های آزمایشگاهی است،

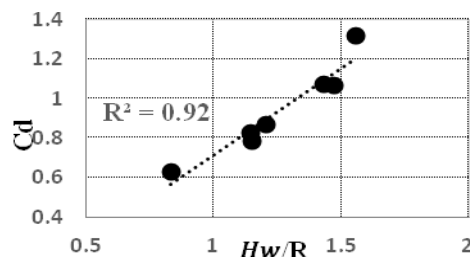
ضریب دبی افزایش می‌یابد. به عبارتی با رشد ۱۰۰ درصدی  $H_w/R$ ، ضریب دبی بیش از ۱۰۰ درصد، رشد خواهد داشت. ( Heidarpour and chamani, 2006) و (Kabiri-Samani and Bagheri, 2014) نیز در تحقیق خود ضریب دبی سرریز استوانه ای را تابعی از هد آب دانستند. نتایج مربوط به مدلسازی در جدول ۳ مشخص شده‌است.

این نتیجه با نتیجه حاصل از تحقیق حاضر تطابق دارد. علت افزایش مقدار ضریب دبی را می‌توان به انحنای زیاد این سازه هیدرولیکی نسبت به سایر سرریزها و تطابق الگوی جریان با انحنای سرریز نسبت داد.

شکل ۸ تغییرات ضریب دبی را نسبت به  $H_w/R$  نشان می‌دهد که مشخص کننده تاثیر تغییرات عمق آب روی سرریز بر ضریب دبی می‌باشد. با مشاهده این شکل مشخص می‌شود با افزایش عمق آب روی سرریز،



شکل ۷- مقایسه  $C_d$  حاصل از مدل عددی با مدل فیزیکی



شکل ۸ - تغییرات ضریب دبی نسبت به  $H_w/R$

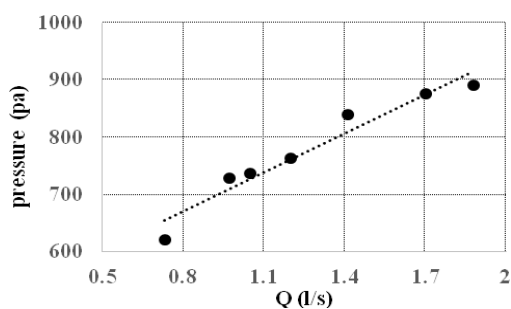
جدول ۳- نتایج ضریب دبی مربوط به مدل سازی

شماره تست	Q(l/s)	H <sub>w</sub> (m)	C <sub>d</sub>
۱	۰/۸۴۸۶	۰/۰۳۱۲۳	۰/۶۲۹۷
۲	۱/۱۲۸	۰/۰۴۲۹	۰/۸۲۵۹
۳	۱/۰۷۴	۰/۰۴۳۲	۰/۷۸۳۹
۴	۱/۲۰۸	۰/۰۴۵۳	۰/۸۶۸۳
۵	۱/۴۵۶	۰/۰۵۵۳	۱/۰۶۹۴
۶	۱/۷۰۱	۰/۰۵۳۷	۱/۰۷۵۰
۷	۱/۸۷۸	۰/۰۵۸۳۸	۱/۳۱۶۸

### بررسی تغییرات فشار جریان

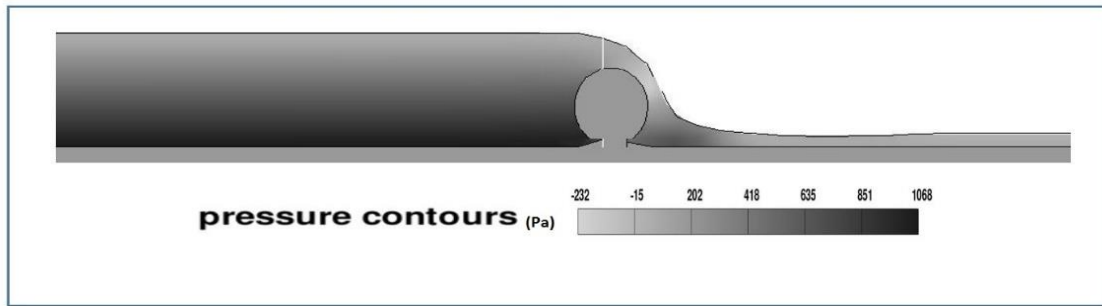
تحلیل پارامتر فشار نسبت به دبی جریان بیانگر آن است که میزان افزایش ۱/۵ برابری فشار جریان، وابسته به افزایش ۲/۵ برابری دبی جریان است که در شکل ۹ نیز رابطه این دو پارامتر و وابستگی آنها به هم مورد سنجش قرار گرفته است. تغییرات فشار جریان حین عبور از سرریز در شکل ۱۰ نشان داده شده است، که نواحی دارای فشار منفی با رنگ سفید و نواحی با فشار

مثبت و بالا با رنگ مشکی نمایش داده شده اند. از بررسی پروفیل فشار ناشی از جریان مشاهده می شود فشار روی تاج سرریز، به مقدار ۲۳۲- پاسگال می رسد. این فشار منفی منجر به مکش جریان و چسبندگی جریان در این ناحیه می گردد. (اسماعیلی و همکاران، ۱۳۸۹) نیز در تحقیق به فشار منفی روی تاج دست یافتند.



شکل ۹- بررسی فشار متوسط جریان نسبت به دبی





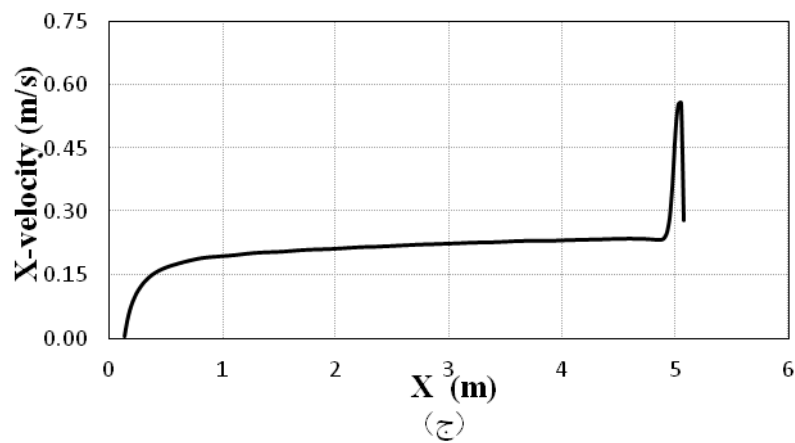
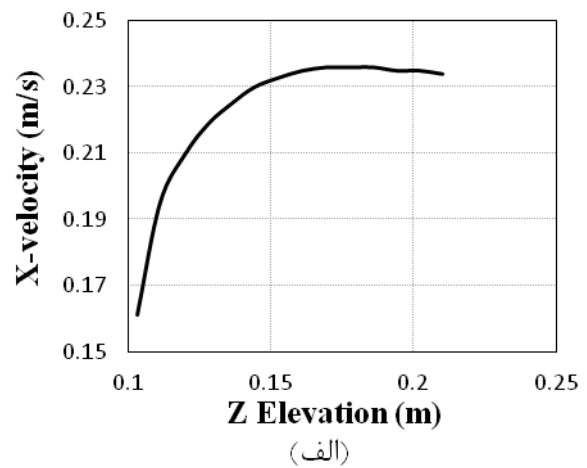
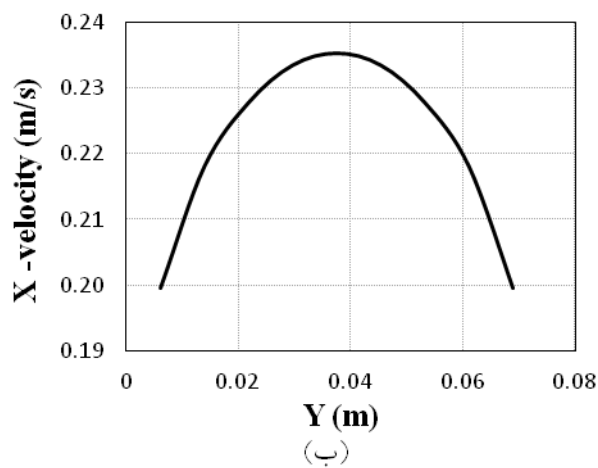
شکل ۱۰- تغییرات فشار در مقطع کانال

به تدریج افزایش یافته و در نیمه آن به بیشترین مقدار خود (حدود  $0/۲۳۵$  متر بر ثانیه) رسیده و دوباره کاهش می‌یابد. در ادامه تغییرات سرعت در راستای طولی کانال در شکل (۱۱-ج) نشان داده شده است و نتایج آن بیان‌کننده آن است که نرخ سرعت در این راستا افزایش می‌یابد و با رسیدن جریان به سرریز، مقدار سرعت رشد چشمگیری داشته، به عبارتی حدود  $۲/۵$  برابر مقطع قبل از سرریز افزایش می‌یابد و پس از عبور از آن دوباره کاهش می‌یابد.

#### بررسی تغییرات سرعت در سه بعد

در مطالعه آزمایشگاهی انجام شده فقط به بررسی ضریب آبگذری سرریز پرداخته شده است و خصوصیات جریان و سرعت، مورد بررسی قرار نگرفته است. در تحقیق حاضر از نتایج مدل عددی جهت بررسی خصوصیات سرعت جریان پیرامون سرریز استوانه‌ای استفاده شده است. سرعت در جهت  $x$  با  $u$ ، در جهت  $y$ ،  $v$  و در جهت  $z$  با  $w$  نشان داده شده است. همچنین سرعت برآیند با  $V$

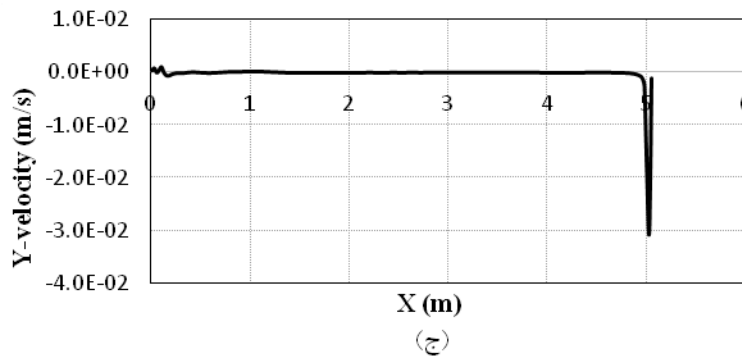
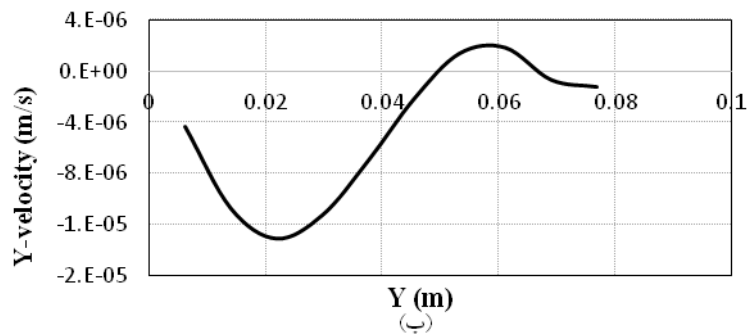
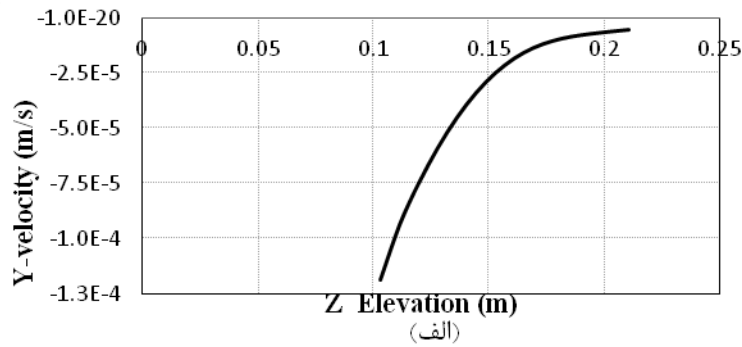
( $V = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$ ) نمایش داده می‌شود. شکل (۱۱-الف) تغییرات سرعت طولی جریان ( $u$ ) نسبت به عمق کانال را نشان می‌دهد. نتایج این نمودار حاکی از آن است که با نزدیک شدن تدریجی به سطح جریان، سرعت به تدریج افزایش می‌یابد. همان طور که شکل (۱۱-ب) نشان می‌دهد پارامتر سرعت طولی در عرض



شکل ۱۱- تغییرات سرعت طولی (u) در: الف-  $(y=0/0375m, x=4/7m)$ ، ب-  $(z=0/094m, x=4/7m)$ ، ج-  $(y=0/0375m, z=0/094m)$

پروفیل سرعت عرضی در طول کانال در شکل (۱۲-ج) نشان می‌دهد با عبور جریان از روی سرریز، مقدار سرعت از مقادیر نزدیک به صفر، به شدت تا مقدار  $0.3$  متر بر ثانیه، افزایش یافته و سپس با دور شدن از سرریز، مقدار آن کاهش می‌یابد.

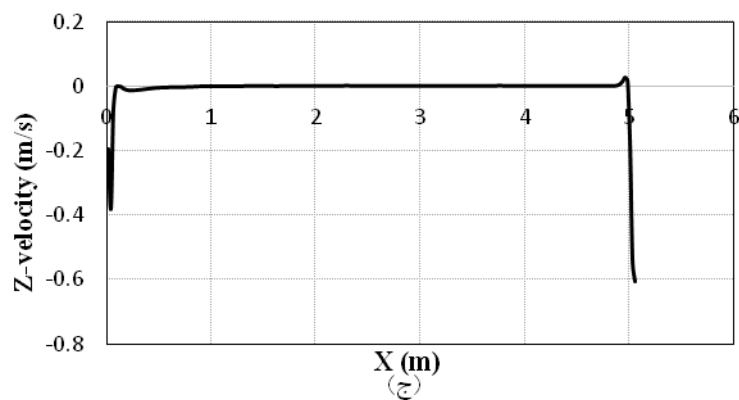
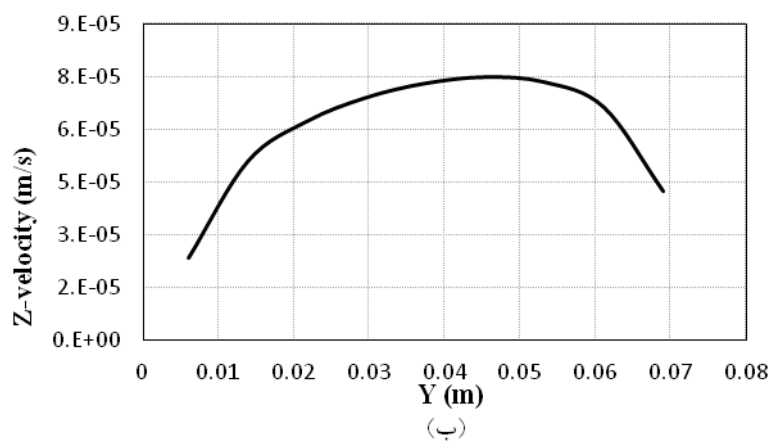
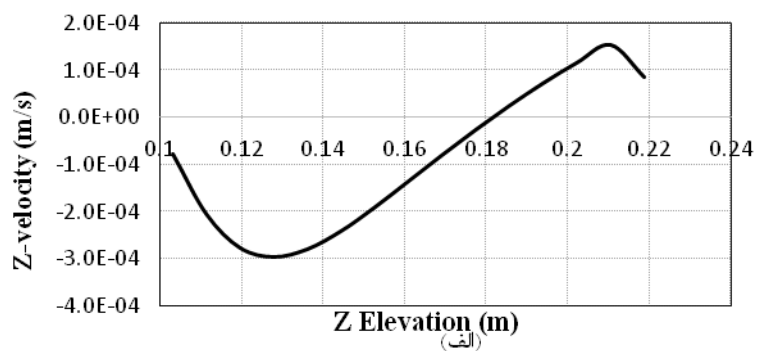
از بررسی شکل (۱۲-الف) مشخص می‌شود سرعت عرضی (v) جریان در عمق کانال از مقدار کمی آغاز شده و با نزدیک شدن جریان به سطح، تحت تاثیر سرعت طولی زیاد، از مقدار آن کاسته می‌شود. بررسی پارامتر سرعت عرضی در عرض کانال در شکل (۱۲-ب) نشان می‌دهد که جریان در وسط کانال سرعت بالاتری نسبت به کناره‌ها دارد که بیانگر تمایل حرکت جریان به سمت کناره‌ها است. همچنین



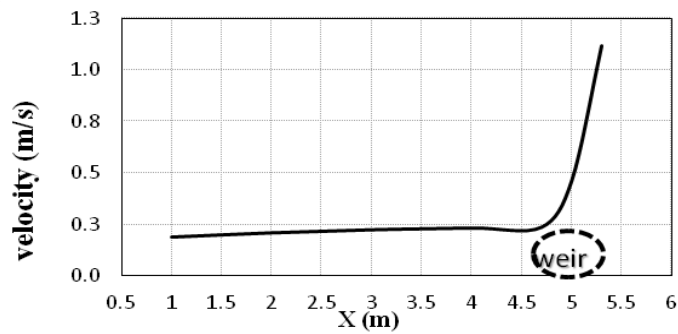
شکل ۱۲- تغییرات سرعت عرضی (v) در: الف-  $(y=0/0375m, x=4/7m)$ ، ب-  $(z=0/094m, x=4/7m)$ ، ج-  $(z=0/094m, y=0/0375m)$

راستا تا قبل از رسیدن جریان به سرریز تقریباً ثابت است، سپس با رسیدن جریان به سرریز افزایش می‌یابد که علت آن، ریزش جریان از سرریز و آزاد شدن انرژی پتانسیل و تبدیل آن به انرژی جنبشی می‌باشد. تغییرات سرعت متوسط جریان در شکل (۱۴) مشخص شده است. سرعت متوسط جریان نیز به دلیل مشابه حالت قبل، بر روی تاج سرریز به سرعتی  $2/5$  برابر بزرگتر از سرعت اولیه می‌رسد. همچنین سرعت متوسط در مقطع  $30$  سانتی‌متری پس از سرریز، به مقداری  $6$  برابر سرعت متوسط اولیه می‌رسد.

در ادامه شکل (۱۳-الف)، پروفیل سرعت در راستای عمق (w) نسبت به عمق کانال را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که سرعت در این راستا با مقداری منفی رشد کرده یعنی حرکتی به سمت پایین دارد، سپس روند کاهشی در پیش گرفته تا به مقدار صفر می‌رسد و مجدداً افزایش می‌یابد و به سمت بالا حرکت می‌کند. شکل (۱۳-ب)، نمایانگر پروفیل سرعت w نسبت به عرض کانال است، که نتایج آن مشابه تغییرات سرعت طولی جریان در عرض کانال است یعنی جریان در وسط کانال سرعت بیشتری دارد و در کناره‌ها کمتر است. روند تغییرات سرعت w نسبت به طول کانال در شکل (۱۳-ج) مشخص شده است، نتایج حاکی از آن است که مقدار سرعت در این



شکل ۱۳- تغییرات سرعت در راستای عمق (w) در: الف-  $(y=0/0375m, x=4/7m)$ ، ب-  $(z=0/094m, x=4/7m)$ ، ج-  $(z=0/094m, y=0/0375m)$

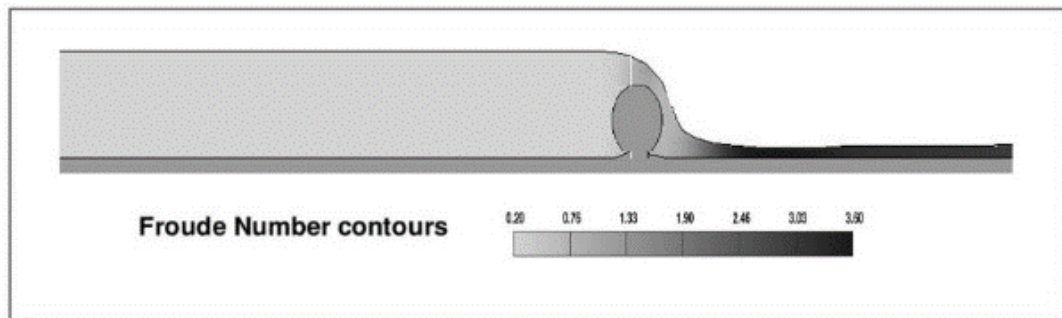


شکل ۱۴- تغییرات سرعت متوسط در  $(z=0/094m, y=0/0375m)$  برای دبی  $1/878$  لیتر بر ثانیه

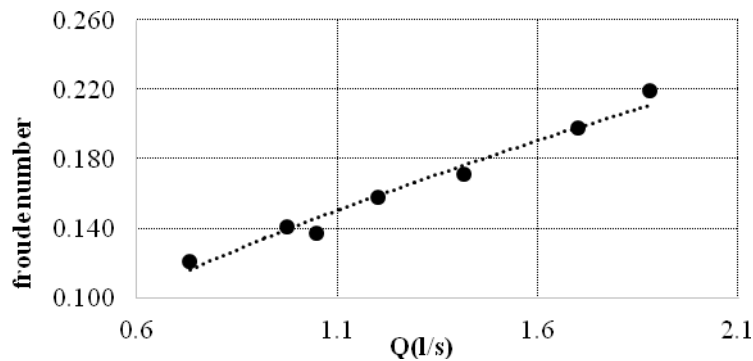
فرود با سرعت رخ می‌دهد و پس از عبور از سرریز نیز تا مقدار  $3/6$  افزایش می‌یابد و به حالت فوق بحرانی می‌رسد. همچنین نتیجه مقایسه متوسط عدد فرود برای دبی‌های مختلف در مقطع  $30$  سانتی‌متری قبل از سرریز در شکل (۱۶) نمایش داده شده که گویای این مطلب است که با افزایش دبی و افزایش سرعت، عدد فرود افزایش یافته و برای دبی‌های مختلف دارای همبستگی قابل قبولی است. همچنین زیر بحرانی بودن جریان در این شکل، کاملاً مشهود می‌باشد.

### بررسی تغییرات عدد فرود

نتایج مدل‌سازی در شکل ۱۵ نشان می‌دهد، عدد فرود از ابتدای طول کانال تا قبل از رسیدن جریان به سرریز دارای مقداری تقریباً ثابت و کمتر از یک ( $0/2$ ) می‌باشد و نشان‌دهنده جریان زیر بحرانی است، در حین عبور جریان از سرریز، این مقدار افزایش یافته است و جریان به حالت فوق بحرانی میل می‌کند. همچنین عدد فرود پس از عبور از سرریز رشد قابل توجهی داشته‌است که به دلیل رابطه ی مستقیم عدد



شکل ۱۵- بررسی تغییرات عدد فرود در نیمرخ طولی کانال



شکل ۱۶- مقادیر تغییرات متوسط عدد فرود قبل از سرریز

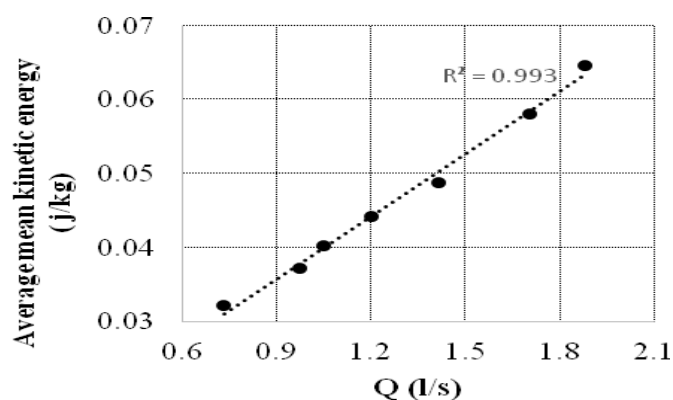
ضریب همبستگی حاصل از مقایسه مقادیر عددی و نتایج به دست آمده از رابطه ۷، برابر ۰/۹۸۷ به دست آمد که حاکی از مناسب بودن رابطه پیشنهادی جهت محاسبه انرژی جنبشی جریان عبوری از سرریز استوانه‌ای می‌باشد.

همچنین در شکل ۱۸ تغییرات متوسط انرژی اشفگی در مقایسه با دبی نشان داده شده است و مشخص است که با افزایش دو برابری دبی افزایشی بیش از دو برابر انرژی اشفگی حاصل می‌شود.

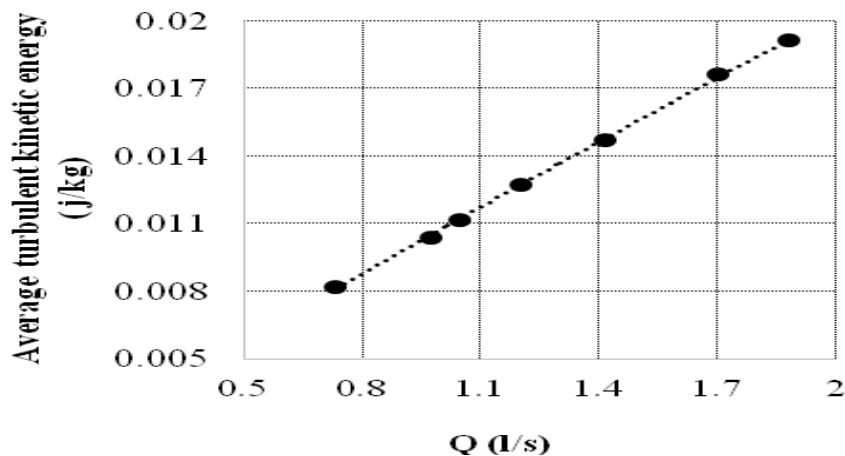
### بررسی تغییرات انرژی

تغییرات متوسط انرژی جنبشی نسبت به تغییرات دبی در شکل ۱۷ نشان داده شده است، همان طور که در شکل مشاهده می‌شود ارتباط مستقیمی با تغییرات دبی دارد و دارای همبستگی ۰/۹۹۳ تحت رابطه خطی است که با توجه به مطالعات انجام شده رابطه ۷ برای محاسبه انرژی آن پیشنهاد می‌گردد:

$$E = 0.0391Q^{0.7413} \quad (7)$$



شکل ۱۷- مقادیر تغییرات متوسط انرژی جنبشی نسبت به تغییرات دبی



شکل ۱۸- مقادیر تغییرات متوسط انرژی جنبشی آشفتگی نسبت به تغییرات دبی

سرریز می‌گردد. فشار جریان روی تاج سرریز تا ۲۳۲- پاسگال کاهش می‌یابد.

سرعت جریان در سه راستای X، Y و Z مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. بررسی سرعت متوسط جریان نیز نشان می‌دهد، سرعت متوسط جریان نیز در حین عبور از سرریز به سرعتی ۲/۵ برابر بزرگتر از سرعت اولیه می‌رسد.

عدد فرود به علت وابستگی به سرعت جریان، تا قبل از رسیدن به مقطع سرریز، مقادیر کمتر از یک دارد و جریان، زیر بحرانی است، لیکن با گذر جریان از روی سرریز، مقدار عدد فرود رشد چشمگیری داشته و جریان به صورت فوق بحرانی خواهد بود. مقدار عدد فرود در مقطع پس از سرریز تا ۳/۶ رشد خواهد داشت. تغییرات انرژی جنبشی متناسب است با تغییرات دبی جریان که با افزایش دو برابری دبی، انرژی‌های آشفتگی تا بیش از دو برابر تغییرات دارند.

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق مدل عددی Flow-3D، به منظور شبیه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی جریان از جمله تغییرات فشار، سرعت و عدد فرود و ضریب دبی در دو مدل سرریز استوانه‌ای در کانال مستطیلی مورد بررسی قرار گرفت.

از بررسی مقادیر ضریب دبی مشخص می‌شود، ضریب دبی با افزایش دبی افزایش یافته و با هم رابطه خطی برقرار نموده‌اند. همچنین مقدار ضریب دبی در سرریزهای استوانه‌ای به مقادیر بزرگتر از ۱ میل می‌کند. با افزایش ۲ برابری نسبت بی‌بعد  $H_w/R$  مقدار ضریب دبی بیش از ۲ برابر مقدار اولیه خود، افزایش می‌یابد. همچنین ضریب همبستگی ضریب دبی با دبی ۰/۹۶ به دست آمد که حاکی از وابستگی شدید پارامتر ضریب دبی به دبی جریان می‌باشد.

فشار جریان در روی سرریز، دارای مقداری منفی است که منجر به مکش جریان و چسبندگی آن به تاج

## منابع

- اسماعیلی، ک.ب. نقوی، ف. کورش و حیدوج. یزدی. ۱۳۸۹. مدل سازی آزمایشگاهی و عددی الگوی جریان در سرریزهای استوانه‌ای. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۴(۱): ۱۶۶-۱۷۹.
- اسماعیلی ورکی، م.م. صفررضوی زاده. ۱۳۹۲. بررسی مشخصات هیدرولیکی جریان بر روی سرریزهای کنگره ای با پلان نیم‌دایره ای. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۷(۱): ۲۲۴-۲۳۴.

- حسینی، خ.م.، تاج‌نسایی، ا.، جعفری‌ندوشن. ۱۳۹۴. ارزیابی اثرات هندسه سرریز پلکانی در میزان استهلاک انرژی جریان عبوری با استفاده از مدل فازی-عصبی و الگوریتم تفاضلی (DE) (مطالعه موردی: سد UTE در ایالات متحده آمریکا). نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، ۴۵(۱)، ۷۸-۹۱.
- حیدرپور، م.م.، چمنی، ا.، خرمی. ۱۳۸۴. بررسی خصوصیات هیدرولیکی سرریزهای استوانه‌ای و تاج دایره‌ای. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۲(۶).
- حیدری، م. و. احمدی محمد مهدی، و رحیم پور مجید. ۱۳۹۱. برآورد دبی جریان در مدل سرریز-دریچه مستطیلی با انقباض همگن در حالت دریچه آزاد و مستغرق. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، ۲(۸): ۶۶-۷۷.
- سوری، ا.، مسعودیان، م.، کردی، ا.، ک.، راتچر. ک. ۱۳۹۳. بررسی آزمایشگاهی تغییرات ضریب دبی و افت انرژی در سرریز-دریچه استوانه‌ای با حرکت قائم. نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، ۴۴(۴): ۶۵-۷۸.
- شاهرخی، م. ۱۳۸۷. مقایسه انواع مدل‌های توربولانس در جریانهای آشفته. چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران، اردیبهشت، ۱۳۸۷.
- عباسپور، ا.، س. هاشمی‌کیا. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی عددی جریان بر روی سرریز استوانه‌ای با در نظر گرفتن مؤلفه‌ی زبری با استفاده از شبیه K-E معیار. مجله مهندسی منابع آب، ۶: ۸۷-۹۷.
- عشرتی، ط.ر. فضل اولی، م. صناعی و ع. عمادی. ۱۳۹۴. بررسی آزمایشگاهی عملکرد هیدرولیکی سرریز اوجی و کانال پایین‌دست در شرایط قوس محوری. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۹(۴): ۸۷۴-۸۸۵.
- علاسوند، ک.ج. احدیان، ح. فتحیان. ۱۳۹۰. بررسی تاثیر زبری بر روی استهلاک انرژی و سرریزهای پلکانی گابیونی، با استفاده از مدل ریاضی FLOW-3D. فصلنامه تخصصی علوم و مهندسی آب- دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات خوزستان، ۱(۳): ۸۹-۹۷.
- علی زاده صنمی، ف.م.، مسعودیان، م.، صناعی. ۲۰۱۶. بررسی تغییرات افت انرژی جریان عبوری از سرریز-دریچه نیم استوانه‌ای با چرخش حول مرکز. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۳(۲)، ۲۹۱-۲۹۹.
- قره گزلو، م. ۱۳۹۱. بررسی آزمایشگاهی جریان همزمان از مدل ترکیبی سرریز-دریچه‌ی استوانه‌ای، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران، ۱۳۹۱.
- ورجاوند، پ.د. فرسادی زاده، پ. خسروی نیا، ز. رفیعی. ز. ۱۳۸۵. شبیه سازی جریان در سرریزهای استوانه‌ای با استفاده از مدل Fluent و مقایسه نتایج با مدل فیزیکی. مجله دانش آب و خاک، ۱۱(۲): ۵۹-۶۹.
- هنر، ت.، ص. مظلوم شهرکی. ۱۳۹۳. تحلیل ضریب دبی سرریزهای جانبی استوانه‌ای و نیم‌استوانه‌ای در جریان‌های زیر بحرانی. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، ۱۸(۶۹): ۱۴۱-۱۴۹.
- AbdulGabbar, E. 2011. Overflow characteristic of cylindrical shape crest weirs over horizontal bed. *Tikrit Journal of Engineering Science (TJES)*, 18(4): 29-39.
- Al Babely, E. A. G. 2012. Behavior of the discharge coefficient for the overflow characteristics of oblique circular weirs. *Tikrit Journal of Engineering Science (TJES)*, 19(4): 54-63.
- Bos, M. G., & Nugteren, J. 1978. *On irrigation efficiencies*. International Institute for Land Reclamation and Improvement.
- Chanson, H., & Montes, J. S. 1998. Overflow characteristics of circular weirs: Effects of inflow conditions. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 124(3): 152-162.
- Dabling, M. amd Tullis, B. 2012. Piano Key Weir Submergence in Channel Applications. *J. Hydraul. Eng.*, 10.1061/ (ASCE) HY.1943-7900.0000563, 661-666.
- Dimitris, S., & Panayotis, P. 2010. Macroscopic turbulence models and their application in turbulent vegetated flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(3): 315-332
- Farzin, S., Karami, H., Zamiri, E., Nayyer, Sh. 2016. Three-dimensional modelling of flow over the cylindrical weir using Flow-3D software. 10<sup>th</sup> International River Engineering Conference, Shahid Chamran University, Ahwaz.



FLOW-3D® user manual, Ver. 10.0.1.

Heidarpour, M., & Chamani, M. R. 2006. Velocity distribution over cylindrical weirs. *Journal of Hydraulic Research*, 44(5): 708-711.

Hirt, C. W., & Chen, K. S. 1996. Simulation of slide-coating flows using a fixed grid and a volume-of-fluid front-tracking technique: Startup and bead breakup (No. SAND--96-0443C; CONF-960225--1). Sandia National Labs. Albuquerque, NM (United States).

Hirt, C. W., & Nichols, B. D. 1981. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of computational physics*, 39(1): 201-225.

Hirt, C. W., & Richardson, J. E. 1999. The modeling of shallow flows. *Flow Sci. Tech. Notes*, 48: 1-14.

Kabiri-Samani, A., & Bagheri, S. 2014. Discharge Coefficient of Circular-Crested Weirs Based on a Combination of Flow around a Cylinder and Circulation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 140(5) 04014010.

Kim, D. G. (2016). Analysis of Overflow Characteristics around a Circular-Crested Weir by Using Numerical Model. *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, 30(2), 147-154.

Legates, D. R., & McCabe, G. J. 1999. Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water resources research*, 35(1), 233-241.

Naghavi, B., Esmaili, K., Yazdi, J., & Vahid, F. K. 2011. An experimental and numerical study on hydraulic characteristics and theoretical equations of circular weirs. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 38(12): 1327-1334.

Ramamurthy, A. S., & Vo, N. D. 1993. Characteristics of circular-crested weir. *Journal of hydraulic engineering*, 119(9): 1055-1062.

Samadi, A., Nejati, S., Azizi, S. H., & Bakhshayesh, B. O. 2014. Three dimensional simulation of flow for semi cylindrical weirs using fluent software. *J Civil Eng Urban*, 4(4): 397-401.

Sabbagh-Yazdi, S. R., Rostami, F., & Mastorakis, N. E. (2007, December). Turbulent modeling effects on finite volume solution of three dimensional aerated hydraulic jumps using volume of fluid. In *Proceedings of the 12<sup>th</sup> WSEAS International Conference on Applied Mathematics*. Stevens Point, Wisconsin, USA. Pp (pp. 168-174).

Yin, B., Yu, S., Jia, H., & Yu, J. 2016. Numerical research of diesel spray and atomization coupled cavitation by Large Eddy Simulation (LES) under high injection pressure. *International Journal of Heat and Fluid Flow*: 59, 1-9.

## Numerical Analysis of Flow Parameters over the Cylindrical Weir Using Flow3D Model

Hojat. Karami<sup>1</sup>, Saeed. Farzin<sup>2\*</sup>, Elham. Zamiri<sup>3</sup>, Shahab Nayyer<sup>4</sup>

### Abstract

Cylindrical weir is one of the most common structures for measuring flow rate in open channels. Cylindrical weir is one type of broad-crested weirs that has extensive application due to its stable flow pattern and ease of passing suspended solids. Therefore, in this article, flow over a 7.5 cm diameter cylindrical weir in the rectangular channel was simulated using k- $\epsilon$  turbulence model in three-dimensional flow3D model. Validation was performed with experimental results. The obtained root mean square error of comparison between numerical discharge coefficient and physical values was 0.3427, which represents a good agreement of hydraulic characteristics obtained from numerical and physical models. It was also observed that discharge coefficient value of cylindrical weir was greater than 1.0. Dimensionless ratio of hydraulic head to crest radius was an effective parameter on discharge coefficient, such that its 100% increase enhances discharge coefficient more than 100%. In the numerical model of cylindrical weir, such parameters as velocity, pressure, flow depth and kinetic energy and turbulence were analyzed and compared in some sections of the channel with respect to the weir. Results showed that depth and pressure in the upstream have larger amounts than in the downstream. But, results of velocity were opposite the pressure and hydraulic head. Finally, a relationship was provided for determination of kinetic energy of the flow over the cylindrical weir.

**Keywords:** Cylindrical weir, Discharge coefficient, Numerical modeling, Hydraulic characteristics, Flow-3D.

<sup>1</sup> Assistant professor, Department of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

<sup>2\*</sup> Assistant professor, Department of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran. ([saeed.farzin@semnan.ac.ir](mailto:saeed.farzin@semnan.ac.ir))

<sup>3</sup> M.S. student, Department of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

<sup>4</sup> M.S. student, Department of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.