

مقدمه

به طور کلی به منظور کنترل سیلاب و اندازه‌گیری جریان عبوری از رودخانه‌ها و کانال‌های روباز از سازه‌های هیدرولیکی نظیر سرریزها استفاده می‌شود که از سازه‌های مورد علاقه مهندسين سازه‌های هیدرولیکی از قرن پیش می‌باشد [۲]. پیشنهاد سرریز استوانه‌ای به قبل از ساخت سرریز اوجی و اواخر قرن ۱۹ بازمی‌گردد [۱۵]. در جهان امروز، بهینه‌سازی پارامترهای مختلف باهدف کاهش هزینه‌ها مورد اهمیت است. از این رو استفاده از سازه‌های با ضریب دبی بالاتر و هزینه ساخت کمتر نظیر سرریزهای استوانه‌ای و نیم‌رسانا در کانال‌ها مناسب‌تر می‌باشد. از مزایای این نوع سرریزها می‌توان به کاربرد آن‌ها در آبیاری زمین‌های کشاورزی، ذخیره آب در بالادست، شبکه‌های توزیع آب اشاره نمود [۱۹،۴].

سه بعدی بودن جریان عبوری از سرریزها و پیچیدگی توربولانس موجب گشته تا مطالعه جریان عبوری از سرریزها کار ساده‌ای نباشد [۱۹]. لیکن علی‌رغم پیچیده بودن مطالعه این مبحث، تحقیقات مختلفی پیرامون سرریز استوانه‌ای انجام گرفته است که از میان آن می‌توان به مطالعه رامامورثی و همکاران [۱۷] اشاره نمود که تأثیر شیب بالادست و پایین‌دست بر سرعت جریان و ضریب دبی را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند، افزایش شیب بالادست بر میزان ضریب دبی تأثیر نداشته، لیکن افزایش شیب پایین‌دست موجب افزایش ضریب دبی گشته است. حیدر پور و چمنی [۱۱] توانستند روشی برای پیش‌بینی سرعت جریان عبوری از سرریز استوانه‌ای بیابند. مقایسه نتایج حاصل از این روش با مقادیر آزمایشگاهی، دلالت بر دقت بالای این روش دارد. در ادامه نیز معادله‌ای برای تخمین ضریب دبی با حداکثر خطای $\pm 5\%$ درصد به دست آوردند.

وطن‌خواه [۲۳] تلاش نمود تا روابطی به نسبت ساده‌تر از روابط حاضر برای ضریب دبی به دست آورد تا روند محاسبات این پارامتر پرکاربرد آسان‌تر گردد. این تحقیق با کمک ۱۴۸ آزمایش، به نتیجه رسید و نتایج روابط به دست آمده با مقادیر آزمایشگاهی تطابق بالایی داشت. نقوی و همکاران [۱۴] توزیع سرعت و فشار جریان در سرریز استوانه‌ای را مورد بحث قرار دادند و توانستند روابطی برای عمق بحرانی و محل جدایش جریان از سرریز بیابند و دریافتند عمق بحرانی به قطر سرریز و عمق آب پایین‌دست وابسته می‌باشد. همچنین ضریب دبی را نیز در موقعیت‌های مختلف به دست آوردند، نتایج بررسی نشان داد، ضریب دبی این نوع سرریز به مقداری بالاتر از یک میل می‌کند. اشموکر و همکاران [۲۰] تأثیر شیب بالادست

معرفی سرریز استوانه‌ای مورب به عنوان رویکردی مؤثر در افزایش ضریب تخلیه جریان

سعید فرزین^۱، حجت کریمی^۱، شهاب تیرآ و الهام ضمیری^۲
تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۴/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۹/۱

چکیده

سرریز استوانه‌ای یکی از انواع سازه‌های هیدرولیکی است که کنترل و اندازه‌گیری جریان را امکان‌پذیر می‌کند. در این تحقیق مدل‌سازی سرریز استوانه‌ای پس از صحت‌سنجی با مدل معتبر، با سه قطر مختلف (۱۱، ۹ و ۶/۳۵ سانتی‌متر) و سه زاویه جهت‌گیری استوانه نسبت به دیواره کانال (۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه) با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D مورد بررسی قرار گرفت. طبق نتایج به دست آمده از مدل‌سازی، مقادیر حاصل از مدل آشفتگی k-ε نسبت به دو مدل RNG و LES تطابق بهتری با نتایج آزمایشگاهی داشته و ضریب همبستگی ۰٫۹۶۴۹ مناسب بودن مدل k-ε را تأیید کرد. با تغییر وضعیت قرارگیری سرریز از حالت قائم به صورت مورب، ضریب دبی افزایش خواهد داشت که به دلیل افزایش طول سرریز در حالت قرارگیری مایل هست. نتایج نشان‌دهنده آن است مدل‌هایی که زوایای جهت‌گیری (θ) مکمل دارند، ضرایب دبی تقریباً برابر با یکدیگر خواهند داشت. با افزایش قطر سرریز از ۶/۳۵ به ۱۱ سانتی‌متر، ضریب دبی به ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. همچنین اثر افزایش دبی جریان بر مقدار ضریب دبی، مورد بررسی قرار گرفت. حداکثر ضریب همبستگی میان دبی و ضریب دبی، برای استوانه با قطر ۱۱ سانتی‌متر حاصل شده است که مقدار آن تقریباً ۰/۹۵ به دست آمد و بیانگر تأثیرگذاری دبی بر ضریب دبی می‌باشد.

کلید واژه‌ها: سرریز استوانه‌ای، سرریز مورب، مدل عددی، دبی جریان، قطر سرریز، Flow-3D.

۱. استادیار، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه سمنان. پست الکترونیک: saeed.farzin@semnan.ac.ir

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

از جمله آشفتگی، محیط‌های متخلخل، آبشستگی و ... است. این نرم‌افزار قابلیت تحلیل دوبعدی یا سه‌بعدی میدان جریان را به صورت حجم دارا می‌باشد و از المان‌های سه‌بعدی متعامد استفاده می‌کند و در ایجاد مانع در برابر جریان قابلیت‌های ویژه‌ای دارد. امتیاز این مدل استفاده از شبکه‌بندی مستطیلی و روش حجم محدود است. این نرم‌افزار از دو روش عددی VOF و FAVOR^۲ برای شبیه‌سازی هندسی بهره می‌گیرد [۷].

معادلات حاکم بر جریان

برای محاسبه دبی جریان عبوری در کانال، روابط متعددی بسته به شکل، نوع و مشخصات هندسی سرریز به کار برده می‌شود. دبی جریان و ضریب دبی جریان عبوری از کانال با سرریز مستطیلی را می‌توان از روابط (۱) و (۲) به دست آورد.

$$q_w = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2gh^3} \quad (1)$$

$$C_d = 0.602 + 0.083 \frac{h}{p} \quad (2)$$

در روابط فوق q_w ، دبی جریان در واحد عرض کانال می‌باشد h (m³/s/m)، ضریب دبی جریان عبوری از سرریز مستطیلی، عمق آب بالادست سرریز (m)، p ارتفاع سرریز مستطیلی (m) و g شتاب گرانش زمین (m/s²) می‌باشد [۲۲].

از آنجاکه سرریز استوانه‌ای از نظر عملکرد مانند سرریزهای لبه‌پهن عمل می‌کنند، می‌توان از رابطه باس ۱۹۸۷، رابطه (۳)، بهره برد [۳].

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

در رابطه (۳)، C_d ضریب دبی جریان، g شتاب ثقل (m/s²)، q دبی عبوری از واحد عرض سرریز (m³/s/m) و H_1 ارتفاع تراز آب در بالادست می‌باشد [۱]. جانسون و مونتس [۴] روابط زیر را برای محاسبه ضریب دبی سرریز استوانه‌ای پیشنهاد نمودند.

$$C_d = 1.185 \left(\frac{H_1}{R} \right)^{0.136} \quad (4)$$

$$C_d = 1.1268 \left(\frac{H_1}{R} \right)^{0.181} \quad (5)$$

در روابط (۴) و (۵)، H_1 هد کل بالادست (m) و R شعاع سرریز استوانه‌ای است. در روابط (۴) و (۵)، به ترتیب $0.45 < H_1/R < 1.9$ و $0.35 < H_1/R < 3.5$ می‌باشد.

معرفی مدل‌های آشفتگی

مطالعه ویژگی‌های جریان آشفتنه، بسیار پیچیده و زمان‌بر است، چراکه در جریان آشفتنه جریان‌هایی با مقادیر مختلف اندازه حرکت به هم برخورد کرده و موجب کاهش انرژی جنبشی سیال می‌گردد

و پایین‌دست را بر ضریب دبی مورد بحث قرار دادند و به نتایجی مشابه رامامورثی [۱۷] دست یافتند، در ادامه روابطی برای ضریب دبی به صورت تابعی از شیب بالادست و پایین‌دست به دست آوردند. صمدی و همکاران [۱۹] مطالعه عددی سرریز نیم‌استوانه‌ای را با کمک مدل VOF^۱ و برای سه شعاع مختلف نیم‌استوانه انجام دادند و از مدل آشفتگی K-ε بهره بردند. در ادامه این مدل‌سازی سه‌بعدی دریافتند این مدل تطابق خوبی با نتایج فیزیکی دارد.

نادری و همکاران [۱۳] به بررسی ضریب دبی جریان در سرریز استوانه‌ای با در نظر گرفتن دیواره‌های مستطیلی و انحنا در کانال حامل جریان پرداختند، نتایج این بررسی نشان داد وجود هر دو نوع دیواره مستطیلی و دایره‌ای بر پارامترهای بی‌بعد عمق آب بالادست و قطر سرریز تأثیرگذارند. همچنین مشخص گردید ضریب دبی در مدل با دیواره دایره‌ای مقدار بیشتری نسبت به مدل سرریز با دیوار مستطیلی دارد که این امر را می‌توان به کم بودن اتلاف انرژی و تطابق بهتر الگوی جریان با دیواره‌ها در مدل با دیواره دایره‌ای نسبت داد.

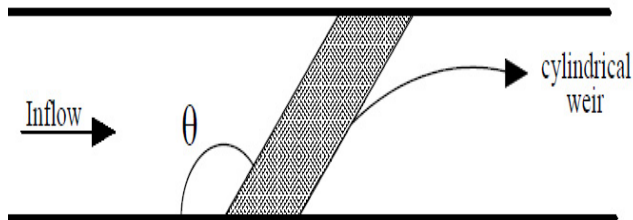
کبیری و باقری [۱۲] در تحقیق خود، روابطی جهت دستیابی به ضریب دبی و سرعت جریان در سرریز استوانه‌ای ابداع کردند که می‌تواند ضریب دبی را برای نسبت هد کل بالادست به شعاع استوانه کمتر از ۷ با حداکثر خطای ۵ درصد پیش‌بینی نماید. همچنین پارامتر H_1/R (نسبت بی‌بعد هد بالادست به شعاع استوانه) را به عنوان مؤثرترین عامل در تعیین مشخصات هیدرولیکی جریان معرفی نمودند.

مطالعات انجام‌شده بر روی سرریز استوانه‌ای و مشخصات جریان عبوری از آن نشان می‌دهد، افزایش ضریب دبی از اهداف مهم بسیاری از تحقیقات انجام‌شده بر موضوع سرریز می‌باشد. جهت دستیابی به این مهم، افزایش زاویه قرارگیری سرریز با دیواره کانال که موجب افزایش طول سرریز می‌گردد، توصیه شده است. هدف از پژوهش حاضر، مطالعه و تحلیل روند تغییرات ضریب دبی با تغییر زاویه قرارگیری سرریز استوانه‌ای با استفاده از مدل عددی Flow-3D می‌باشد. در این راستا با توجه به انتخاب مش بهینه، تأثیر سه مدل آشفتگی K-ε، K-ε RNG و LES بر افزایش دقت نتایج آزموده می‌شود. در ادامه، میزان تأثیر پارامترهای قطر سرریز، زاویه قرارگیری سرریز با دیواره کانال، هد بالادست و دبی جریان بر مقدار ضریب دبی سرریز استوانه‌ای مورب نیز مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

معرفی مدل Flow 3D

مدل Flow-3D یکی از مدل‌های بسیار قوی در زمینه دینامیک سیالات است که توسعه و پشتیبانی آن توسط Flow science, Inc صورت گرفته است. این مدل شامل الگوهای فیزیکی بسیاری



شکل ۲- نحوه قرارگیری سرریز در پلان
Fig 2. Spillway in plain view.

در تحقیق حاضر از نتایج مدل آزمایشگاهی عماد عبدالقادر البابلی [۱] به منظور مدل‌سازی سرریز استوانه‌ای، در حالت زاویه‌دار با دیواره کانال و بدون زاویه استفاده گردید. مدل آزمایشگاهی مورد استفاده از کانالی به طول ۴m، عرض ۲۰cm و ارتفاع ۲۵cm تشکیل گردیده است. مرکز سرریز استوانه‌ای در ۲ متری کانال واقع شده و برای اندازه‌گیری دبی جریان از یک سرریز مستطیلی در انتهای کانال بهره برده شده است. جهت اندازه‌گیری ارتفاع آب در کانال نیز از Point gage استفاده شده است. در مدل آزمایشگاهی، به منظور جهت‌گیری سرریز با دیواره، از سه زاویه ۳۰، ۴۵ و ۹۰ درجه استفاده شده است. برای مدل‌سازی با استفاده از استوانه‌های با سه قطر مختلف ۱۱، ۹ و ۶/۳۵ سانتی‌متر و تحت سه زاویه ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه که سرریز با دیواره کانال تشکیل می‌دهد (مجموعاً ۶۰ تست)، با ۵ دبی ورودی (۳/۵-۱/۵ لیتر بر ثانیه) انجام شده است. مدل شماتیک سرریز و نحوه قرارگیری آن در پلان در شکل‌های (۱) و (۲) نمایش داده شده است.

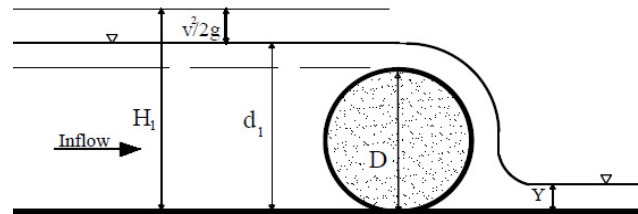
مدل سرریز استوانه‌ای در تحقیق حاضر با دو مدل مش با تعداد سلول‌های ۱۹۹۵۰۰، ۳۱۹۲۰۰ با استفاده از سه معیار میانگین مطلق خطا (MAE^۱)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE^۲) و ضریب همبستگی (R^۲) مورد ارزیابی قرار گرفت که به صورت روابط (۷)، (۸) و (۹) تعریف شده است.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum |y_i^* - y_i| \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i^* - y_i)^2} \quad (8)$$

$$R^2 = \frac{Cov(y_i^*, y_i)}{\sigma_{y_i^*} \sigma_{y_i}} \quad (9)$$

در روابط (۷) و (۸) منظور از y_i^* ، y_i و n به ترتیب مقادیر به‌دست‌آمده در مدل عددی، مقادیر آزمایشگاهی و تعداد کل داده‌ها



شکل ۱- نمای شماتیک سرریز استوانه‌ای
Fig 1. Schematic model of cylindrical spillway.

و این انرژی تلف‌شده در یک فرآیند یک‌طرفه به حرارت تبدیل می‌شود. کلیه موارد فوق بایستی در بررسی جریان آشفته مدنظر قرار گیرند. لذا مدل‌های عددی قادرند اطلاعات ارزشمندی را برای حل مسائل آشفته‌گی ارائه نمایند.

مدل آشفته‌گی K-ε

معادله K-ε شامل دو معادله انتقال برای انرژی جنبشی آشفته‌گی و اتلاف آن است که K معرف انرژی جنبشی آشفته‌گی و ϵ (m²/s³) کمیت اتلاف آشفته‌گی می‌باشد. معادله انتقال برای اتلاف آشفته‌گی، ϵ_T مطابق رابطه (۶) تعریف می‌شود:

$$\frac{\partial \epsilon_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial \epsilon_T}{\partial x} + v A_y \frac{\partial \epsilon_T}{\partial y} + w A_z \frac{\partial \epsilon_T}{\partial z} \right) = \frac{CDIS1 \cdot \epsilon_T}{K_T} P_T + CDIS3 \cdot G_T + Diff_{\epsilon} - CDIS2 \frac{\epsilon_T^2}{K_T} \quad (6)$$

در رابطه (۶)، CDIS1، CDIS2، CDIS3 پارامترهای بی‌بعدی هستند که مقادیرشان برای مدل K-ε به ترتیب دارای مقادیر پیش‌فرض ۱/۴۴، ۱/۹۲، ۰/۲ هستند [۱۱، ۵].

مدل آشفته‌گی RNG

مدل آشفته‌گی RNG، قادر است ضرایبی که در مدل K-ε به صورت تجربی استخراج شده‌اند را به طور صریح بیان کند. این مدل در جریان‌های با نواحی برشی قوی و شدت آشفته‌گی کم، نتایج دقیق‌تری را تولید می‌کند. مدل آشفته‌گی RNG برای استخراج معادلات متوسط گیری شده برای کمیت‌های آشفته‌گی مانند انرژی جنبشی آشفته‌گی، از روش‌های آماری بهره می‌برد و مقدار پارامترهای CDIS1 و CDIS2 در این مدل، به ترتیب ۱/۴۲ و ۱/۶۸ می‌باشد [۱۸].

مدل آشفته‌گی LES

این مدل آشفته‌گی 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 آشفته‌گی RNG، نتایج با جزئیات بیشتری را ارائه می‌دهد [۲۴].

مدل‌سازی سرریز استوانه‌ای

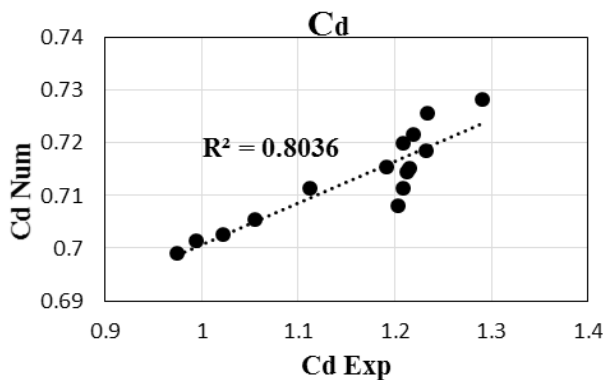
1. Mean Absolute Error
2. Root Mean Square Error

حل مسائل با سرعت بالاتری بوده و موجب صرفه‌جویی در هزینه و زمان می‌گردد.

جدول ۲- نتایج مربوط به مدل آشفتگی
Table 2. Results of turbulence models

R ²	MAE	RMSE	مدل‌های آشفتگی Turbulence models
0.7893	0.0989	0.0997	RNG
0.9090	0.0874	0.0886	LES
0.9649	0.0479	0.0533	k-ε

بعد از بررسی مش بهینه و انتخاب مدل آشفتگی مناسب، ضریب دبی حاصل از محاسبات عددی با ضریب دبی آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت و همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود دارای ضریب همبستگی قابل قبول می‌باشد که نشان از تطابق مطلوب نتایج عددی و آزمایشگاهی دارد.



شکل ۴- رابطه ضریب دبی آزمایشگاهی و عددی

Fig 4. Relationship between experimental and numerical discharge coefficient

نتایج و بحث

در مطالعه آزمایشگاهی انجام‌شده توسط البابلی [۱] به مطالعه ضریب دبی جریان از سرریز استوانه‌ای پرداخته شده است. در تحقیق حاضر نیز تغییرات ضریب دبی و عوامل مؤثر بر آن و میزان تأثیر هر عامل با استفاده از نتایج مدل عددی مورد بررسی قرار گرفت. میزان اثر قطر استوانه و جهت قرارگیری سرریز در پلان بر مقدار ضریب دبی متوسط در شکل‌های (۵) و (۶) (تحت سه زاویه ۹۰، ۴۵ و ۱۳۵ که استوانه با دیواره کانال می‌سازد) نشان داده شده است. نتایج نشانگر آن است که با کاهش قطر سرریز از ۱۱ سانتی‌متر به ۶/۳۵ سانتی‌متر (افزایش ۷۰ درصدی قطر استوانه)، ضریب دبی حدود ۱۰۰ درصد، رشد خواهد داشت، درحالی‌که کاهش قطر سرریز از ۱۱ سانتی‌متر به ۹ سانتی‌متر، حدود ۳۴ درصد افزایش ضریب دبی را در پی دارد. همچنین تغییر قطر استوانه از ۹ سانتی‌متر به ۶/۳۵ سانتی‌متر،

می‌باشند. در رابطه (۹) نیز $Cov(y_i^*, y_i)$ و σ_{y_i} و $\sigma_{y_i}^*$ به ترتیب کوواریانس مقادیر مدل عددی و آزمایشگاهی و انحراف معیارهای آن‌ها می‌باشد.

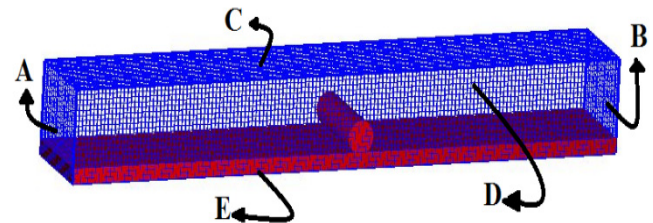
نتایج حاصل از این بررسی نشان می‌دهد با افزایش تعداد مش‌ها به ۳۱۹۲۰۰ عدد، شاخص MAE حاصل از مدل‌سازی مربوط به پارامتر H_1/D به ۰/۰۴۷۸ و ضریب همبستگی به ۰/۹۶۴۹ می‌رسد که سبب بهبود نتایج می‌گردد. نتایج مربوط به مش بهینه برای نسبت H_1/D در جدول ۱، نشان‌دهنده تطابق بالای نتایج مدل فیزیکی با نتایج مدل عددی با تعداد ۳۱۹۲۰۰ سلول است.

جدول ۱- نتایج مربوط به مش بهینه

Table 1. Results of optimized mesh

R ²	MAE	RMSE	تعداد مش Number of mesh
0.7595	0.0592	0.0598	199500
0.9649	0.0479	0.0533	319200

به‌منظور مدل‌سازی سرریز مورد نظر، شرایط مرزی در سطح A به‌صورت دبی ورودی تعیین شد و مقادیر دبی بر روی این مرز تعریف گردید. همچنین برای سطح B، حالت جریان خروجی در نظر گرفته شد تا جریان هنگام رسیدن به این مرز بدون تأثیر از مرز عبور کند. شرایط مرزی در سطح C به فرم سطح آزاد سیال تعیین شد تا شرایط مشابه مشخصات اتمسفر باشد. سطوح D و E نیز به‌صورت دیواره تعریف شده‌اند. در شکل (۳) شرایط مرزی و مش‌بندی مدل مشخص شده است.



شکل ۳- تعریف شرایط مرزی در مدل مورد نظر

Fig 3. Boundary conditions of channel

مدل‌سازی سرریز مورد نظر با کمک سه مدل آشفتگی k-ε، RNG و LES انجام شد. نتایج حاصل از تفاوت سه مدل آشفتگی به کار گرفته شده در این تحقیق در جدول ۲ برای پارامتر بی‌بعد H_1/D نشان داده شده است. طبق نتایج به‌دست آمده، مدل k-ε با ضریب همبستگی ۰/۹۶۴۹ بهترین انطباق با مقادیر فیزیکی را نسبت به دو مدل دیگر داشته که صمدی و همکاران [۱۹] و فرزین و همکاران [۶] نیز در مدل‌سازی مشابه، مدل آشفتگی k-ε را مدلی مناسب برای کار روی سرریز استوانه‌ای تعیین نمودند. به‌علاوه مدل آشفتگی k-ε، در مقایسه با دو مدل دیگر، قادر به

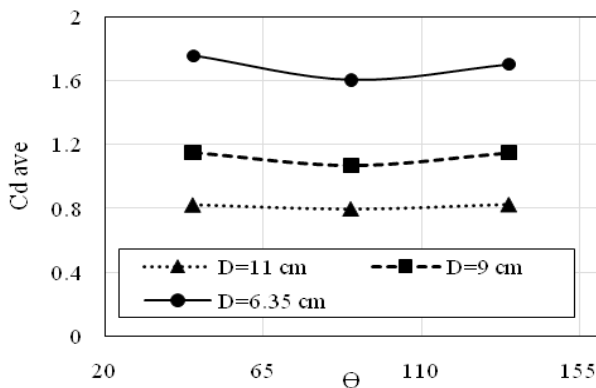
موجب رشد ۵۰ درصدی ضریب دبی می‌گردد.

مقادیر ضریب دبی، در حالت‌هایی که زاویه استوانه با دیواره مکمل یکدیگر است (۴۵ و ۱۳۵ درجه) با یکدیگر تقریباً برابر بوده که این امر را می‌توان به شباهت الگوی جریان برای زوایای مکمل نسبت داد. با تغییر زاویه جهت‌گیری از حالت قائم به حالت‌های ۴۵ و ۱۳۵ درجه، افزایش ضریب دبی حدود ۷ درصد خواهد بود که این افزایش ضریب دبی را می‌توان به افزایش طول سرریز در حالت مایل نسبت داد که سؤ و همکاران [۲۱] نیز به اهمیت افزایش طول سرریز در روند رشد ضریب دبی اشاره نموده‌اند. همچنین ضریب دبی سرریز استوانه‌ای به مقادیر بالاتر از یک تمایل می‌یابد که با نتایج نقوی و همکاران [۱۴] هماهنگی دارد.

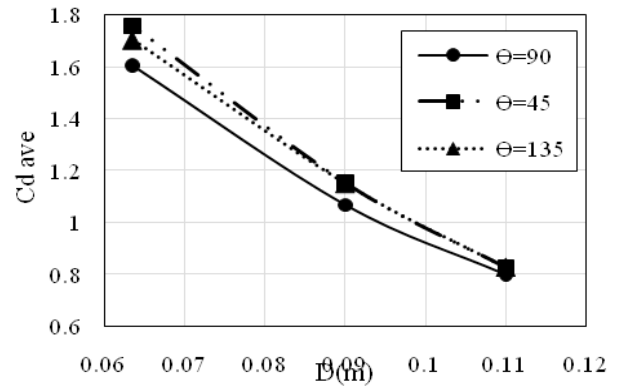
میزان اثر قطر استوانه بر ضریب دبی تحت زوایای قرارگیری به تفصیل در شکل‌های (۷)، (۸) و (۹) مشخص شده‌است. بر اساس نتایج به دست آمده می‌توان گفت که ضریب دبی برای زاویه ۹۰ درجه، با کاهش قطر از ۱۱ به ۶/۳۵ سانتی‌متر، مقداری، ۲ برابر مقدار

اولیه خواهد داشت، همین کاهش قطر برای زوایای ۴۵ و ۱۳۵ درجه به ترتیب، ۲/۱۴ و ۲/۱۵۵ برابر، افزایش ضریب دبی را در پیش خواهد داشت. در ادامه، میزان تأثیر افزایش بی‌بعد هد بالادست، بر مقدار ضریب دبی مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد در حالت جهت‌گیری استوانه با زاویه قائم، افزایش ۱۱ درصدی پارامتر بی‌بعد H_1/D ، ضریب دبی افزایش ۳۶ درصدی خواهد داشت. در صورتی که استوانه زاویه ۴۵ درجه با دیواره کانال تشکیل دهد، رشد ۱۳ درصدی پارامتر بی‌بعد هد بالادست، موجب افزایش ۳۳ درصدی ضریب دبی خواهد شد که رشد ضریب دبی در حالت با زاویه ۱۳۵ درجه نیز به همین صورت خواهد بود.

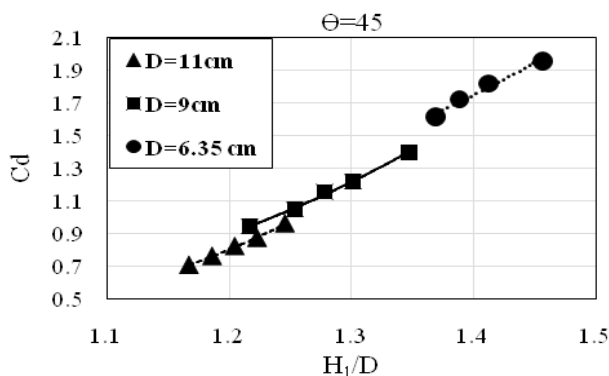
بایستی اضافه نمود که با افزایش مقادیر تقریباً برابر پارامتر بی‌بعد هد بالادست در قطرهای مختلف، سرریز با قطر ۹ سانتی‌متر، حساسیت بالاتری نسبت به ضریب دبی داشته و ضریب دبی آن بالاتر از ۴۵ درصد رشد می‌کند، در حالی که سایر مدل‌ها حداکثر ۳۵ درصد افزایش دبی خواهند داشت. نکته‌ای که حائز اهمیت است



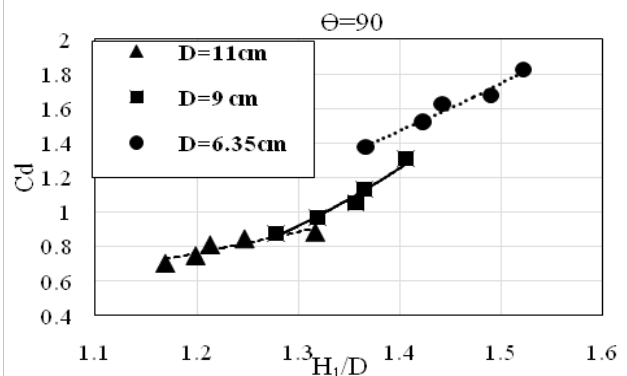
شکل ۶- رابطه ضریب دبی متوسط با زاویه قرارگیری سرریز
Fig 6. Relationship between average discharge coefficient and angle of weir



شکل ۵- رابطه ضریب دبی متوسط با قطر سرریز
Fig 5. Relationship between average discharge coefficient and diameter



شکل ۸- رابطه H_1/D با ضریب دبی ($\theta=45^\circ$)
Fig 8. Relationship between discharge coefficient and H_1/D for $\theta=45^\circ$



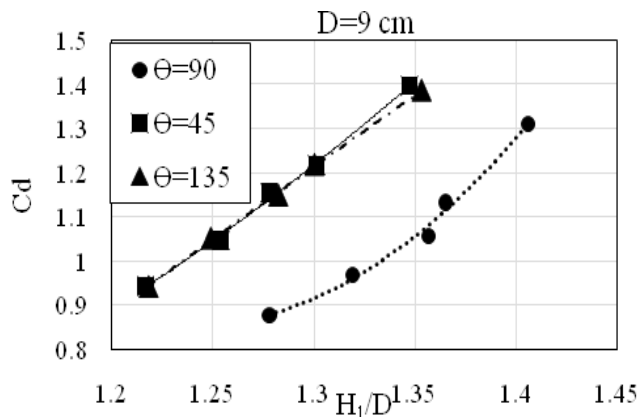
شکل ۷- رابطه H_1/D با ضریب دبی ($\theta=90^\circ$)
Fig 7. Relationship between discharge coefficient and H_1/D for $\theta=90^\circ$

خواهد داشت، درحالی که بیشترین ضریب دبی برای قطرهای ۱۱ و ۹ سانتی متر، حدود ۰/۹۶ و ۱/۴ به دست آمده است. همچنین برابری مقدار ضریب دبی برای جهت گیری سرریز با زوایای مکمل در این نمودارها مشهود می باشد.

در شکل های (۱۳)، (۱۴) و (۱۵) مقادیر ضریب دبی نسبت به زاویه قرارگیری سرریز تحت قطرهای مختلف ارائه شده است. با توجه به شکل های (۱۳)، (۱۴) و (۱۵) افزایش مقدار دبی، تأثیر مستقیم بر مقدار ضریب دبی داشته و در همه قطرهای استوانه و کلیه زوایای جهت گیری سرریز، این روند رشد، ادامه خواهد داشت. برای سرریز با قطر ۱۱ سانتی متر افزایش ۵۰ درصدی دبی جریان، موجب رشد ۳۲ درصدی ضریب دبی خواهد شد، لیکن در سرریز با

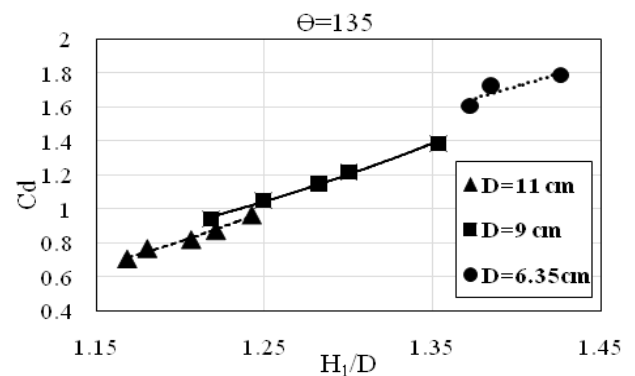
آن است که قطر سرریز تأثیر بیشتری نسبت به طول سرریز (زاویه قرارگیری سرریز) بر مقدار ضریب دبی دارد که نتایج شکل های (۷)، (۸) و (۹) نیز بر همین مطلب اشاره دارد و مشخص گردیده است که افزایش ۵۰ درصدی θ بر زاویه قرارگیری سرریز، تنها اندکی (حدود ۷ درصد)، ضریب دبی را می افزاید. حال آنکه کاهش ۷۰ درصدی قطر استوانه، ضریب دبی را بیش از ۱۰۰ افزایش می دهد.

در شکل های (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) پارامتر ضریب دبی نسبت به H_1/D به ترتیب تحت قطرهای ۱۱، ۹ و ۶/۳۵ سانتی متر نشان داده شده است. از مقایسه سه نمودار (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) مشخص می گردد که کاهش قطر سرریز، تأثیر مستقیم بر مقدار ضریب دبی داشته و استوانه با کمترین قطر، ضریب دبی با مقدار نزدیک به ۱/۹



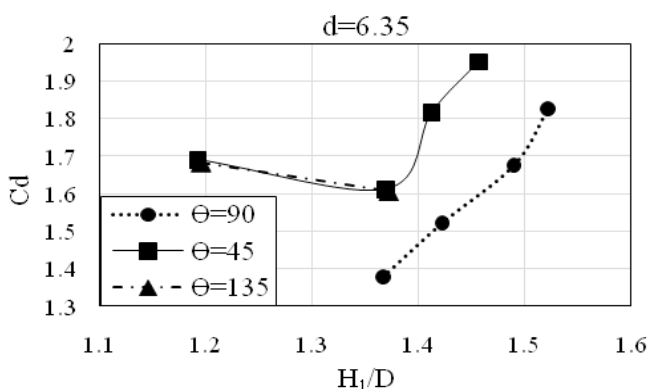
شکل ۱۱- رابطه H_1/D با ضریب دبی (D=9cm)

Fig 11. Relationship between discharge coefficient and H_1/D for D=9 cm



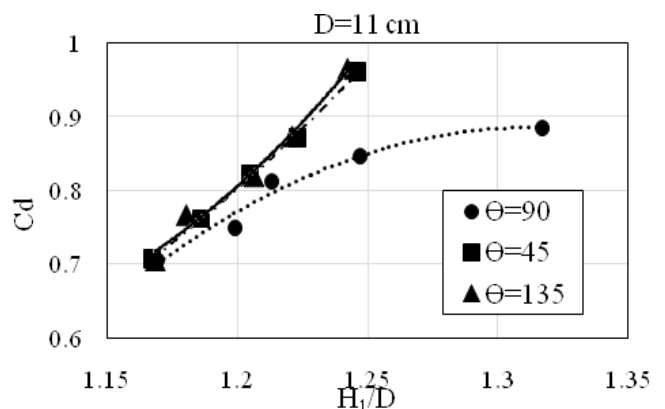
شکل ۹- رابطه H_1/D با ضریب دبی ($\theta=135^\circ$)

Fig 9. Relationship between discharge coefficient and H_1/D for $\theta=135^\circ$



شکل ۱۲- رابطه H_1/D با ضریب دبی (D=6/35cm)

Fig 12. Relationship between discharge coefficient and H_1/D for D=6.35 cm

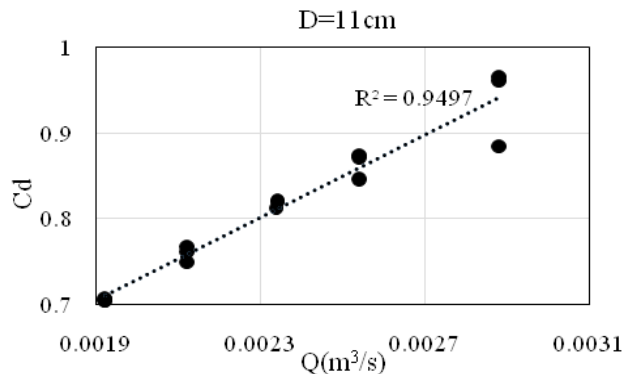


شکل ۱۰- رابطه H_1/D با ضریب دبی (D=11 cm)

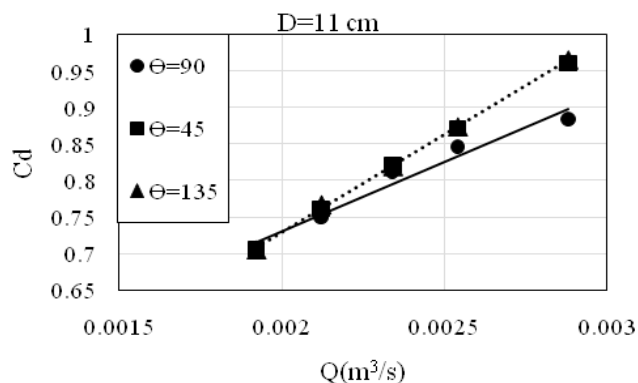
Fig 10. Relationship between discharge coefficient and H_1/D for D=11 cm

با قطر ۱۱ سانتی‌متر، حاکی از وابستگی شدید ضریب دبی به دبی جریان در این قطر می‌باشد.

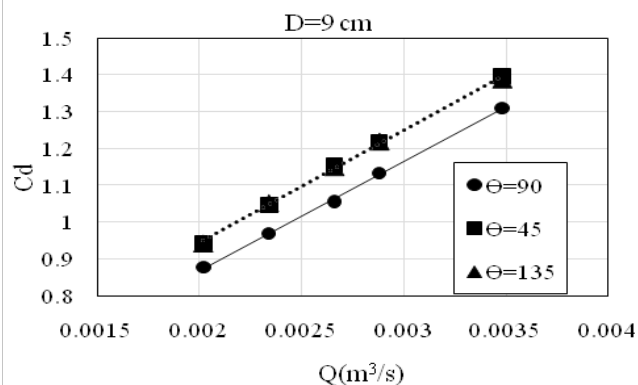
شکل‌های (۱۷)، (۱۸) و (۱۹) نیز از منطری دیگر به رابطه ضریب دبی با مقدار دبی و زاویه Θ می‌پردازد. در این بررسی نیز انطباق تقریبی نتایج مربوط به جهت‌گیری استوانه در دو زاویه مکمل ۴۵ و ۱۳۵ درجه مشخص گردیده است. کمتر بودن اندازه ضریب دبی



شکل ۱۶- نمایش همبستگی ضریب دبی با دبی (D=11cm)
Fig 16. Correlation between discharge and discharge

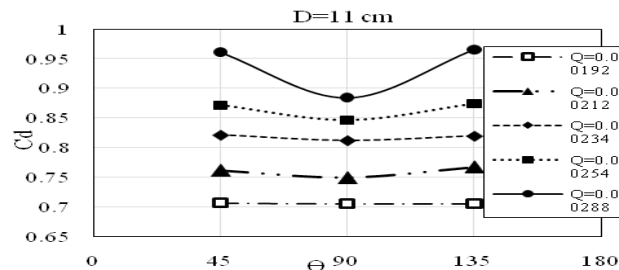


شکل ۱۷- رابطه ضریب دبی با مقدار دبی (D=11cm)
Fig 17. relationship between discharge and discharge coefficient (D=11 cm)



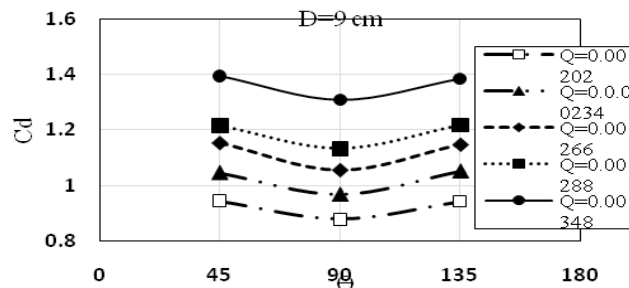
شکل ۱۸- رابطه ضریب دبی با مقدار دبی (D=9cm)
Fig 18. relationship between discharge and discharge coefficient (D=9 cm)

قطر ۹ سانتی‌متر، با افزایش ۷۲ درصدی دبی، ۴۸ درصد بر ضریب دبی افزوده می‌گردد. در مورد سرریز با قطر ۶/۳۵ سانتی‌متر نیز، رشد ۴۲ درصدی دبی منجر به رشد ۱۰ درصدی ضریب دبی می‌گردد. میزان وابستگی دبی و ضریب دبی به یکدیگر در سرریز با قطر ۱۱ سانتی‌متر برای همه زوایا در شکل (۱۶) مشخص گردیده است. ضریب همبستگی ۰/۹۴۹۷ میان دبی و ضریب دبی برای استوانه



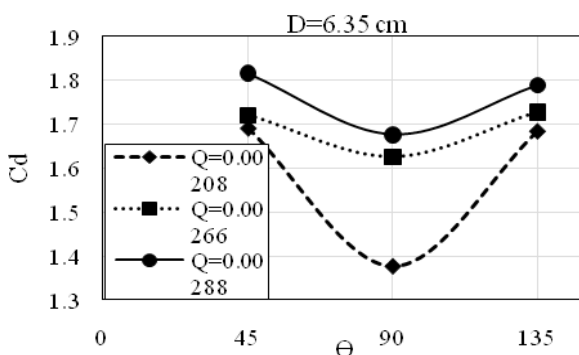
شکل ۱۳- رابطه ضریب دبی با زاویه جهت‌گیری و مقدار دبی (D=11cm)

Fig 13. The relationship of discharge coefficient with orientation and discharge (D=11 cm)



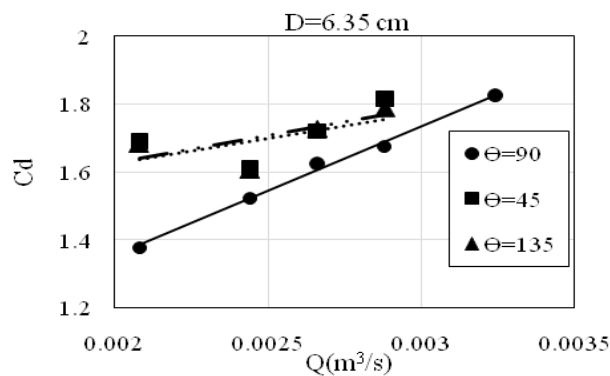
شکل ۱۴- رابطه ضریب دبی با زاویه جهت‌گیری و مقدار دبی (D=9cm)

Fig 14. The relationship of discharge coefficient with orientation and discharge (D=9 cm)



شکل ۱۵- رابطه ضریب دبی با زاویه جهت‌گیری و مقدار دبی (D=6/35cm)

Fig 15. The relationship of discharge coefficient with orientation and discharge (D=6.35 cm)



شکل ۱۹- رابطه ضریب دبی با مقدار دبی ($D=6/35\text{cm}$)
 Fig 19. relationship between discharge and discharge coefficient ($D=6.35\text{ cm}$)

متوسط با افزایش ۱۲ درصدی پارامتر بی بعد هد بالادست در زوایای مختلف سرریز، ضریب دبی ۳۴/۵ درصد افزایش می یابد. همچنین مقدار ضریب دبی در سرریز استوانه ای به مقادیر بالاتر از یک میل می کند. با توجه به کاربرد سرریزهای استوانه ای، بهینه سازی این سرریزها جهت استفاده و بهره برداری حداکثری اهمیت زیادی دارد. در پژوهش حاضر با تغییر زاویه قرارگیری سرریز نسبت به حالت نرمال و کاهش قطر آن، ضریب دبی افزایش یافت. توصیه می شود با لحاظ الزامات اجرایی، زاویه قرارگیری و قطر بهینه به منظور عملکرد هرچه بهتر این نوع سرریزها مورد بررسی قرار گیرد.

منابع

1. 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.
2. Baddour, R. E. (2008). Head-discharge equation for sharp-crested polynomial weir. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 134(2), 260-262.
3. Bos, M. G., & Nugteren, J. (1978). On irrigation efficiencies. *International Institute for Land Reclamation and Improvement*.
4. 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.
5. Dimitris, S., & Panayotis, P. (2010). Macroscopic turbulence models and their application in turbulent vegetated flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(3), 315-332

در حالت با زاویه قائم استوانه نسبت به حالت مایل نیز، برای هر سه قطر مختلف سرریز، به وضوح نمایان شده است. اثر کاهش قطر سرریز بر افزایش ضریب دبی، با در نظر گرفتن قطر سرریز در سه شکل (۱۷)، (۱۸) و (۱۹) بررسی شد و به وضوح مشخص گردید که برای سرریز با کمترین قطر (۶/۳۵ سانتی متر)، بیشترین ضریب دبی حاصل گردید. در تحقیق افرادی چون عثمان و همکاران [۱۶] نیز به روند کاهش ضریب دبی با افزایش قطر استوانه اشاره شده است.

نتیجه گیری

در این تحقیق به مطالعه عددی سرریز استوانه ای با سه قطر مختلف (۱۱، ۹ و ۶/۳۵ سانتی متر) و سه زاویه جهت گیری استوانه نسبت به دیواره کانال (۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه) پرداخته شده است. طبق نتایج به دست آمده از مدل سازی، مدل $k-\epsilon$ با ضریب همبستگی ۰/۹۶۴۹ بهترین نتیجه را نسبت به دو مدل RNG و LES داشته و این نکته نشان دهنده انطباق نتایج مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی در مدل سازی با مدل آشفتگی $k-\epsilon$ می باشد. نتایج این تحقیق نشان داد که دبی جریان، قطر سرریز، هد بالادست و زاویه قرارگیری سرریز نسبت به دیواره (که موجب تغییر در طول سرریز می گردد) بر مقدار ضریب دبی مؤثر هستند. افزایش زاویه سرریز با دیواره، موجب افزایش طول سرریز می گردد و همین امر منجر به افزایش ضریب دبی می شود. با تغییر زاویه θ از ۹۰ به ۴۵ یا ۱۳۵ درجه، ضریب دبی حداقل ۷ درصد افزایش داشت. نتایج نشان دهنده آن است که در جهت گیری استوانه با زوایای مکمل (۴۵ و ۱۳۵ درجه)، ضرایب دبی، تقریباً برابر با یکدیگر خواهند بود. به علاوه با افزایش قطر سرریز از ۶/۳۵ به ۱۱ سانتی متر، ضریب دبی به نصف مقدار اولیه کاهش می یابد. افزایش دبی جریان نیز مستقیماً بر رشد ضریب دبی تأثیر می گذارد. مقدار حداکثر رشد ضریب دبی، ۴۸ درصد است که متعلق به استوانه با قطر ۹ سانتی متر و ناشی از افزایش ۷۲ درصدی دبی جریان می باشد. در ادامه مشخص گردید به طور

17. Ramamurthy, A. S., & Vo, N. D. (1993). Characteristics of circular-crested weir. *Journal of hydraulic engineering*, 119(9), 1055-1062.
18. 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 12th WSEAS International Conference on Applied Mathematics*. Stevens Point, Wisconsin, USA. Pp (pp. 168-174).
19. 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.
20. Schmocker, L., Halldórsdóttir, B. R., & Hager, W. H. (2011). Effect of weir face angles on circular-crested weir flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(6), 637-643.
21. Seo, I. W., Do Kim, Y., Park, Y. S., & Song, C. G. (2016). Spillway discharges by modification of weir shapes and overflow surroundings. *Environmental Earth Sciences*, 75(6), 1-13.
22. Swamee, P. K. (1988). Generalized rectangular weir equations. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(8), 945-949.
23. Vatankhah, A. R. (2010). Flow measurement using circular sharp-crested weirs. *Flow measurement and instrumentation*, 21(2), 118-122.
24. 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.
6. Farzin S., Karami H., Zamiri E., Nayyer, Sh. 2016. Three-dimensional modelling of flow, over the cylindrical weir using Flow-3D software. 10th International River Engineering Conference, 19-21 Jan 2016. Shahid Chamran University, Ahwaz.
7. FLOW-3D® user manual, Ver. 9.0.
8. 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.
9. Hirt, C. W., & Richardson, J. E. (1999). The modeling of shallow flows. *Flow Sci. Tech. Notes*, 48, 1-14.
10. 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).
11. Heidarpour, M., & Chamani, M. R. (2006). Velocity distribution over cylindrical weirs. *Journal of Hydraulic Research*, 44(5), 708-711.
12. 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.
13. Nadery, F., Masoudian, M., & Röttcher, K. (2013). Effect of contracting wall edges on the discharge coefficient of compressed cylindrical weirs.
14. 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.
15. Nguyen, V. T. (2015). 3D numerical simulation of free surface flows over hydraulic structures in natural channels and rivers. *Applied Mathematical Modelling*, 39(20), 6285-6306.
16. Othman, K. I., Chilmeran, T. A., & Al-Hafith, I. A. (2011). Effect of Size and Surface Roughness of Cylindrical Weirs on Over Flow Characteristics. *Al-Rafadain Engineering Journal*, 19(2).

Abstract

Introduction of Oblique Cylindrical Weir as an Effective Approach To Increase the Discharge Coefficient

S. Farzin*¹, H. Karami¹, S. Nayyer² and E. Zamiri²

Received: 2016/07/09 Accepted : 2016/11/21

Cylindrical weir is one of the hydraulic structures that was used to measure flow rate and control flood, and is less expensive than similar structures. In this study, the numerical model validation is performed with an accredited experimental model in three different diameters (11, 9 and 6.35 cm), and in three different angles (45, 90 and 135 degree) toward the wall with Flow-3D software. According to the simulation, in the results with k-ε turbulence model there is a good adaptation than the other turbulence models such as the RNG and LES model, and the correlation coefficient ($R^2=0.965$), indicated that the k-ε turbulence model is the best. Due to an increasing the length of weir in oblique position and changing the situation of spillway from direct position to oblique position, discharge coefficient will increase, so leads to increasing of discharge. The results show that in models with complementary angles, because of the similarity of these models in the flow pattern, the discharge coefficients will be almost equal to each other. With increasing the diameters of spillway from 6.35 cm to 11 cm, discharge coefficient reduced up to 50%. Maximum of the correlation coefficient between discharge and discharge coefficient for cylinder with 11 cm diameter is equal to 0.95 that show high effectiveness of discharge on discharge coefficient.

Keywords: *Cylindrical spillway, Oblique weir, Numerical model, Discharge coefficient, Spillway's diameter, Flow-3D.*

1. Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University.

2. M.Sc. Student, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Corresponding author Email: Saeed.farzin@semnan.ac.ir