

بررسی عددی خصوصیات جریان در سرریز لبه تیز با مقطع افقی مثلثی با زاویه رأس در پایین دست

الهام بابایی^۱، حجت کرمی^۲، سعید فرزین^۳

تاریخ ارسال: ۱۳۹۶/۱۲/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۲۷

چکیده

سرریز لبه تیز قائم یکی از انواع سرریزها می باشد که به دلیل الگوی جریان پایدار و سهولت در عبور جریان، دارای کاربرد گسترده ای می باشد. در پژوهش حاضر، مشخصات جریان عبوری از سرریز پیشنهادی لبه تیز افقی مثلثی، با زوایای رأس ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ درجه در پایین دست برای ۱۰ دبی مختلف با استفاده از مدل عددی FLOW-3D شبیه سازی شده است. در این راستا، پس از صحت سنجی مقادیر ارتفاع جریان عبوری آب از روی سرریز با نتایج آزمایشگاهی معتبر، پارامترهای ضریب آبگذری، پروفیل فشار، سرعت در مقطع عرضی و خطوط جریان مورد تحلیل قرار گرفته است. نتایج صحت سنجی، حاکی از دقت بالای مدل آشفتگی RNG نسبت به سایر مدل های آشفتگی با ضریب همبستگی $R^2=0.9996$ می باشد. دیگر نتایج، نشان دهنده میانگین افزایش ۶ درصدی ضریب آبگذری سرریز پیشنهادی در مقایسه با سرریز مدل آزمایشگاهی (سرریز با رأس در بالادست) است. در این میان، سرریز با زاویه ۱۵۰ درجه، دارای بیشترین افزایش ضریب آبگذری در حدود ۸/۵ درصد می باشد. با افزایش زاویه رأس از ۳۰ به ۱۵۰ درجه، محدوده فشار حداقلی، از نوک سرریز دور شده و به سمت پایین دست پیش روی می کند. بیشترین مقدار فشار در پایین دست سرریز برای سرریز با زاویه راس ۱۲۰ درجه و با مقدار ۱۱۰۰ پاسکال مشاهده گردید. فشار کمینه ۱۰ پاسکال نیز، در محدوده کوچکی از سرریز ۱۵۰ درجه حاصل شد. با نزدیک شدن به نوک سرریز، جریان توأمان از کنار و نوک سرریز عبور کرده و دارای مقادیر سرعت زیادی است. بیشینه سرعت طولی با مقدار ۱/۵۳ متر بر ثانیه در سرریز ۹۰ درجه مشاهده گردید.

واژه های کلیدی: الگوی جریان، سرریز با مقطع افقی مثلثی، ضریب آبگذری، مدل عددی، FLOW-3D.

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه

سمنان. E.babaei@semnan.ac.ir

^۲ استادیار گروه مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان. hkarami@semnan.ac.ir

^۳ استادیار گروه مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان. Saeed.farzin@Semnan.ac.ir

مقدمه

تحلیلی پرداخت. (Kumar et al. (2011) بیان نمودند که ضریب آبگذری به هندسه کانال و سرریز و همچنین خصوصیات جریان وابسته است. می‌توان با تغییر مشخصات هندسی سرریز لبه تیز با مقطع افقی مثلثی، ضریب آبگذری از روی سرریز را افزایش داد. به این صورت که با ایجاد تغییر در هندسه سرریز، انتقال جریان روی سرریز به ازای ارتفاع معین سطح آب در بالادست، افزایش می‌یابد.

در پژوهشی دیگر (Kumar et al. (2012) با بررسی سرریز لبه تیز دایره‌ای در پلان، رابطه‌ای را بین H/P ، C_d و زاویه گردشگی بهینه ارائه کردند. (Esmailyli and Safarrazavizadeh. (2013) بررسی آزمایشگاهی سرریزهای جانبی با تراز تاج متغیر، ضریب دبی این‌گونه سرریزها را مورد مطالعه قرار داده و افزایش راندمان آن‌ها را نسبت به سرریزهای با تراز تاج ثابت نشان دادند. (Hoseini. (2014) با شبیه‌سازی نیم‌رخ سطح آب بر روی سرریز مثلثی لبه پهن با نرم‌افزار Flow-3D با روش حجم سیال (VOF) و مقایسه‌ی نتایج با داده‌های آزمایشگاهی، نشان داد که مدل آشفتگی RNG بیشترین دقت را در مقایسه با مدل‌های آشفتگی K- ϵ و LES دارد. (Rezaee et al. (2016) سرریزهای کنگره‌ای را با سرریزهای مستقیم مقایسه کردند. نتایج نشان دادند سرریزهای کنگره‌ای در مقایسه با سرریزهای مستقیم، با توجه به طول زیادشان، تغییرات ارتفاع آب بالادست نسبت به دبی در آنها کمتر است و به ارتفاع آزاد کمتری در بالادست نیاز دارند. بنابراین استفاده از آن‌ها در شبکه‌های آبیاری مناسب‌تر است. (Noori and Aref. (2017) در تحقیق آزمایشگاهی خود، رابطه‌ی نمایی بین زاویه سرریز مثلثی در پلان، ارتفاع و قطر تاج سرریز بیان کردند. ایشان نتیجه گرفتند با کاهش ارتفاع و افزایش قطر تاج سرریز، مقدار ضریب آبگذری افزایش پیدا می‌کند.

حیدرپور و همکاران (۱۳۹۵) با مطالعه جریان هم‌زمان از یک دریچه کشویی و روی یک سرریز لبه تیز دوزنقه‌ای به این نتیجه رسیدند که با افزایش مقدار H/d مقدار ضریب آبگذری نیز افزایش می‌یابد. عامری و همکاران (۱۳۹۴)، در آزمایشگاه بر روی تعیین ضریب

سازه‌های هیدرولیکی متنوعی برای مدیریت و انتقال آب طراحی و ساخته شده‌اند. یکی از سازه‌های متداول در بسیاری از سدها و کانال‌های انتقال آب، سرریزها می‌باشند. سرریزها خود بر اساس شکل و کاربری، انواع مختلف دارند. سرریزها به دو نوع لبه پهن و لبه تیز تقسیم می‌شوند. بر اساس طول و بار آب بالادست به صورت سرریز لبه پهن با تاج طولانی ($h/l < 0.1$)، سرریز لبه پهن حقیقی ($0.1 \leq h/l \leq 0.35$)، سرریز لبه پهن با تاج کوتاه ($0.35 \leq h/l \leq 1.5$) و سرریز لبه تیز ($h/l > 1.5$) دیده می‌شوند که h بار آب پشت سرریز و l طول سرریز است. دبی عبوری از سرریز با ارتفاع هیدرواستاتیک روی سرریز رابطه مستقیم دارد. که این رابطه با ضریب‌هایی مربوط به اندازه و شکل سرریز تبدیل به معادله عمومی سرریزها می‌گردد. (Bos. (1978)

سرریزهای لبه تیز بر اساس شکل تاج به مثلثی، مستطیلی، دایروی، دوزنقه‌ای و سهموی تقسیم بندی می‌شوند. تاکنون مطالعاتی در زمینه هیدرولیک جریان در این سرریزها انجام شده و برای افزایش کارایی سرریزهای ساده، راه‌حل‌های مختلفی پیشنهاد شده است. ارباب کردن سرریز لبه تیز باعث افزایش طول موثر آن و در نتیجه افزایش کارایی سرریز می‌گردد. این حالت هم در جریان آزاد و هم در جریان مستغرق صادق است (Borghai et al. (2003) طرح‌های اصلاحی گوناگونی مانند سرریزهای منقاری، نوک اردکی و سرریزهای کنگره‌ای نیز مورد بررسی قرار گرفته که در آن‌ها مقطع افقی تاج سرریز، شکل مستقیمی نیست و با افزایش طول تاج ظرفیت تخلیه سرریز افزایش می‌یابد. از این نوع سرریزها می‌توان به سرریز غیر خطی با مقطع افقی مثلثی اشاره کرد. (Mangarulkar. (2010) با استفاده از مدل آشفتگی شبیه‌سازی عددی الگوی جریان و مشخصات جریان در اطراف سرریز جانبی با ارتفاع تاج صفر در کانال اصلی بررسی کرد. او همچنین در این مطالعه به بررسی محل تشکیل نقطه سکون به دست آمده از شبیه‌سازی عددی و مقایسه با نتایج

سرریزها، نشان دادند که با افزایش شیب سرریز در جهت جریان، فشار و آبستتگی کاهش پیدا میکند و ضریب آبدهی سرریز افزایش می‌یابد؛ و در نهایت بیشترین مقدار آبگذری را برای سرریز با زاویه ۵۰ درجه نسبت به افق ارائه کردند.

با بررسی مطالعات پیشین مشخص شد که سرریز لبه‌تیز با مقطع افقی مثلثی کمتر مورد توجه و بررسی محققین واقع شده است. هدف از تحقیق حاضر، بررسی عددی ضریب آبگذری و خصوصیات جریان در سرریز پیشنهادی با مقطع افقی مثلثی با رأس در پایین‌دست، توسط نرم‌افزار Flow3-D است. نتایج مطالعه حاضر و عملکرد سرریز پیشنهادی در بهبود مشخصات جریان، با نتایج آزمایشگاهی سرریز معرفی شده توسط Kumar et al. (2011) مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد. همچنین مقادیر پارامترهای ضریب آبگذری و مشخصه‌های جریان حاصل از مدل‌سازی‌های عددی و نمونه آزمایشگاهی بررسی خواهند شد. از دیگر موارد مورد بررسی، سرعت طولی جریان در زاویه بهینه عددی و آزمایشگاهی و مقایسه نمودار آن‌ها با یکدیگر است. سرریزهای استفاده شده در این پژوهش ۷۰ شبیه‌سازی با زاویه رأس ۳۰، ۶۰، ۱۲۰، ۱۵۰، ۱۸۰ برای دبی‌های مختلف در محدوده ۰/۰۰۰۲ تا ۰/۱۲۵ متر مکعب بر ثانیه می‌باشند. در نهایت نتایج مقادیر ضریب آبگذری، پروفیل فشار، سرعت و خطوط جریان برای سرریز پیشنهادی مورد تحقیق واقع خواهد شد.

مواد و روش‌ها

نرم‌افزار Flow-3D یک مدل مناسب برای حل مسائل پیچیده دینامیک سیالات می‌باشد که قادر است دامنه وسیعی از جریان سیالات را مدل کند. این نرم‌افزار برای مدل کردن جریان‌های سطح آزاد سه‌بعدی غیر ماندگار با هندسه پیچیده کاربرد فراوانی دارد (فرزین و همکاران، ۱۳۹۶). نرم‌افزار Flow-3D از روش‌های دقت مرتبه اول و دوم در حل معادلات بهره می‌برد. در این نرم‌افزار، معادلات حاکم بر جریان غیرقابل تراکم به صورت روابط (۱) و (۲) است.

دبی سرریزهای جانبی لبه تیز مرکب مثلثی - مستطیلی در ۲۶ مقطع آزمایش‌هایی انجام دادند و بر پایه تحلیل ابعادی، روابطی ساده و با دقت مناسب جهت محاسبه ضریب دبی در سرریز جانبی لبه تیز مرکب با زوایای رأس ۶۰ و ۹۰ درجه ارائه کردند. حقی‌آبی و همکاران (۱۳۹۵) با بررسی عددی نمونه‌های آزمایشی کومار به این نتیجه رسیدند که مدل آشفتگی RNG بیشترین مطابقت را با نتایج آزمایشگاهی دارد. آن‌ها نشان دادند که با کاهش زاویه رأس، فشار در پایاب افزایش و سرعت در پایین‌دست سرریزها کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش زاویه رأس سرریز اغتشاشات و گردابه‌های جریان کمتر می‌شود و در نیم‌رخ طولی، برآمدگی سطح جریان و اختلاف ارتفاع عرضی در نیم‌رخ عرضی جریان کاهش پیدا می‌کند. غفاری و همکاران (۱۳۹۵) اثر عدد فرود بالادست بر الگو و مشخصات جریان در امتداد سرریز جانبی لبه تیز مستطیلی را بررسی کردند و نتایج نشان دادند که با کاهش عدد فرود، سرعت جانبی و نهایتاً دبی عبوری از سرریز افزایش می‌یابد. داوود مقامی و همکاران (۱۳۹۶) با مطالعه آزمایشگاهی و عددی مشخصات هیدرولیکی جریان عبوری از سرریز لبه‌تیز در اثر بالآمدگی بستر بالادست به این نتایج رسیدند که با افزایش رقوم بستر بالادست سرریز لبه‌تیز عمق جریان بالادست کاهش و سرعت و عدد فرود آن افزایش می‌یابد. تیغه ریزشی نیز به علت افزایش عدد فرود افقی‌تر می‌شود. با افزایش مقادیر H/P اعداد فرود حاصل از رقوم مختلف بالآمدگی همگرا خواهند شد. در محدوده $H/P \geq 0.5$ افزایش رقوم بستر بالادست و همچنین افزایش H/P تاثیر قابل ملاحظه‌ای روی ضریب دبی نداشته است. در حالتی که بستر بالادست تا تاج از رسوب پر شده و یا بالا آمده باشد، به مقدار قابل توجهی از ضریب دبی کاسته می‌شود. در نهایت رابطه‌ای برای عدد فرود بر اساس ضریب آبگذری ارائه دادند و نشان دادند در حالت $Z/P=1$ مقدار ضریب آبگذری ثابت و برابر ۰.۶ است. فرزین و همکاران (۱۳۹۶)، سرریز لبه تیز مستطیلی قائم و مورب را در نرم‌افزار Flow-3D شبیه‌سازی کردند و با بررسی و با بررسی مشخصات هیدرولیکی جریان در اطراف

سال نهم شماره سی و پنجم بهار ۱۳۹۸

$$Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2gLh^3} \quad (۴)$$

که C_d بیانگر ضریب آبگذری، L طول تاج سرریز، g شتاب گرانش و h هد بالای تاج است.

معادلات حاکم بر جریان یک سیال تراکم ناپذیر لزج، توسط معادلات پیوستگی و اندازه حرکت در جهت محورهای مختصات که به معادلات ناویر استوکس معروف هستند، بیان می‌شوند. این معادلات در واقع بیانگر پایداری جرم و اندازه حرکت به بیان ریاضی می‌باشند. چنانچه المانی از سیال به عنوان حجم کنترل ثابت در فضای محاسباتی در نظر گرفته شود در این صورت نیروهای وارد بر آن و اصل بقای جرم در این المان به صورت معادلات مشتق جزئی نمایان می‌شوند (حسینی و همکاران، ۱۳۹۵).

شبیه‌سازی آشفتگی در Flow3D با استفاده از یکی از پنج مدل آشفتگی طول اختلاط پرانتل، یک معادله‌ای انرژی جنبشی آشفتگی، مدل دو معادله‌ای $k-\epsilon$ ، مدل گروه‌های نرمال شده (RNG) و مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ صورت می‌گیرد (قاسم زاده، ۱۳۹۶).

مدل RNG کاربرد وسیع تری نسبت به مدل $k-\epsilon$ دارد و در عمل به تولید نتایج دقیق در جریان های با شدت کم آشفتگی و جریان های با ناحیه برشی قوی شهرت دارد.

معیارهای ارزیابی دقت مدل سازی

برای مقایسه کمی عملکرد مدل‌های پیشنهادی می‌توان از تجزیه و تحلیل خطاهای باقی مانده و اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده بهره گرفت. در مطالعه حاضر به منظور ارزیابی دقت در مدل شبیه‌سازی و همچنین تعیین ابعاد شبکه‌بندی و مش بهینه، پارامترهای میانگین مطلق خطا، جذر میانگین مربعات خطا و ضریب همبستگی، مطابق روابط ۵، ۶ و ۷ مورد تحلیل و بررسی قرار گرفتند. منظور از y_i^* و y_i در روابط اشاره شده به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری شده در مدل عددی و آزمایشگاهی است. n تعداد کل داده‌ها می‌باشد.

$$\frac{\delta}{\delta x}(uA_x) + \frac{\delta}{\delta y}(vA_y) + \frac{\delta}{\delta z}(wA_z) = 0 \quad (۱)$$

$$\frac{du_i}{dt} + \frac{1}{V_F} \sum \frac{\partial}{\partial x_i} u_i A_i = \frac{1}{r} \frac{dp}{dx_i} + g_i + f_i \quad (۲)$$

در روابط ۱ و ۲ مؤلفه های u ، v و w سرعت سیال در جهت های x ، y ، z بر حسب V_F ، (m/s) کسر حجمی جریان A_x ، A_y و A_z کسرهای سطحی جریان در جهت های x ، y و z بر حسب (m²)، ρ چگالی سیال (Kg/m³)، p فشار در هر نقطه از سیال (Pa)، g_i مؤلفه شتاب ثقل در جهت i (m/s²)، f_i بیانگر تنش رینولدز (Pa) می‌باشند.

روش VOF رفتار سیال در سطح آزاد را نمایش می‌دهد که در آن با استفاده از تابع حجم سیال سلول‌ها نمایش داده می‌شود. این تابع حجم سیال درصد حجمی فاز آب است، چنانچه سلول از آب پر باشد مقدار تابع یک و در صورت پر بودن آن از هوا صفر می‌باشد. در حالت وجود سطح آزاد در سلول مقداری بین صفر و یک به این تابع تعلق می‌گیرد. در این روش برای تعریف پروفیل سطح آب، تابع $F(x,y,z)$ طبق رابطه زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد (Hirt et al., 1996 and 1981).

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u_j \frac{\partial F}{\partial x_j} = 0 \quad (۳)$$

که در این رابطه x و t به ترتیب بعد مکان و زمان را نشان می‌دهند.

روش FAVOR برای شبیه‌سازی سطوح و احجام صلب مثل مرزهای هندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل Flow-3D با بهره‌گیری از مش‌های رأست گوشه در مختصات کارتیزین و استوانه‌ای، به مدل‌سازی می‌پردازد. در FAVOR، اشکال هندسی پیچیده با قرارگیری در مش‌های رأست گوشه، با اشغال کردن قسمتی یا تمام حجم و یا سطح سلول شبیه‌سازی می‌شوند که این امر موجب بهبود مش‌بندی می‌گردد. همچنین جریان بر روی یک سرریز لبه تیز، تحت شرایط جریان آزاد در یک کانال، برحسب عبارت ریاضیات زیر بیان می‌شود:

Z_{max} ، شرط مرزی در حالت سطح آزاد سیال (S) است. زیرا تا وقتی که جریان سیال به این مرز نرسد، شرایط بالای سطح سیال تا بی‌نهایت مشابه شرایط اتمسفر در نظر گرفته می‌شود. دیوار جانبی و کف کانال به صورت دیواره (W)، و برای سطح خروجی نیز دبی خروجی (O) تعریف شده است. میدان جریان سه بعدی به وسیله مدل‌های آشفتگی RNG، K-ε و LES حل شد که با استفاده از نتایج شاخص‌های آماری موجود در جدول ۲، بین داده‌های ضریب آبگذری اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و داده‌های برآوردی از شبیه‌های عددی روی سرریز ۳۰ درجه، مدل آشفتگی RNG به داده‌های آزمایشگاهی نزدیک بوده و کم‌ترین مقدار خطا را نسبت به مدل‌های K-ε و LES دارد. حقی‌آبی و همکاران نیز در مدل‌سازی عددی نمونه‌های آزمایشی کومار به این نتیجه رسیدند که مدل آشفتگی RNG بیشترین مطابقت را با نتایج آزمایشگاهی دارد.

همچنین ابعاد و تعداد مش بهینه در جدول ۳ نشان داده شده است. نکته حائز اهمیت این است که برای تعداد شبکه بالاتر در مش‌بندی، زمان ران طولانی‌تر می‌شود و از نظر زمان و اقتصادی مقرون به صرفه نیست ولی نتایج قابل قبول را می‌توان از تعداد مش کمتر نیز به دست آورد. انتخاب شبکه مش‌بندی بر اساس سه مش بلوک مجاور انجام شده است که مرزهای بین این سه بلوک را همانطور که در شکل ۱ مشخص شده، می‌توان شرایط مشابه (Symmetry) در نظر گرفت. نکته قابل توجه در این مش‌بندی این است که شبکه اطراف سرریز در بلوک میانی نسبت به بلوک‌های مجاور ریزتر است. این موضوع بدین دلیل است که برای مدل‌سازی سرریز نسبت به کل میدان حل، احتیاج به دقت بیشتری برای انجام محاسبات است. به نحوی که زمان محاسبات به طور قابل ملاحظه افزایش نیابد و همچنین خطای مدل‌سازی کاهش پیدا کند.

جدول (۲): مقایسه دقت مدل‌های آشفتگی

مدل آشفتگی	R^2	RMSE	MAE
RNG	0.9998	0.0004	0.0004
K-ε	0.9998	0.0005	0.0005
LES	0.9997	0.0006	0.0006

$$R^2 = \frac{\text{Cov}(y_i^*, y_i)}{s_{y_i^*} s_{y_i}} \quad (5)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i^* - y_i)^2} \quad (6)$$

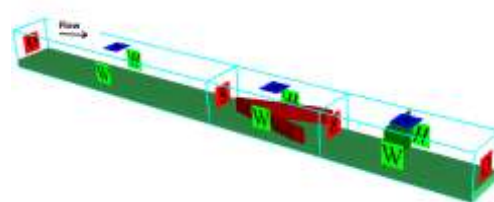
$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i^* - y_i| \quad (7)$$

مدل‌سازی سرریزهای پیشنهادی

در تحقیق حاضر، جهت صحت‌سنجی پارامتر ضریب دبی محاسبه شده توسط نرم افزار Flow-3D، از داده‌های آزمایشگاهی مدل سرریز با مقطع افقی مثلثی با زاویه رأس ۳۰ درجه (Kumar et al., 2011) استفاده شده است. سرریز با زاویه رأس θ ، طول L و ارتفاع w، جهت شبیه‌سازی برای ۱۰ دبی انتخاب و بررسی شد. جدول ۱ بیانگر اطلاعات مدل آزمایشگاهی جهت صحت‌سنجی می‌باشد. در شکل ۱ نیز نحوه قرار گیری سرریز در کانال و همچنین شرایط مرزی مش مورد استفاده نشان داده شده است.

جدول (۱): مشخصات سرریز مدل شده جهت صحت-سنجی

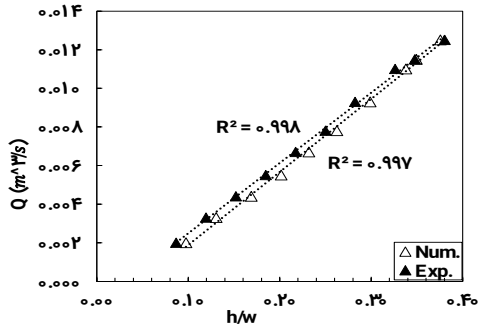
شماره	زاویه (degree)	طول (m)	ارتفاع (m)	دبی (m ³ /s)
1-10	30	1.082	0.092	0.002-0.0125



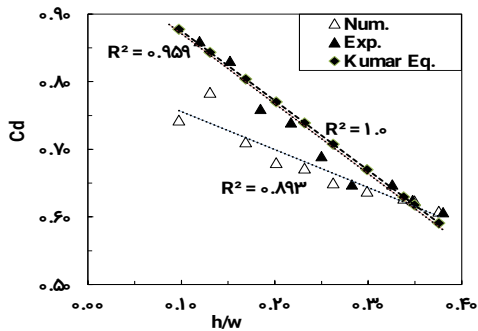
شکل (۱): شرایط مرزی در شبیه‌سازی سرریز در نرم-افزار Flow-3D

مطابق شکل ۱ برای شبیه‌سازی جریان در مدل سرریز از شرط مرزی دبی ورودی (Q)، برای سطح ورودی استفاده شد؛ که برای تعریف دبی از داده‌های آزمایشگاهی مشخص شده استفاده گردید. برای سطح

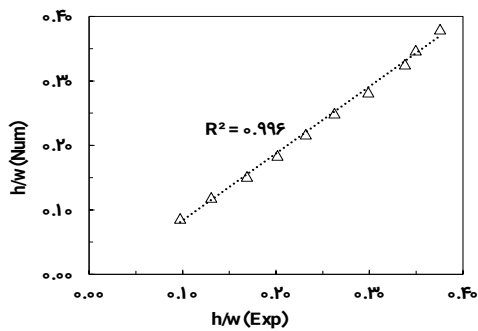
سال نهم شماره سی و پنجم بهار ۱۳۹۸



شکل (۱): تغییرات دبی نسبت به ارتفاع آب روی سرریز در حالت بی بعد



شکل (۲): مقایسه ضریب آبگذری بر حسب h/w مدل عددی و آزمایشگاهی



شکل (۳): همبستگی بین ارتفاع آب روی سرریز در مدل عددی و آزمایشگاهی

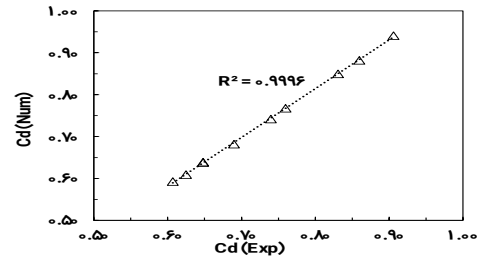
جدول (۳): مقایسه دقت شبکه بندی های مورد استفاده

انداره شبکه	MAE	RMSE	R2
ریز	0.0003	0.0003	0.9998
متوسط	0.0003	0.0003	0.9996
درشت	0.0006	0.0008	0.9976

شکل های ۲، ۳، ۴ و ۵ مقایسه نتایج آزمایشگاهی (Exp) و عددی (Num) را نشان می دهند. برای بررسی نتایج، پارامترها و خروجی های مشخصی از نرم افزار استخراج گردید. Cd بیانگر ضریب آبگذری و مقدار h ارتفاع آب روی سرریز است. مقدار w مربوط به ارتفاع سرریز است که برای هر سرریز با زاویه رأس مشخص، متفاوت می باشد. از نسبت h/w برای مقایسه هد آب در حالت بی بعد استفاده می شود. شکل ۲ بررسی ضریب تبیین دبی نسبت به ارتفاع، در مدل عددی و آزمایشگاهی که کومار و همکاران نیز بررسی کرده بودند را نشان می دهد. همان طور که اعداد ضریب تبیین نشان می دهند نتایج حاصل از مدل سازی عددی به نتایج آزمایشگاهی نزدیک است. در شکل ۳ طبق رابطه های ارائه شده توسط Kumar et al. (2011) برای ضریب آبگذری بر حسب h/w، مقادیر ضریب آبگذری مربوط به زاویه ۳۰ درجه $(Cd = 0.978 - 1.030 h/w)$ ، با مقادیر محاسبه شده توسط نرم افزار مقایسه شدند. شکل های ۴ و ۵، نسبت هد آب و نسبت ضریب آبگذری برای دبی های مشخص و زاویه ۳۰ درجه را در دو حالت آزمایشگاهی و عددی نشان می دهد. با توجه به صحت سنجی انجام شده و استناد به نتایج حاصل از جدول های ۲ و ۳ و همچنین شکل های ۲، ۳، ۴ و ۵ می توان به توانایی بالای نرم افزار Flow-3D در شبیه سازی اشاره کرد. در ادامه برای مدل سازی عددی سایر نمونه های سرریز پیشنهادی و یافتن بهترین نتایج، از مدل آشفتگی RNG استفاده می شود. همچنین اندازه شبکه متوسط به عنوان مش بهینه برای شبیه سازی انتخاب می گردد.

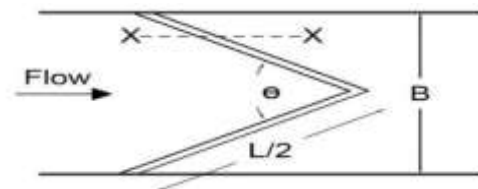
بحث و نتایج

جدول ۴ نتایج حاصل از مدل عددی سرریز با زاویه رأس در پایین دست و همچنین مقادیر گزارش شده توسط Kumar et al. (2011) (سرریز با زاویه رأس در بالادست) را نشان می‌دهد. با استناد به نتایج صحت سنجی و نزدیک بودن نتایج حاصل از مقادیر آزمایشگاهی و عددی، می‌توان مدل پیشنهاد شده در این پژوهش را با نمونه‌ی آزمایشگاهی مقایسه نمود. بنابراین با توجه به جدول ۴، با دوران ۱۸۰ درجه‌ای سرریز مثلثی افقی مورد آزمایش و تغییر مدل آزمایشگاهی به مدل سرریز مثلثی افقی با رأس در پایین دست، به طور متوسط ۶٪ افزایش ضریب آبگذری مشاهده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که افزایش ضریب آبگذری در دبی‌های بالاتر، بیشتر است. شکل‌های ۷ و ۸ مقایسه مقادیر h/w و Cd بدست آمده از نتایج عددی حاصل از مدل پیشنهادی را با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهند. شکل ۷ نشان می‌دهد که مقادیر هد آب روی سرریز مدل عددی در نسبت‌های بالاتر، کمتر از مقادیر آزمایشگاهی است. در واقع در حالت عددی، هد آب کمتر است که نشان دهنده افزایش ضریب آبگذری است. با توجه به نتایج جدول ۴ و شکل ۸، بیشترین ضریب آبگذری مربوط به زاویه رأس ۱۵۰ درجه (رأس در پایین دست) با رشد ۸/۵ درصدی نسبت به حالت ۱۵۰ درجه آزمایشگاهی است. این در حالی است که زاویه‌ی بهینه در مدل آزمایشگاهی (رأس در بالادست) با توجه به ضریب آبگذری، ۳۰ درجه بوده است، که این دو زاویه مکمل یکدیگر هستند. آنچه در شکل ۸ مشخص است، آن است که مقادیر ضریب آبگذری در مدل عددی نسبت به مدل آزمایشگاهی دارای رشد بوده است. همچنین ضریب آبگذری زاویه رأس ۹۰ درجه (رأس در پایین دست) رشدی در حدود ۱۱/۶ درصدی نسبت به ضریب آبگذری حالت آزمایشگاهی دارد که در مقایسه با رشد سایر زوایا دارای بیشترین افزایش است. در مجموع می‌توان گفت سرریز با زوایای رأس ۱۵۰ و ۳۰ و سپس ۹۰ درجه دارای بهترین شرایط در افزایش

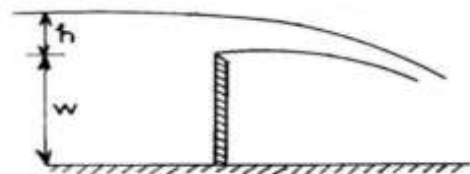


شکل (۵): همبستگی بین ضریب آبگذری سرریز در مدل عددی و آزمایشگاهی

Kumar et al. (2011) در آزمایشی که برای سرریز لبه تیز انجام دادند، بر آن بودند که با افزایش طول سرریز و تغییر شکل پلان آن، ضریب آبگذری نیز افزایش پیدا می‌کند و نهایتاً زاویه بهینه را ارائه دادند. در تحقیق حاضر مطابق شکل ۶ سرریز مورد آزمایش با ۱۸۰ درجه چرخش حول محور Z ، و قرار گرفتن رأس سرریز در پایین دست، مدل سازی می‌شوند. با ثابت نگه داشتن همه شرایط آزمایشگاهی نظیر طول تاج، ارتفاع سرریز و دبی آب ورودی، در زاویه رأس های ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ پارامترهای هیدرولیکی بررسی شد.



(آ): پلان سرریز مثلثی در شبیه سازی عددی



(ب): مقطع X-X

شکل (۶): مشخصات فیزیکی سرریز پیشنهادی مدل شده در نرم افزار Flow3-D

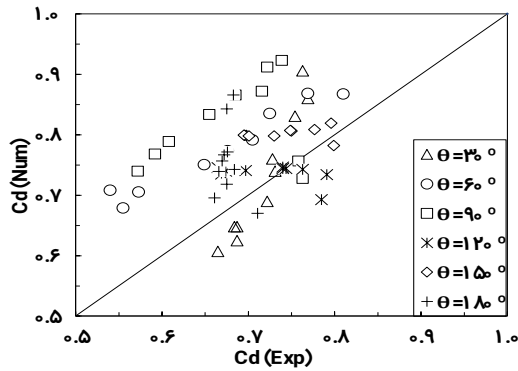
سال نهم شماره سی و پنجم بهار ۱۳۹۸

از مقدار ۰/۳۵ به ۰/۲۷ متر بر ثانیه کاهش پیدا کرده است. نکته قابل توجه این است که تغییرات سرعت برای سرریز با زاویه ۱۵۰ درجه در کناره‌ها و جداره‌ی کانال بیشتر از وسط کانال می‌باشد. این در حالی است که برای سرریز ۳۰ درجه‌ی آزمایشگاهی، این تغییرات در میانه‌ی کانال افزایش یافته است. همچنین این تغییرات سرعت، در دبی‌های بالاتر بیشتر مشاهده می‌شود.

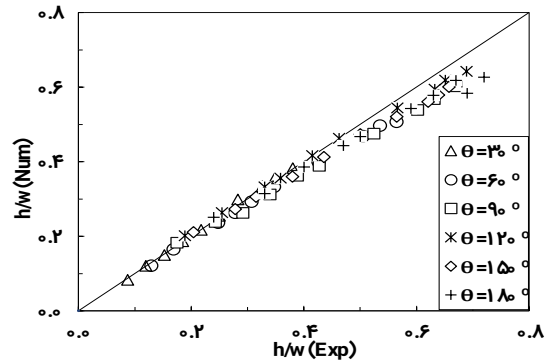
ضریب آبگذری هستند. این افزایش در زوایای ۶۰ و ۱۲۰ درجه به نسبت کمتری مشاهده شده است. شکل‌های ۹ و ۱۰ مقایسه سرعت طولی برای دو زاویه بهینه در حالت عددی و آزمایشگاهی در سطح جریان (عرض کانال) را نشان می‌دهند؛ سرعت u که بیانگر سرعت در جهت جریان است، در زاویه ۱۵۰ درجه با رأس در پایین دست نسبت به حالت بهینه آزمایشگاهی،

جدول (۴): مقایسه مقادیر ضریب آبگذری مدل‌های عددی و آزمایشگاهی

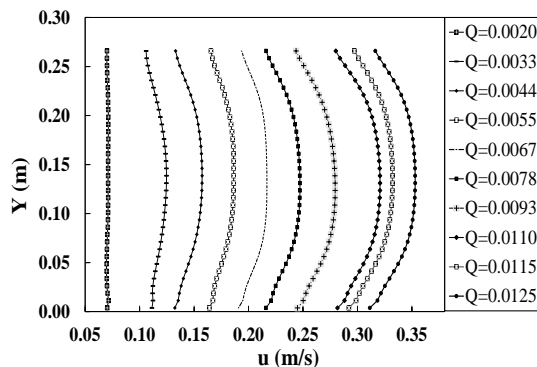
θ (degree)	Q (m ³ /s)	Cd (present study)	Cd (Kumar et al. 2011)	θ (degree)	Q (m ³ /s)	Cd (present study)	Cd (Kumar et al. 2011)
150	0.0113	0.799	0.698	90	0.0068	0.847	0.716
150	0.0107	0.799	0.696	90	0.0056	0.807	0.722
150	0.0102	0.799	0.695	90	0.0044	0.791	0.739
150	0.0091	0.798	0.701	90	0.0034	0.759	0.758
150	0.0079	0.798	0.730	90	0.0022	0.714	0.763
150	0.0065	0.807	0.750	60	0.0120	0.625	0.540
150	0.0053	0.807	0.749	60	0.0115	0.618	0.555
150	0.0042	0.819	0.796	60	0.0109	0.839	0.573
150	0.0035	0.809	0.777	60	0.0094	0.939	0.649
150	0.0023	0.782	0.799	60	0.0074	0.819	0.676
120	0.0124	0.732	0.665	60	0.0063	0.781	0.705
120	0.0116	0.724	0.669	60	0.0056	0.749	0.725
120	0.0110	0.743	0.674	60	0.0050	0.726	0.769
120	0.0097	0.708	0.697	60	0.0030	0.701	0.810
120	0.0077	0.744	0.740	60	0.0021	0.640	0.872
120	0.0066	0.746	0.740	30	0.0125	0.593	0.607
120	0.0052	0.746	0.744	30	0.0115	0.941	0.625
120	0.0047	0.744	0.763	30	0.0110	0.638	0.648
120	0.0033	0.733	0.791	30	0.0093	0.882	0.648
120	0.0021	0.729	0.785	30	0.0078	0.850	0.690
90	0.0121	0.670	0.572	30	0.0067	0.768	0.740
90	0.0115	0.695	0.592	30	0.0055	0.742	0.760
90	0.0109	0.757	0.608	30	0.0044	0.682	0.831
90	0.0096	0.728	0.655	30	0.0033	0.639	0.860
90	0.0074	0.833	0.685	30	0.0020	0.610	0.906



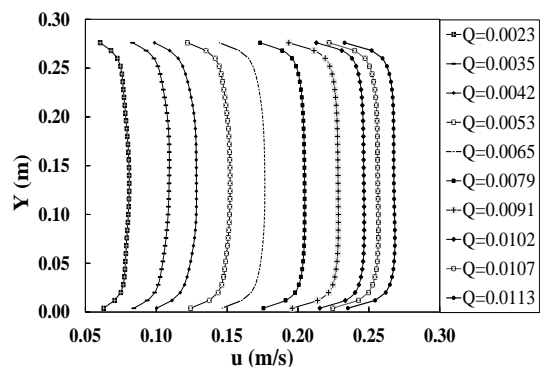
شکل (۸): مقایسه ضریب آگذری در مدل‌های عددی و آزمایشگاهی



شکل (۷): مقایسه هد آب روی سرریز در مدل‌های عددی و آزمایشگاهی به صورت بی بعد



شکل (۱۰): سرعت طولی در سرریز با زاویه رأس ۳۰ درجه در مدل آزمایشگاهی به ازای دبی‌های مختلف (m³/s)



شکل (۹): سرعت طولی در سرریز با زاویه رأس ۱۵۰ درجه در مدل عددی به ازای دبی‌های مختلف (m³/s)

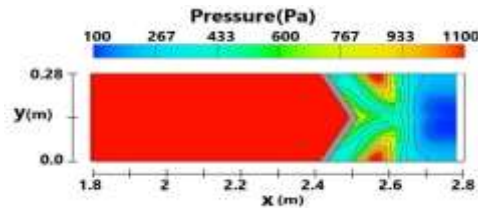
سرریز برای زوایای کمتر از کناره‌های کانال به سمت مرکز حرکت می‌کند به طوری که در زاویه ۱۵۰ درجه تنها محدوده کوچکی از فشار حداقلی در وسط کانال شکل گرفته است. مقدار حداقلی فشار در زاویه‌های کوچکتر ۱۸۴ پاسکال است ولی در زاویه ۱۵۰ درجه این مقدار به ۱۰ پاسکال کاهش پیدا می‌کند. غیریکنواخت‌ترین تغییر فشار برای زاویه ۱۲۰ درجه است؛ که در فاصله کمی بعد از سرریز، مقدار فشار از ۲۷۰ به ۱۱۰۰ پاسکال افزایش پیدا کرده است.

یکنواخت‌ترین تغییر فشار در پایین‌دست مربوط به سرریز ۳۰ درجه است که به دلیل طول زیاد سرریز و کاهش تمرکز ریزش جریان در یک نقطه، مقادیر حداکثر آن از سایر سرریزها کمتر است. اما با افزایش زاویه، کم کم مقادیر حداکثری در پایین‌دست سرریز که نزدیک به دیواره‌های کناری بودند به میانه کانال و نوک دماغه خارجی سرریز نزدیک می‌شوند؛ که علت آن افزایش عمق و تبدیل شدن مقادیر سرعت به فشار است.

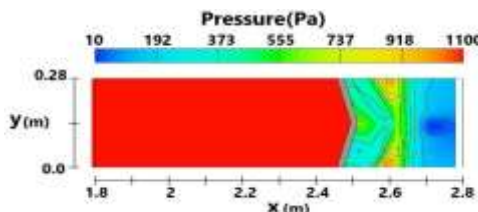
شبیه‌سازی پروفیل فشار

شبیه‌سازی پروفیل فشار در زمان‌های مختلف و دبی‌های حداکثر برای هر زاویه در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. مقادیر فشار به دو قسمت عمده قبل و بعد از سرریز تقسیم بندی می‌شود. قبل از سرریز که ارتفاع آب بالادست زیاد است به طور طبیعی مقادیر فشار نیز حداکثر است. اما در قسمت پایین‌دست برای زوایای مختلف رفتار سازه متفاوت است. همانطور که مشاهده می‌شود مقادیر حداقلی فشار با افزایش زاویه از سرریز دور شده و به سمت پایین‌دست حرکت می‌کند. نکته قابل توجه دیگر تغییرات زیاد مقادیر فشار در پایین‌دست سرریزها است. در واقع هرچه زاویه سرریز بیشتر می‌شود (از ۳۰ درجه تا ۱۵۰ درجه) کانتورهای تغییر فشار بیشتر است. کم‌ترین تغییرات فشار، در پایین‌دست سرریز ۱۸۰ درجه ایجاد شده است. به طوری که مقدار فشار از ۲۶۰ به حداکثر ۷۶۰ پاسکال افزایش می‌یابد. تغییرات مقادیر فشار حداقلی در پایین‌دست

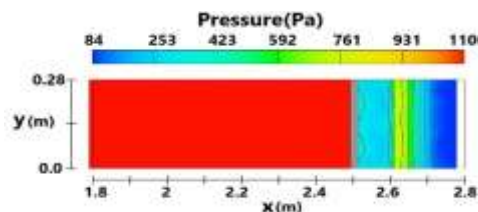
سال نهم شماره سی و پنجم بهار ۱۳۹۸



سرریز با زاویه رأس ۱۲۰ درجه



سرریز با زاویه رأس ۱۵۰ درجه



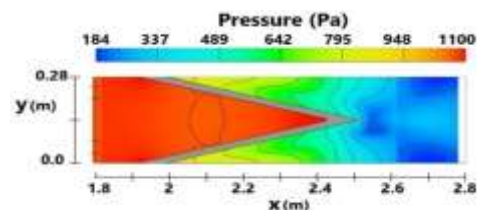
سرریز با زاویه رأس ۱۸۰ درجه

شکل (۱۱): توزیع فشار در دبی‌های بیشینه برای زاویه رأس مختلف به صورت دو بعدی

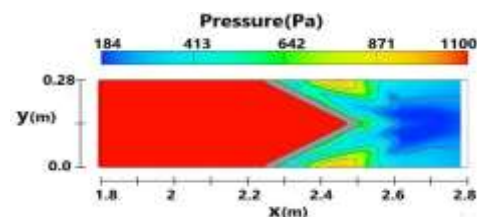
شبیه‌سازی توزیع سرعت در مقطع عرضی

مقادیر سرعت در روی سرریز (ابتدا، میانه و انتها مقطع سرریز) برای زاویای مختلف در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است بردارهای سرعت در ابتدای سرریز (ورودی) بیشتر متمایل به کناره‌ها است و سرعت طولی بسیار ناچیز است. در نتیجه مقادیر زیادی از جریان با ورود به میدان سازه سرریز از دو طرف (کناره‌ها) عبور می‌کند و به پایین دست می‌ریزد. هرچه جریان بیشتر وارد میدان سرریز می‌شود تمایل به سرعت طولی بیشتر شده و حرکت مستقیم بیشتر می‌شود. نهایتاً با نزدیک شدن به نوک سرریز، جریان توأمان از کناره و نوک سرریز عبور می‌کند و درارای مقادیر سرعت زیادی نیز هست. شرایط

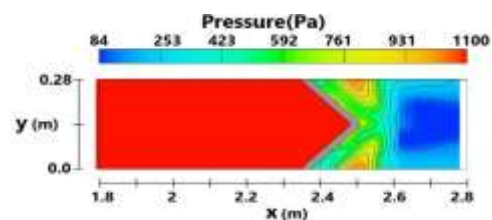
این روند رو به رشد محدوده و مقادیر فشار تا زاویه ۱۲۰ درجه به مقدار ۶۸ درصد ادامه دارد و با عبور از زاویه ۱۲۰ درجه و نزدیک شدن به زوایای بیشتر مقادیر فشار و محدوده فشار حداکثری به مقدار ۷۶ درصد کاهش یافته است. به طوری که در زاویه ۱۸۰ درجه این مقادیر به ندرت مشاهده می‌شوند. همان‌طور که در شکل مشخص است این مقادیر از ۸۸۰ پاسکال برای زاویه ۶۰ شروع شده و در زاویه ۱۲۰ به ۱۱۰۰ پاسکال افزایش پیدا می‌کند و در زاویه ۱۵۰ به ۹۰۰ پاسکال کاهش می‌یابد. نکته مهم دیگر در ارتباط با فشار پایین دست زوایای مختلف آن است که هرچه زاویه سرریز بیشتر می‌شود جریان عبوری از نوک سرریز بیشتر شده و در نتیجه مقادیر فشار حداکثری به نوک دماغه خارجی سرریز نزدیک می‌شوند. این افزایش فشار نسبت به سرریز خطی (زاویه رأس ۱۸۰)، در زاویه ۶۰ درجه به اندازه ۱۳۸ درصد و برای زوایای ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ به ترتیب برابر ۱۳۰، ۱۷۰ و ۱۱۰ درصد می‌باشد.



سرریز با زاویه رأس ۳۰ درجه



سرریز با زاویه رأس ۶۰ درجه



سرریز با زاویه رأس ۹۰ درجه

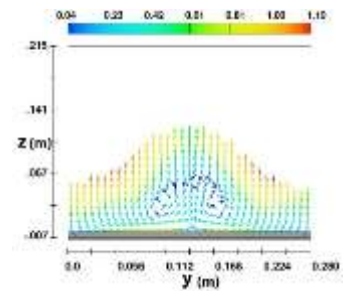
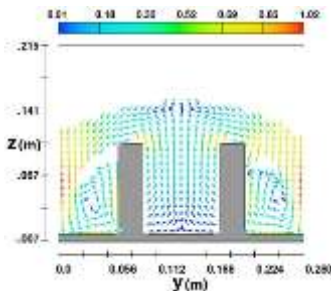
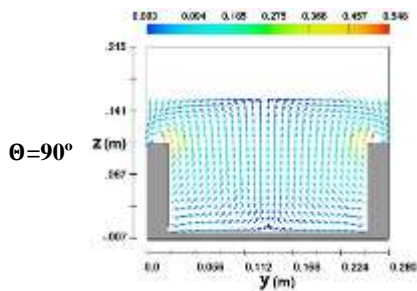
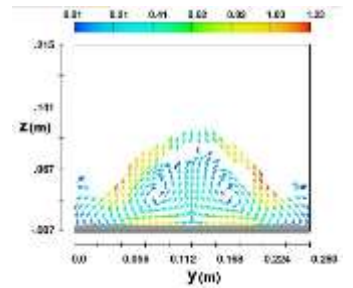
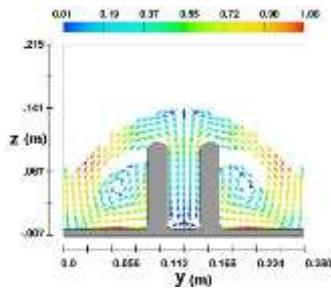
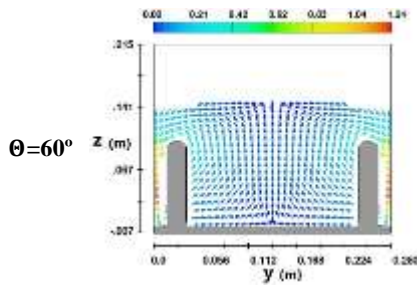
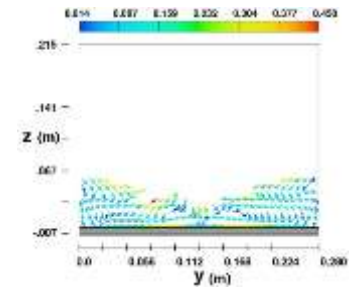
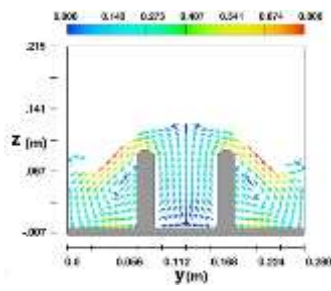
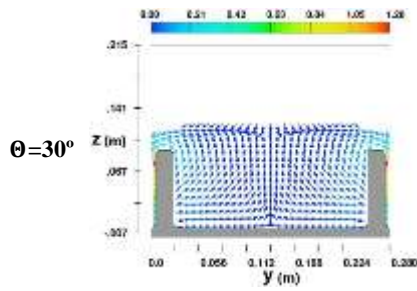
گردابه‌های تشکیل شده در لحظه عبور جریان و خلأ‌های بوجود آمده در جریان نشان می‌دهد هرچه زاویه سرریز بزرگتر می‌شود این گردابه و خلأ بزرگتر می‌شود. زاویای ۱۲۰ و ۱۵۰ درجه در نوک سرریز بزرگترین ابعاد خلأ بوجود آمده را دارند. مقادیر بیشترین سرعت نیز بعد از عبور از سرریز در کناره‌ها بوجود آمده است که بیشترین عمق تشکیل شده در پایین‌دست نیز در این قسمت است. آشفتگی‌های ایجاد شده ناشی از برخورد جریان به دیواره‌های کانال نیز قابل توجه هستند. در این محدوده چرخشی کامل در جریان و به سمت دیواره خارجی سرریز شکل می‌گیرد. همچنین سرریز مستقیم و با زاویه ۱۸۰ درجه نیز یک جریان به صورت یکنواخت و بدون ایجاد خلأ را دارد.

سال نهم شماره سی و پنجم بهار ۱۳۹۸

نیمرخ عرضی در ابتدای مقطع
سرریز مثلثی

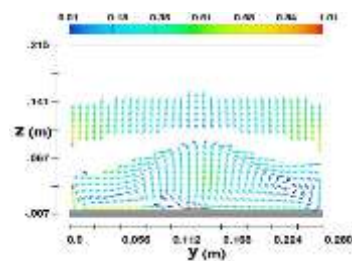
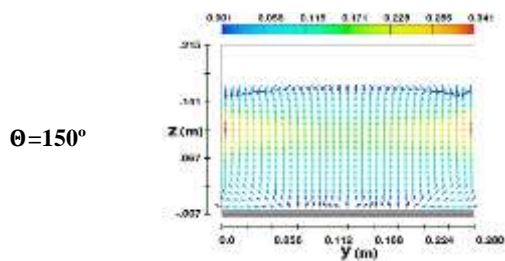
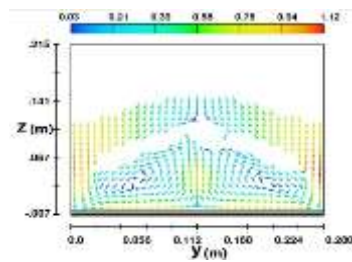
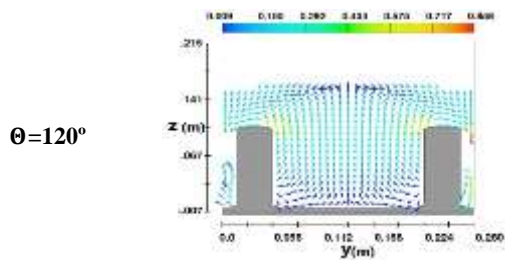
نیمرخ عرضی در میانه‌ی مقطع
سرریز مثلثی

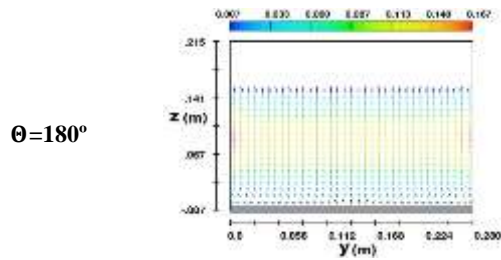
نیمرخ عرضی در انتها و نوک مقطع
سرریز مثلثی



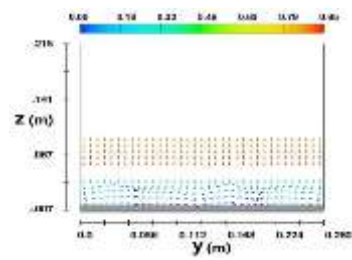
نیمرخ عرضی در ابتدای مقطع سرریز مثلثی

نیمرخ عرضی در انتها و نوک مقطع سرریز مثلثی



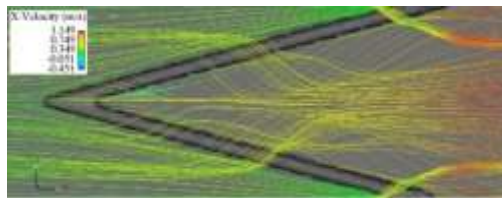


$\theta=180^\circ$

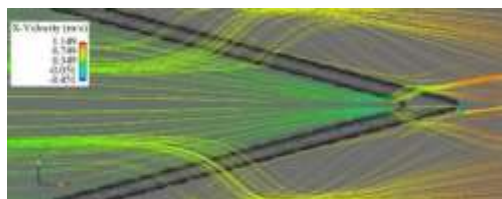


شکل (۱۲): توزیع سرعت درمقاطع مختلف عرضی اطراف سرریز

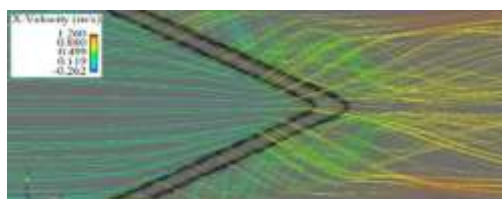
بالادست و پایین دست برای سرریز با زاویه ۹۰ درجه است که با توجه به شکل این اختلاف برابر ۲ m/s است.



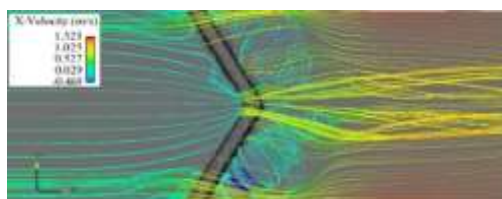
سرریز با زاویه‌ی رأس ۳۰ درجه در مدل سازی عددی (Kumar et al. 2011)



سرریز با زاویه‌ی رأس ۳۰ درجه در نمونه عددی



سرریز با زاویه‌ی رأس ۶۰ درجه در مدل سازی عددی



سرریز با زاویه‌ی رأس ۹۰ درجه در مدل سازی عددی

شبیه سازی خطوط جریان عبوری از سرریز

یکی از مشخصه های جریان که کمک زیادی به شناخت رفتاری آن می کند خطوط شکل گرفته جریان است. همانطور که در شکل ۱۳ مشاهده می شود خطوط جریان در زاویه بهینه مدل آزمایشگاهی با رسیدن به محدوده جریان شروع به حرکت به سمت مقطع میانی می کنند و از دیواره های کناری دور شده و در نهایت در پایین دست و در وسط کانال ریزش دارند. مقداری از جریان باقی مانده و عبور نکرده نیز نهایتاً در انتهای کناری سرریز به سمت داخل ریزش دارند. عمق جریان به دلیل ریزش بیش از حد در مرکز کانال از سایر محدوده ها بیشتر می باشد. تمام این خطوط در دو طرف سرریز به دلیل تقارن ابعاد سرریز، به صورت متقارن شکل گرفته است. این شکل از خطوط جریان دقیقاً رفتاری خلاف مقادیر سرعت دارند. در واقع مطابق شکل ۱۰ مقادیر حداکثری سرعت در وسط کانال و به مقدار ۱/۱۵ m/s است و در کناره ها نیز این مقادیر کمتر است. اما برای سرریزهای مدل شده در تحقیق حاضر مشاهده می شود که جریان نزدیک شده به میدان سرریز در کناره ها که مقادیر سرعت کمتر است (شکل ۹) ابتدا از سرریز عبور کرده و وسط جریان که مقادیر سرعت بیشتر است به نوک سرریز رسیده و از آن عبور می کند. جریان عبوری از روی سرریز با برخورد به دیواره های کناری منحرف شده و ایجاد آشفتگی نیز می کند. همانطور که مشخص است سرعت بعد از عبور از سرریز دارای مقادیر بیشتری نسبت به بالادست سرریز است. مقادیر حداکثر سرعت برای زاویه های ۹۰ و ۱۲۰ درجه برابر با ۱/۵ m/s است که در هر دو حالت در کناره های کانال مشاهده می گردد. بیشترین تفاوت سرعت در

سال نهم شماره سی و پنجم بهار ۱۳۹۸

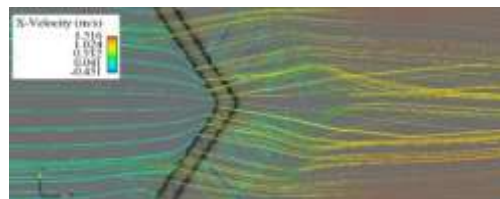
که سرریز ارائه شده در تحقیق حاضر دارای میانگین رشد ۶ درصدی نسبت به سرریز آزمایشگاهی بوده است.

- بیشترین مقدار ضریب آبگذری مربوط به زاویه ۱۵۰ درجه است که دارای رشد ۸/۵ درصدی نسبت به سرریز مدل شده آزمایشگاهی با زاویه مشابه است. زاویه سرریز بهینه تحقیق حاضر و زاویه بهینه ارائه شده توسط Kumar et al. (2011) مکمل یکدیگر هستند. این نتیجه نشان دهنده آن است که زاویه سرریز نیز علاوه بر طول سرریز، که در دو حالت بهینه عددی (۱۵۰ درجه) و آزمایشگاهی (۳۰ درجه) است، از تأثیرگذارترین پارامترها در افزایش ضریب آبگذری در این نوع سرریز است.

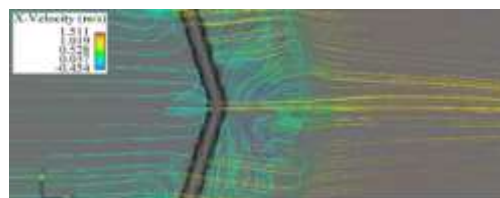
- تغییرات فشار نشان می‌دهد که با افزایش زاویه سرریز، مقادیر حداقلی فشار از سرریز دور شده و فشارهای حداکثری در راستای نوک دماغه خارجی سرریز و نزدیک جداره‌های کانال شکل می‌گیرد. حداکثر مقدار فشار در پایین دست سرریز ۱۱۰۰ پاسکال در سرریز ۹۰ درجه و حداقل فشار ۱۰ پاسکال در سرریز ۱۲۰ درجه مشاهده شده است.

- با بررسی جریان در مقطع عرضی، می‌توان به این نتیجه دست یافت خلأ موجود در جداره‌های خارجی سرریز، ایجاد حالت آشفتگی در پایین دست جریان را نشان می‌دهد. هرچه زاویه سرریز افزایش می‌یابد این گردابه و خلأ بزرگتر می‌شود. با نزدیک شدن به نوک سرریز، جریان توأمان از کناره و نوک سرریز عبور می‌کند.

- نتایج توزیع سرعت و تغییرات خطوط جریان نشان دهنده انطباق مقادیر توزیع سرعت در عرض کانال با نحوه عبور و شکل‌گیری خطوط جریان برای سرریز پیشنهادی تحقیق حاضر است. می‌توان نتیجه گرفت که قسمتی از جریان از کناره‌های کانال و قسمتی دیگر از وسط کانال و دماغه سرریز عبور می‌کند. ولی با افزایش زاویه رأس، جریان از تمام طول سرریز عبور می‌کند. بیشترین سرعت



سرریز با زاویه‌ی رأس ۱۲۰ درجه در مدل‌سازی عددی



سرریز با زاویه‌ی رأس ۱۵۰ درجه در مدل‌سازی عددی

شکل (۱۳): نمایش خطوط جریان و سرعت در سرریزهای مثلثی در پلان

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر سرریز لبه تیز با مقطع مثلثی در پلان و رأس در پایین‌دست با استفاده از مدل عددی FLOW-3D مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. نتایج مدل آزمایشگاهی Kumar et al. (2011) نیز برای صحت سنجی و همچنین مقایسه تغییرات مشخصه های جریان با سرریز ارائه شده در تحقیق حاضر استفاده شد. زوایای سرریز مورد استفاده ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ درجه بوده است که هرکدام برای ۱۰ دبی مختلف در محدوده ۰/۰۰۲ تا ۰/۱۲۵ متر مکعب بر ثانیه مدل‌سازی شد نتایج حاصل از این پژوهش به صورت زیر است:

- بهترین مدل آشفتگی در این تحقیق مدل RNG بوده است که مقادیر شاخص‌های آماری برای آن $R2=0.9998$ و $RMSE=0.0004$ و $MAE=0.0004$ بوده است. این مقادیر با توجه به اندازه مش بهینه بدست آمده است.
- این نرم افزار مقادیر ضریب آبگذری (Cd) را با دقت بالا و با ضریب همبستگی $R2=0.9996$ پیش‌بینی و محاسبه کرد.
- مقایسه نتایج ضریب آبگذری مدل عددی سرریز لبه تیز مثلثی در پلان (رأس در پایین‌دست) با سرریز آزمایشگاهی (رأس در بالادست) نشان داد

در سرریز با زاویه ۹۰ درجه است که مقدار آن برابر با $1/5 \text{ m/s}$ است.

منابع

- حسینی، خ.، م. فضل اله نژاد، ح. کرمی و س. فرزین. ۱۳۹۵. تحلیل جریان در سرریز و سازه استهلاک انرژی سد گلورد نکا به کمک روش‌های عددی. نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق آبی. سال ۳، شماره ۱۱، ص ۱-۱۱.
- حقی آبی، ا.، ب. عباسپور، ع. ملکی و ح. ترابی پوده. ۱۳۹۵. شبیه‌سازی عددی الگوی جریان بر روی سرریزهای با مقطع افقی مثلثی و مقایسه با سرریز خطی با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D. مجله مهندسی منابع آب، دوره ۹، شماره ۲۹، ص ۱۲۵-۱۳۷.
- حیدرپور، م.، س. ح. رضویان، ی. حسینی. ۱۳۹۳. مطالعه جریان همزمان از زیر یک دریچه کشویی و روی یک سرریز لبه تیز دوزنقه‌ای. مجله علوم آب و خاک دانشگاه صنعتی اصفهان. دوره ۱۸، شماره ۶۸، ص ۱۴۷-۱۵۶.
- داود مقامی، د.، ح. بانژاد، م. صانعی و س. ا. محسنی موحد. ۱۳۹۶. مطالعه آزمایشگاهی و عددی مشخصات جریان عبوری از سرریز لبه‌تیز در اثر بالآمدگی بستر بالادست. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، سال ۲۴، شماره ۱، ص ۲۶۵-۲۷۸.
- شبیه‌سازی مسائل هیدرولیکی در Flow 3D. مولف: مهندس فیروز قاسمزاده. ۱۳۹۶.
- عامری، م.، ا. احمدی و ا. دهقانی. ۱۳۹۴. تعیین ضریب دبی سرریزهای جانبی لبه تیز مرکب مثلثی-مستطیلی. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، سال ۲۲، شماره ۳، ص ۱۰۵-۱۲۰.
- غفاری، س.، ا. اقبال‌زاده و م. جوان. ۱۳۹۵. بررسی عددی اثر عدد فرود بالادست بر الگو و مشخصات جریان در امتداد سرریز جانبی لبه تیز مستطیلی. مجله مهندسی عمران تربیت مدرس، دوره ۱۶، شماره ۲، ص ۲۱۵-۲۲۸.
- فرزین، س.، ح. کرمی، ف. یحیی و ش. نیر. ۱۳۹۶. بررسی عددی مشخصات هیدرولیکی جریان اطراف سرریز لبه تیز. پژوهش‌های عمران و محیط زیست، انتشار آنلاین، Flow3D تیز قائم و مورب با شبیه سازی در نرم افزار . DOI: 10.22091/CER.2017.1661.1068 .
- Bagheri, S., and M. Heidarpour. 2010 Application of free vortex theory to estimating discharge coefficient for sharp-crested weirs. *Biosystems engineering*, 105(3): 423-427.
- Borghai, S. M., Z. Vatannia, M. Ghodsian, and M. R. Jalili. 2003. Oblique rectangular sharp-crested weir. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water and Maritime Engineering*, 156(3):185-191.
- Bos, M. G., and J. Nugteren. 1978. *International Institute for Land Reclamation and Improvement, On irrigation efficiencies.*
- Esmayli varaki, M., and M. Safarrazavizadeh. 2013. Study on hydraulic characteristics of flow over spillways Congress with semicircular plan. *Journal of Water and Soil Science*, 27(1): 224-234.
- Falvey, H.T. 2003. *Hydraulic design of labyrinth weirs.* Reston VA: ASCE Press (American Society of Civil Engineers).
- Hirt, C. W., and K. S. Chen. 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., and B. D. Nichols. 1981. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of computational physics*, 39(1): 201-225.
- Hoseini, S. H. 2014. 3D Simulation of flow over a triangular broad-crested weir. *Journal of River Engineering*, 2(2): 1-7.

سال نهم شماره سی و پنجم بهار ۱۳۹۸

Kumar, S., Z. Ahmad, and T. Mansoor. 2011. A new approach to improve the discharging capacity of sharp-crested triangular plan form weirs. *Flow Measurement and Instrumentation*, 22(3): 175-180.

Kumar, S., Z. Ahmad, T. Mansoor, and S. K. Himanshu. 2012. Discharge characteristics of sharp crested weir of curved plan-form. *Research Journal of Engineering Sciences* ISSN, 1(4): 16-20.

Mangarulkar, K. 2010. Experimental and numerical study of the characteristics of side weir flows. PhD thesis, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada.

Noori, B. M. A., and Aaref, N. T. 2017. Hydraulic Performance of Circular Crested Triangular Plan Form Weirs. *Research Article – Civil Engineering*. Arab J Sci Eng. DOI 10.1007/s13369-017-2566-3.

Rezaee, M., A. Emadi, and Q. Aqajani Mazandarani. 2016. Laboratory study overflow rectangular Congress. *Journal of Water and Soil Science*, 29(6): 1438-1446.

Numerical investigation of flow characteristics horizontal sharp edge triangular weir with vertex at downstream

Elham Babaei^۱, Hojat Karami^{۲*}, Saeed Farzin^۳

Abstract

One of these types of weir is the sharp edges overflow, which is widely used due to the current flow pattern and ease of flow pass. In the present study, the flow characteristics of the proposed horizontal sharp edge triangular overflow with different angles of 30, 60, 90, 120, 150 and 180 degrees at downstream are simulated for 10 different discharges using the FLOW-3D numerical model. In this regard, after validation of the amount of the flow depth over the weir with valid experimental results, parameters of the discharge coefficient, pressure profile, velocity in transverse section and flow pattern have been calculated and analyzed. The results indicated the high accuracy of RNG turbulence model compared with other turbulence models with correlation coefficient $R^2 = 0.9996$. Other results showed that discharge coefficient of proposed weir increases with 6% in compared with experimental weir model (with vertex at upstream). Weir with 150-degree angle has the highest increment of discharge coefficient with about 8.5%. As the angle rises from 30 to 150 degrees, the minimum pressure range progresses from the tip of the weir and goes downwards. The maximum amount of pressure in the downstream of overflow was observed for weir with 120-degree angle with a value of 1100 Pascal. The minimum pressure of 10 pascal was obtained in a small range of 150-degree weir. As the flow approach to tip of the overflow, the flow passing from the side and tip of the overflow and has high velocity values. The maximum longitudinal velocity was observed with a value of 1.53 meter on second in a 90-degree overflow.

Keywords: Flow pattern, Horizontal sharp edge triangular weir, Flow coefficient, Numerical model, FLOW-3D.

^۱M.Sc. Student, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures,, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran. E.babaei@semnan.ac.ir

^{۲*}Assistant Professor, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran. hkarami@semnan.ac.ir

^۳Assistant Professor, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran. Saeed.farzin@Semnan.ac.ir