

بررسی ضریب دبی جریان در سرریزهای استوانه‌ای با استفاده از مدل عددی FLOW-3D

محمود محمد رضاپور طبری^{۱*}، شیوا توکلی^۲ و امیر شالچی تبریزی^۳

چکیده

سرریزهای استوانه‌ای از جمله سرریزهای لبه‌پهن هستند که نسبت به موارد جایگزین دارای مزایایی از جمله اقتصادی، طراحی آسان و ضریب دبی بالا است. انحنای زیاد خطوط جریان روی این نوع سرریزها از عوامل مؤثر بر ضریب دبی است. بررسی ضریب دبی جریان در سرریزهای استوانه‌ای به دلیل تغییرات شرایط هیدرولیکی آنها در طراحی و کاربرد این سازه‌ها مهم است. در این پژوهش جریان روی سه گروه سرریز استوانه‌ای با قطرهای ۶/۳، ۹، ۱۱/۴ سانتی‌متر با استفاده از مدل عددی FLOW-3D مورد بررسی شده است. در این بررسی برای حل معادلات حاکم از روش حجم محدود و برای ارزیابی آشفتگی جریان از مدل RNG استفاده شده است. نتایج این پژوهش به صورت پروفیل‌های سرعت ارائه شده و ضریب دبی جریان برای دبی‌های متفاوت محاسبه شد. نتایج به دست آمده از این مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی همین گروه سرریزهای استوانه‌ای مقایسه و مشخص شد که همخوانی خوبی دارد.

واژه‌های کلیدی: حجم محدود، سرریز، ضریب دبی، مدل عددی، Flow-3D.

ارجاع: محمد رضاپور طبری م. توکلی ش. و شالچی تبریزی ا. ۱۳۹۵. بررسی ضریب دبی جریان در سرریزهای استوانه‌ای با استفاده از مدل عددی FLOW-3D. مجله پژوهش آب ایران. ۲۳: ۱۴۹-۱۵۵.

۱- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شهرکرد.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شهرکرد.

۳- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد هوافضا ایرودینامیک، گروه مهندسی هوافضا، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف.

* نویسنده مسئول: mrtabari@eng.sku.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۷/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۲/۲۷

مقدمه

گرفتند. فرسادی‌زاده و همکاران (۱۳۸۷) برای بررسی ضریب دبی جریان روی سرریز استوانه‌ای از مدل عددی فلوئنت و مدل آشفتگی $k-e$ استفاده کردند و صحت مدل‌سازی با فلوئنت را با استفاده از نتایج آزمایشگاهی تأیید کرده‌اند. اونال و گورن (۲۰۱۱) یک پژوهش مقایسه‌ای بر مبنای شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان حول سیلندر استوانه‌ای ارائه دادند. آن‌ها از سه مدل آشفتگی دو معادله‌ای برای این شبیه‌سازی‌ها استفاده کردند. رحیم‌زاده و همکاران (۲۰۱۲) با نرم‌افزار فلوئنت به شبیه‌سازی جریان روی سرریزهای تاج دایره‌ای با استفاده از مدل‌های آشفتگی مختلف پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که مدل‌های

$RSM, RNG k-e, Realizable k-e, SST k-w$ با نتایج آزمایشگاهی هماهنگی خوبی دارند. با همه این پژوهش‌ها، بررسی‌های عددی روی این نوع سرریزها بسیار محدود بوده و تعداد کمی از پژوهش‌گران برای شبیه‌سازی رفتار جریان روی این سازه‌ها و بررسی خصوصیات هیدرولیکی و پارامترهای مؤثر بر ضریب دبی آن‌ها تلاش کرده‌اند، که شاید یکی از دلایل‌های آن پیچیدگی‌های مربوط به شبیه‌سازی رفتار جریان در این سازه‌ها باشد. در این پژوهش تلاش شده با توجه به مزایای زیاد این مدل‌ها، هزینه و سختی کار آزمایشگاهی، از مدل‌سازی عددی برای بررسی ضریب دبی جریان در سرریزهای استوانه‌ای استفاده شود و ضمن بررسی صحت نتایج به دست آمده از آنالیز عددی کارایی این شیوه از دستیابی به نتایج بررسی شود.

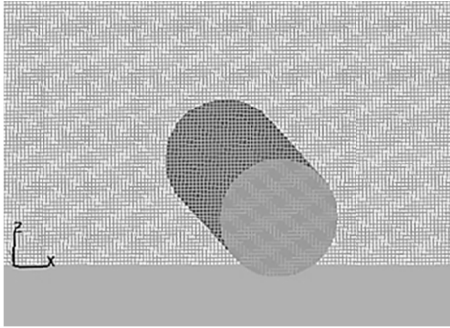
مواد و روش‌ها

در این پژوهش با توجه به ماهیت پیچیده مسئله نرم‌افزار Flow3D انتخاب شد. نرم‌افزار Flow3D از جمله نرم‌افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) است که معادلات حاکم بر حرکت سیال را با استفاده از تقریب احجام محدود حل می‌کند.

معادلات حاکم بر یک سیال با معادله پیوستگی و سه معادله اندازه حرکت که در جهت محورهای سه‌گانه مختصات هستند و به معادلات ناویر استوکس معروفند، بیان می‌شوند (صالحی نیشابوری و نصیری صالح، ۱۳۸۷).

در این پژوهش برای مدل‌سازی آشفتگی از مدل RNG که جریان بر روی سطوح دارای انحنا را بهتر مدل می‌کند،

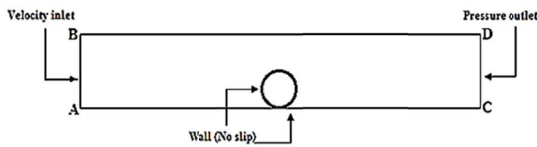
سرریزهای استوانه‌ای را می‌توان در گروه سرریزهای لبه‌پهن قرار داد که به سبب سهولت ساخت، سادگی طراحی، هزینه ساخت کمتر، سهولت عبور اجسام شناور از روی آن و مناسب بودن ضریب دبی مورد توجه بوده است. بررسی‌های اولیه روی این نوع سرریز نشان داد که ضریب تخلیه این سرریزها بیشتر از ۱ و تابع نسبت بار روی تاج به شعاع انحناء تاج سرریز است (چانسون و مونتر، ۱۹۹۸). رامامیورتی و وو (۱۹۹۳) با استفاده از تئوری درسر، توزیع سرعت را روی سرریز برآورد کردند. چانسون و مونتر (۱۹۹۷ و ۱۹۹۸) بررسی‌های مبسوطی بر روی انواع مختلف سرریز استوانه‌ای و شرایط مختلف انجام دادند که نتایج بررسی آن‌ها نشان داد اندازه، قطر و ارتفاع پایه سرریز و ایجاد شیب در بالادست سرریز هیچ‌گونه تأثیری بر ضریب دبی، ارتفاع جریان در تاج و استهلاك انرژی ندارند. مطالعات این دو نشان می‌دهد که اثر کواندا سبب چسبندگی تیغه ریزشی جریان روی سرریز می‌شود. این شرایط سبب می‌شود تا خطوط جریان با انحنای بیشتر و جریان با سرعت بالاتری شکل گرفته و در نتیجه ضریب دبی نسبت به سرریزهای لبه‌تیز و لبه‌پهن افزایش یابد. رفیعی و همکاران (۱۳۸۲) حد استغراق را در سرریزهای استوانه‌ای بدون پایه بررسی کردند و نتیجه گرفتند حد استغراق در سرریزهای استوانه‌ای با افزایش میزان دبی کاهش و با افزایش قطر سرریز افزایش می‌یابد. بیگی پور و بینا (۱۳۸۴) هیدرولیک جریان در سرریزهای تاج دایره‌ای و استوانه‌ای را در ۷۵ مدل مختلف بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که ضریب دبی در این سرریزها، با افزایش بار آبی پشت سرریز افزایش می‌یابد. هارگریوس و همکاران (۲۰۰۷) صحت کد دینامیک سیالات محاسباتی را برای مدل‌سازی سطح آزاد جریان عبوری از روی سرریزهای لبه‌پهن توصیف کردند. بررسی‌های حیدرپور و همکاران (۱۳۸۵ و ۲۰۰۸) نیز نشان می‌دهد که برای مقدار ثابت ارتفاع سرریز با افزایش بار، توزیع فشار از حالت هیدرواستاتیک خارج شده و ارتفاع سرریز تأثیر زیادی بر توزیع فشار روی آن ندارد (این شرایط در مقادیر بیشتر از ۰/۸ نسبت عمق آب بالادست تاج به قطر سرریز دیده می‌شود). پترسون و ریزی (۲۰۰۹) از نرم‌افزار فلوئنت برای مقایسه دقت دو مدل آشفتگی در محاسبه ویژگی‌های لایه مرزی محلی که با تونل باد اندازه‌گیری شدند، بهره



شکل ۱- نمونه شبکه‌بندی مدل سرریز استوانه‌ای

جدول ۱- مشخصات آزمایش‌های انجام شده روی سرریزهای

استوانه‌ای				
گروه	شماره آزمایش	R (m)	D (m)	qw (m ² /s)
۱	۱	۰/۰۵۷	۰/۱۱۴	۰/۰۱۰۱
	۲	۰/۰۵۷	۰/۱۱۴	۰/۰۱۱۶
	۳	۰/۰۵۷	۰/۱۱۴	۰/۰۱۳۳
	۴	۰/۰۵۷	۰/۱۱۴	۰/۰۱۴۴
	۵	۰/۰۵۷	۰/۱۱۴	۰/۰۱۶۲
۲	۶	۰/۰۴۵	۰/۰۹	۰/۰۱۰۱
	۷	۰/۰۴۵	۰/۰۹	۰/۰۱۱۶
	۸	۰/۰۴۵	۰/۰۹	۰/۰۱۳۳
	۹	۰/۰۴۵	۰/۰۹	۰/۰۱۴۴
	۱۰	۰/۰۴۵	۰/۰۹	۰/۰۱۶۲
۳	۱۱	۰/۰۳۱۵	۰/۰۶۳	۰/۰۱۰۱
	۱۲	۰/۰۳۱۵	۰/۰۶۳	۰/۰۱۱۶
	۱۳	۰/۰۳۱۵	۰/۰۶۳	۰/۰۱۳۳
	۱۴	۰/۰۳۱۵	۰/۰۶۳	۰/۰۱۴۴
	۱۵	۰/۰۳۱۵	۰/۰۶۳	۰/۰۱۶۲



شکل ۲- شرایط مرزی به کار برده شده برای مدل

برای بررسی استقلال حل از شبکه به مقایسه پروفیل سرعت در امتداد لایه مرزی با دو شبکه به تعداد ۲۹۱۷۶۵ و ۵۲۰۵۲۳ پرداخته و مشخص شد که با افزایش تعداد سلول محاسباتی تغییری در نتایج رخ نمی‌دهد. بنابراین شبکه با تعداد ۲۹۱۷۶۵ به عنوان شبکه محاسباتی انتخاب شد.

در سرریزهای لبه‌پهن معادله‌ای که برای به دست آوردن دبی استفاده می‌شود را می‌توان به فرم کلی معادله (۱) خلاصه کرد (آلبالی و همکاران، ۲۰۱۱):

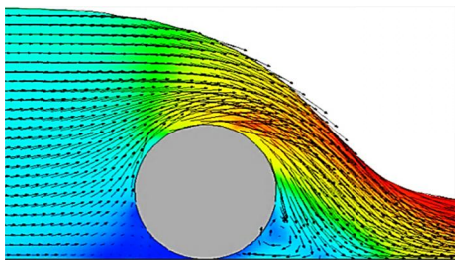
استفاده شده و برای تعیین سطح آزاد جریان روی سرریز روش حجم سیال (VOF) به کار گرفته شده است که این روش به طور اساسی برای نشان دادن رفتار سیال در سطح آزاد استفاده می‌شود.

مدل‌های بر پایه RNG، کمتر بر ارقام ثابت تجربی تکیه می‌کنند. مدل RNG از معادله‌هایی استفاده می‌کند که شبیه معادله‌های مدل آشفتگی $k-e$ است، اما مقادیر ثابت معادله که به صورت عملی در مدل استاندارد $k-e$ یافت شده‌اند، به طور صریح از مدل RNG گرفته شده‌اند. از این رو مدل RNG قابلیت اجرایی گسترده‌تری نسبت به مدل استاندارد $k-e$ دارد (حسینی و عبدی‌پور، ۱۳۸۹).

در این پژوهش ابتدا کانال مستطیل شکل به طول ۴ متر، عرض ۰/۲ متر و ارتفاع ۰/۲ متر با بستر افقی در نرم‌افزار Flow3D ساخته شد. در مجموع برای سرریزهای استوانه‌ای این پژوهش، ۳ گروه مدل هندسی با شعاع ۰/۰۳۱۵، ۰/۰۴۵ و ۰/۰۵۷ متر در نظر گرفته شد که هر گروه برای پنج دبی در واحد عرض (q)، ۰/۰۱۰۱، ۰/۰۱۱۶، ۰/۰۱۳۳، ۰/۰۱۴۴ و ۰/۰۱۶۲ مترمربع بر ثانیه، بررسی کردند. سرریزها در کلیه آزمایش‌ها در خط مرکزی و در وسط کانال قرار داده شدند. طراحی هندسی مدل سرریزهای استوانه‌ای ذکر شده نیز به صورت سه بعدی و با نرم‌افزار Flow3D انجام شد. برای شبکه‌بندی مدل‌های ساخته شده از شبکه یکنواخت استفاده شد (شکل ۱). در جدول ۱ مشخصات آزمایش‌های انجام شده روی سرریزهای استوانه‌ای آورده شده است.

هندسه مدل و دبی‌های مورد استفاده در این پژوهش بر اساس آزمایش‌های آل‌بابلی و همکاران (۲۰۱۱) در نظر گرفته شده و در نهایت نتایج مدل‌سازی عددی این پژوهش با نتایج آزمایشگاهی ایشان مورد صحت‌سنجی و مقایسه است. در این پژوهش ابتدا جریان ناپایدار مدل‌سازی شد و محاسبات تا رسیدن به شرایط دائم و پایدار ادامه یافت. شرایط مرزی استفاده شده در شکل ۲ نشان داده شده است. برای ورودی از شرط مرزی سرعت ورودی و برای سطح دیواره سرریز استوانه‌ای و کف بستر از شرط مرزی دیواره بدون لغزش استفاده شده است. شرط مرزی خروجی نیز فشار خروجی در نظر گرفته شده است. در ضمن از زبری سطح جسم صرف‌نظر شده است.

ضریب دبی جریان دارد و شرایط جریان بالادست تعیین کننده تغییرات C_d است. همچنین با توجه به پروفیل‌های سرعت حاصل شده مشاهده شد که برای سرریز استوانه‌ای با شعاع ثابت، افزایش دبی در واحد عرض سبب افزایش بار آبی در بالادست تاج سرریز شده و ضریب دبی جریان در این حالت افزایش می‌یابد. در حقیقت دلیل افزایش ضریب دبی‌های بالا منطقه جدایش (تیغه‌ای) به تاج نزدیکتر است و خلا سبب می‌شود تا ارتفاع آب روی تاج نسبت به دبی‌های کمتر کاهش بیشتری داشته و در نتیجه با توجه به معادله ضریب دبی جریان که حاصل تقسیم دبی واقعی بر دبی تئوری است، با افزایش دبی و در نتیجه افزایش ارتفاع آب بالادست ضریب دبی جریان افزایش یابد. برای بررسی دقیق‌تر جریان عبوری از روی سرریز استوانه‌ای، در شکل ۶ پروفیل نمونه سرعت به صورت بردارهای سرعت نمایش داده شده است.



شکل ۶- نمایش جریان عبوری به صورت بردارهای سرعت با دبی در واحد عرض 0.162 مترمربع بر ثانیه از روی سرریز استوانه‌ای با شعاع 0.057 متر

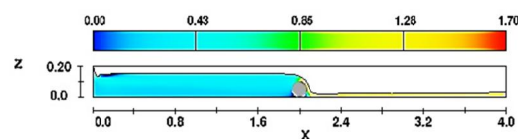
شکل ۶ نشان می‌دهد که انحناى سطح سرریز سبب کاهش بار فشار در طول سرریز و افزایش بار سرعت می‌شود. به دلیل دوبعدی بودن سرعت در محدوده سرریز، بردار سرعت در بالادست و پایین‌دست سرریز دارای دو مؤلفه عمودی و افقی بوده و به نظر می‌رسد که نقش مؤلفه افقی سرعت در بالادست نسبت به مؤلفه عمودی آن بیشتر است و این شرایط در پایین‌دست برعکس می‌شود. برای صحت‌سنجی، نتایج مدل عددی این پژوهش در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی آل‌بابلی و همکاران (۲۰۱۱)، که مدل‌سازی بر اساس با آن انجام شده است، شکل‌های ۷ تا ۹ ارائه شده است. در این شکل‌ها تغییرات ضریب دبی جریان C_d بر حسب H_w/R برای هر سه گروه سرریز به طور جداگانه ارائه شده است. نتایج این پژوهش

$$Q = L\sqrt{g}C_d\left(\frac{2}{3}H_w\right)^{3/2} \quad (1)$$

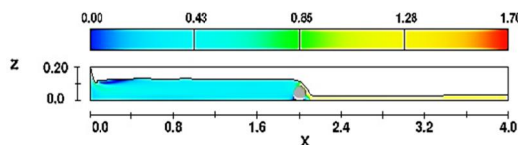
در این معادله Q دبی عبوری از روی سرریز (m^3/s) ، g شتاب ثقل (m/s^2) ، L عرض بالادست سرریز (m) ، H_w هد آب در بالادست تاج سرریز (m) و C_d ضریب دبی سرریز است که با اندازه‌گیری مستقیم دبی عبوری از روی سرریز به دست می‌آید.

نتایج و بحث

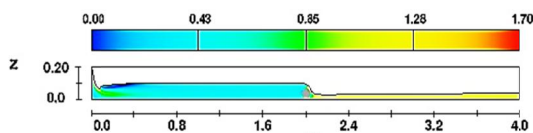
نتایج تحلیل عددی به صورت پروفیل‌های سرعت به دست آورده شد. با استفاده از این پروفیل‌های سرعت عمق آب در بالادست سرریز محاسبه شده است. به دلیل تعدد پروفیل‌های سرعت حاصل شده به عنوان نمونه ۳ پروفیل سرعت، مربوط به دبی در واحد عرض 0.101 مترمربع بر ثانیه، برای هر سه گروه سرریز استوانه‌ای آورده شده است (شکل ۳ تا ۵).



شکل ۳- پروفیل سرعت برای سرریز استوانه‌ای به شعاع 0.057 متر و دبی در واحد عرض 0.101 مترمربع بر ثانیه

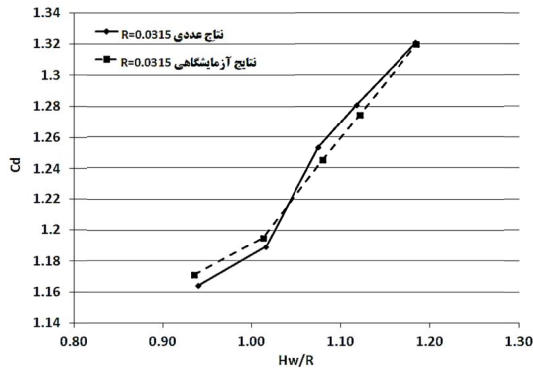


شکل ۴- پروفیل سرعت برای سرریز استوانه‌ای به شعاع 0.045 متر و دبی در واحد عرض 0.101 مترمربع بر ثانیه

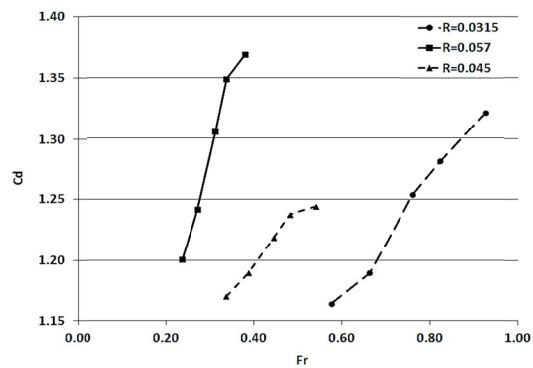


شکل ۵- پروفیل سرعت برای سرریز استوانه‌ای به شعاع 0.0315 متر و دبی در واحد عرض 0.101 مترمربع بر ثانیه

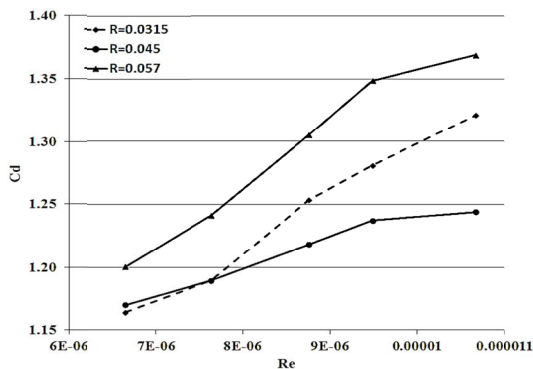
همان‌طور که از شکل‌های ۳ تا ۵ مشخص است، با افزایش شعاع سرریز، در یک دبی در واحد عرض ثابت، تغییرات بار آبی در بالادست تاج سرریز کم است بنابراین با توجه به معادله (۱) می‌توان نتیجه گرفت که در ضریب دبی سرریزهای استوانه‌ای شعاع استوانه تأثیر بسیار کمی بر



شکل ۹- تغییرات ضریب C_d بر حسب H_w/R برای سرریز استوانه‌ای به شعاع ۰/۳۱۵ متر



شکل ۱۰- تغییرات ضریب C_d بر حسب عدد فرود (Fr) برای هر سه گروه سرریز استوانه‌ای



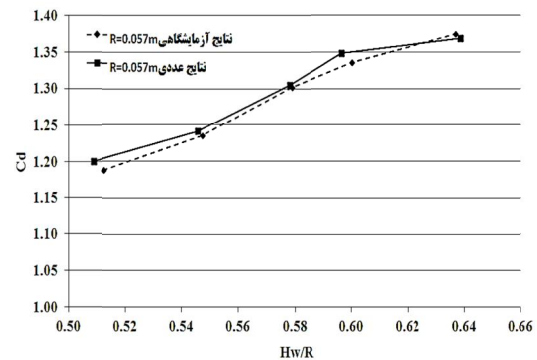
شکل ۱۱- تغییرات ضریب C_d بر حسب عدد رینولدز (Re) برای هر سه گروه سرریز استوانه‌ای

نتیجه‌گیری

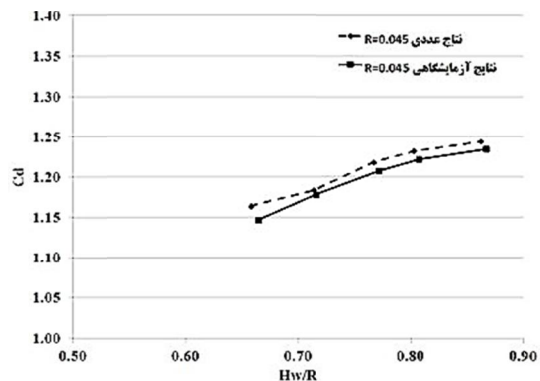
در مجموع با انجام ۱۵ آزمایش روی سرریزهای استوانه‌ای مدل‌سازی شده در این پژوهش و گرفتن داده‌های خروجی از نرم‌افزار نتایج زیر حاصل شد:

- در یک دبی در واحد عرض ثابت، شعاع استوانه در ضریب دبی سرریزهای استوانه‌ای تأثیری بسیار

نشان داد که با افزایش نسبت H_w/R ضریب C_d افزایش می‌یابد که با نتایج آزمایشگاهی نیز هماهنگی و همبستگی مناسبی دارد. با توجه به نتایج حاصل شده از مدل‌های عددی و مقایسه آن با مدل‌های آزمایشگاهی و خطای پایین آن‌ها، می‌توان از روش‌های عددی کم‌هزینه و پرسرعت همچون مدل‌های CFD به جای آزمایش‌های پرهزینه در مورد سازه‌های هیدرولیکی سرریز استوانه‌ای استفاده کرد. در شکل ۱۰ تغییرات ضریب C_d بر حسب عدد فرود برای هر سه گروه سرریز استوانه‌ای ارائه شده است. بر اساس این شکل، افزایش دبی جریان و به دنبال آن افزایش عدد فرود در هر گروه سرریز استوانه‌ای، سبب افزایش ضریب دبی جریان می‌شود. شکل ۱۱ تغییرات ضریب C_d بر حسب عدد رینولدز را برای هر سه گروه سرریز استوانه‌ای ارائه می‌دهد. بر اساس این شکل، افزایش دبی جریان و به دنبال آن افزایش عدد رینولدز در هر گروه سرریز استوانه‌ای، سبب افزایش ضریب دبی جریان می‌شود.



شکل ۷- تغییرات ضریب C_d بر حسب H_w/R برای سرریز استوانه‌ای به شعاع ۰/۰۵۷ متر



شکل ۸- تغییرات ضریب C_d بر حسب H_w/R برای سرریز استوانه‌ای به شعاع ۰/۰۴۵ متر

۴. رفیعی ز. ضیاتبهار احمدی. م. مسعودیان. م. و فرسادی‌زاده. د. ۱۳۸۲. تعیین حد استغراق در سرریزهای استوانه‌ای. پایان‌نامه کارشناسی ارشد تأسیسات آبیاری. دانشگاه مازندران. ۷۵ ص.
۵. صالحی نیشابوری ع. ا. و نصیری صالح ف. ۱۳۸۷. مدل‌های آشفتگی و کاربرد آن‌ها در هیدرولیک. پژوهشکده مهندسی آب دانشگاه تربیت مدرس، چاپ اول، ۱۸۲ ص.
۶. فرسادی‌زاده د. خسروی‌نیا پ. و ورجاوند پ. ۱۳۸۷. بررسی ضریب جریان در سرریزهای استوانه‌ای با استفاده از مدل عددی FLUENT. چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران. تهران.

7. Al Babely E. A. G. AAI Muhammad A. A. W. and Al Dabbagh M. A. 2011. Overflow Characteristic of Cylindrical Shape Crest Weirs Over Horizontal Bed. Tikrit Journal of Engineering Sciences. 18(4): 29-39.
8. Chanson H. and Montes J. S. 1997. Overflow Characteristics of Circular Weirs. Queensland (AU): Department of Civil Engineering. University of Queensland, Report No. CE154. 1-98.
9. Chanson H. and Montes J. S. 1998. Overflow Characteristics of Circular Weir. ASCE. Journal of Irrigation AND Drainage Engineering. 124(3): 152-162.
10. Hargreaves D. M. Morvan H. P. and Wright N.G. 2007. Validation of the volume of fluid method for free surface calculation: the broad-crested weir. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. 1(2): 136-146.
11. Heidarpour M. Habili J. M. and Haghiabi A. H. 2008. Application of potential flow to circular-crested weir. IAHR. Journal of Hydraulic Research. 46 (5): 699-702.
12. Pettersson K. and Rizzi A. 2009. Comparing different CFD methods accuracy in computing local boundary layer properties. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. 3(1): 98-108.
13. Rahimzadeh H. Maghsoodi R. Sarkardeh H. and Tavakkol S. 2012. Simulation Flow Over Circular Spillway by Using Different Turbulence Models. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. 6(1): 100-109.
14. Ramamurthy A. S. and Vo N. D. 1993a. Application of Dressler theory to weir flow. ASME. Journal of Applied Mechanics. 60(1): 163-166.
15. Ramamurthy A. S. and Vo N. D. 1993b. Characteristics of circular crested weir.

- کمی دارد و فقط شرایط جریان بالادست سبب تغییر C_d می‌شود.
- در سرریز استوانه‌ای با شعاع ثابت، افزایش دبی در واحد عرض سبب افزایش بار آبی در بالادست تاج سرریز شده و ضریب دبی جریان در این حالت افزایش می‌یابد.
 - صحت‌سنجی نتایج مدل عددی این پژوهش در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی آل‌بابلی و همکاران (۲۰۱۱)، نشان داد که هماهنگی و همبستگی مناسبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی وجود دارد.
 - با توجه به نتایج حاصل شده از مدل‌های عددی و مقایسه آن با مدل‌های آزمایشگاهی، و خطای پایین آن‌ها، می‌توان از روش‌های عددی کم هزینه و پرسرعت همچون مدل‌های CFD، به جای آزمایش‌های پرهزینه در مورد سازه‌های هیدرولیکی سرریز استوانه‌ای استفاده کرد.
 - در هر سه گروه سرریز استوانه‌ای، با افزایش نسبت H_w/R ضریب C_d افزایش می‌یابد.
 - افزایش دبی جریان و به‌دنبال آن افزایش عدد فرود و عدد رینولدز در هر گروه سرریز استوانه‌ای سبب افزایش ضریب دبی جریان می‌شود.

منابع

۱. بیگی پور غ. و بینا م. ۱۳۸۴. هیدرولیک جریان در سرریزهای تاج دایره‌ای و استوانه‌ای. پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشکده مهندسی دانشگاه شهید باهنر کرمان. کرمان.
۲. حسینی ع. و عبدی پور ا. ۱۳۸۹. مدل‌سازی عددی پروفیل سرعت در جریان‌های گل‌آلود پیوسته و بررسی تأثیر شیب، غلظت و دبی بر آن. مجله مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی. ۳(۳): ۶۰-۶۹.
۳. حیدرپور م. ایزدی‌نیا ا. و سعادت پور ع. ۱۳۸۵. بررسی توزیع فشار روی تاج سرریزهای استوانه‌ای و تاج دایره‌ای با ارتفاعات مختلف. همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی. دانشگاه شهید چمران اهواز.

- ASCE. Journal of Hydraulic Engineering. 119(9): 1055-1063.
16. Unal U. O. and Goren O. 2011. Effect of vortex generators on the flow around a circular cylinder: computational investigation with two-equation turbulence models. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. 5(1): 99-116.

