



بررسی تغییرات سرعت جریان در سرریز استوانه‌ای با استفاده از CFD

سعید فرزین^{1*}، حجت کرمی¹، شهاب نیر²، الهام ضمیری³

1- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

2- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه سمنان

3- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشگاه سمنان

*Saeed.farzin@semnan.ac.ir

چکیده

سرریزهای استوانه‌ای از انواع مدل‌های سازه‌های هیدرولیکی هستند که با هدف اندازه‌گیری دبی جریان، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مقاله جریان بر روی سرریز استوانه‌ای با قطر 7/5 سانتی‌متر با استفاده از مدل آشفتگی k-E در نرم افزار Flow3D به صورت سه بعدی شبیه‌سازی شد و با استفاده از نتایج آزمایشگاهی صحت سنجی انجام شد. در مدل عددی سرریز استوانه‌ای، سرعت جریان در راستاهای طول و عرض و عمق به دست آمد. نتایج نشان می‌دهد سرعت متوسط جریان از مقدار اولیه (20 cm/s) در حین عبور از سرریز به 45 (cm/s) می‌رسد که نشان‌دهنده افزایش بیش از دو برابر مقدار سرعت، هنگام عبور از سرریز است. همچنین تغییرات عدد فرود نشان دهنده افزایش مقدار عدد فرود پس از عبور از سرریز است که با تغییرات سرعت متناسب است.

واژه‌های کلیدی: سرریز استوانه‌ای، Flow3D، مدل آشفتگی k-E، پروفیل سرعت.

مقدمه

سرریزها یکی از انواع سازه‌های هیدرولیکی هستند که در حالت کلی برای تخلیه سیلاب از مخزن سد در مواقع ضروری کاربرد دارند [1]. سرریز را بسته به شرایط محل و خصوصیات هیدرولیکی به صورت‌های مختلفی می‌توان طراحی کرد. سرریزهای استوانه‌ای را می‌توان از نوع سرریزهای لبه پهن در نظر گرفت که بیشتر در سازه‌های کوتاه مورد استفاده قرار می‌گیرند و معمولاً در بدنه سد قرار داده می‌شوند [2].

از اواخر قرن 19 و پیش از ایجاد سرریزهای اوجی، استفاده از سرریز استوانه‌ای رواج یافت [1]. در دریچه‌های غلتان و سد لاستیکی از سرریز استوانه‌ای استفاده می‌شود [3]. طراحی آسان‌تر، کمتر بودن هزینه ساخت و ضریب دبی بالاتر این نوع سرریز نسبت به سایر سرریزها، سبب اهمیت سرریز استوانه‌ای می‌گردد [4].

مطالعه تجربی پدیده‌های موجود در زمینه سیالات، اطلاعات مهمی در اختیار محققین قرار می‌دهند، به دلیل محدودیت در زمان و هزینه در مطالعه‌ی تجربی، استفاده از روش‌های عددی توسعه یافته‌اند. از میان نرم‌افزارهای Flow3D، CFX و Fluent مدل Flow3D به عنوان یکی از مدل‌های عددی بسیار قوی در زمینه دینامیک سیالات برای مدلسازی انتخاب شد. این نرم‌افزار می‌تواند میدان جریان را به صورت دو بعدی یا سه بعدی تحلیل کند.



جانسون و مونتس (1998) چگونگی رفتار جریان در سرریزهای استوانه‌ای را بررسی کردند، نتایج آزمایشات آنان نشان داد که با افزایش بار کل در بالادست ضریب دبی افزایش می‌یابد [5]. وهاب‌المحمد و همکاران (2002)، جریان بر روی سرریزهای دایره‌ای شکل با قطرهای مختلف را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند و دریافتند اندازه قطر سرریز بر ضریب دبی موثر است [6]. نقوی و همکاران نیز سرریز استوانه‌ای را به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار دادند و دریافتند ضریب دبی در این نوع سرریزها به مقداری بالاتر از یک می‌رسد و مقادیر فشار و سرعت در سرریز استوانه‌ای مورد بررسی قرار دادند [7]. اسماعیلی و همکاران (1389) تغییرات فشار و سرعت در سرریز استوانه‌ای را به طور آزمایشگاهی اندازه گرفتند و با نتایج مدلسازی Fluent مقایسه کردند. نتایج به دست آمده نشان دهنده تطابق بالای الگوی جریان روی سرریز در آزمایشگاه و نرم افزار است [8].

با توجه به تحقیقات انجام شده، به نظر می‌رسد مطالعات چندانی در خصوص مدلسازی سرریز استوانه‌ای و بررسی خصوصیات جریان و سرعت روی این سرریز با نرم افزار Flow3D انجام نشده است لذا در این پژوهش سعی شده تغییرات سرعت جریان در سرریزهای استوانه‌ای با استفاده از مدل آشفتگی K-E تعیین شود، تا قابلیت این مدل در شبیه سازی وضعیت جریان در سرریزها ارزیابی شود.

مواد و روشها

تئوری جریان در سرریزهای استوانه‌ای تحت تأثیر پارامترها و خصوصیات سینماتیکی، دینامیکی و هندسی است که بر اساس رابطه (1) تعریف می‌شود:

$$f(H, H_w, B, \mu, g, s, Q, R, \rho, \sigma, \delta) = 0 \quad (1)$$

که در آن، B عرض کانال، g شتاب گرانش، μ لزجت دینامیکی، s شیب کف کانال، ρ چگالی مخصوص سیال، σ کشش سطحی و δ ضریب تراکم است، همچنین شعاع استوانه، H عمق آب بالادست و H_w عمق آب بر روی سرریز است.

روشهای VOF¹ و FAVOR² مثال هایی از روش های جز حجمی هستند که در مدل Flow3D بکار می‌روند. هنگامی که جریان دارای سطح آزاد است از روش VOF استفاده می‌شود [9]. روش FAVOR یکی از روش های جز حجمی است که از آن برای شبیه سازی سطوح و اجسام صلب مثل مرزهای هندسی استفاده می‌شود [10]. به طور کلی، معادله پیوستگی جرم به صورت معادله (2) است:

$$v_f \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) + \zeta \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (2)$$

که v_f کسر حجمی جریان، ρ دانسیته سیال، R_{DIF} عبارت پخش آشفتگی و R_{SOR} منبع جرم هستند. مقدار ضریب بستگی به نوع سیستم مختصات دارد. اجزا سرعت (u,v,w) در جهات (x,y,z) هستند. A_x ، A_y و A_z برابر کسرهای سطحی برای جریان در جهت های x,y,z است.

معادله پیوستگی اصلاح شده بصورت معادله (3) حاصل می‌شود:

$$\frac{v_f}{\rho c^2} \frac{\partial u A_x}{\partial t} + \frac{\partial u A_x}{\partial x} + R \frac{\partial v A_y}{\partial y} + \frac{\partial w A_z}{\partial z} + \zeta \frac{u A_x}{x} = \frac{R_{SOR}}{\rho} \quad (3)$$

معادله k-E شامل دو معادله انتقال برای انرژی جنبشی و اتلاف آن است. معادله انتقال برای اتلاف آشفتگی، ϵ_T ، مطابق رابطه (4) تعریف می‌شود:

$$\frac{\partial \epsilon_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial \epsilon_T}{\partial x} + v A_y \frac{\partial \epsilon_T}{\partial y} + w A_z \frac{\partial \epsilon_T}{\partial z} \right) = \frac{CDIS1 \cdot \epsilon_T}{K_T} (P_T + CDIS3 \cdot G_T) + Diff_\epsilon - CDIS2 \frac{\epsilon_T^2}{K_T} \quad (4)$$

¹ Volume of Fluid

² Fractional Area-Volume Obstacle Representation

در رابطه (4)، CDIS1، CDIS2 و CDIS3 پارامترهای بی‌بعدی هستند که مقدارشان برای مدل $k-E$ ، به ترتیب دارای مقادیر پیش فرض $0/2, 1/92, 1/44$ هستند.

ضریب دبی در سرریز استوانه‌ای، مانند سرریز لبه پهن از رابطه باس 1978 (رابطه 5) حاصل می‌شود:

$$C_d = \frac{q}{g^{0.5} \left(\frac{2H_1}{3} \right)^{1.5}} \quad (5)$$

در رابطه (5)، C_d ضریب دبی جریان، g شتاب ثقل (m/s^2) دبی عبوری از واحد عرض سرریز ($m^3/s/m$) و H_1 ارتفاع تراز آب در بالادست می‌باشد.

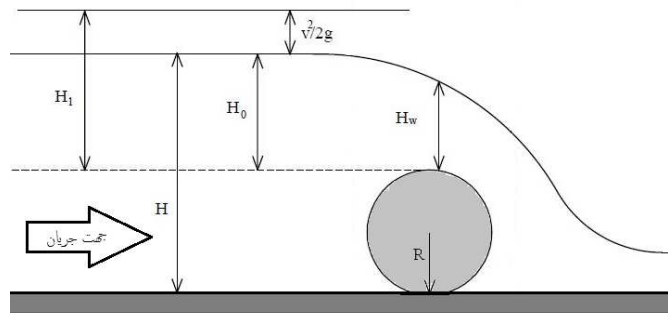
عدد فرود نسبت نیروی اینرسی به نیروی جاذبه در حرکت یک سیال را نمایش می‌دهد که از رابطه (6) حاصل می‌شود:

$$F_r^2 = \frac{\rho v^2 / l}{\gamma} \quad (6)$$

در رابطه (6)، l طول جریان، v سرعت جریان، ρ چگالی سیال و γ عدد حاصل ضرب چگالی در شتاب گرانش است.

مدلسازی

در مطالعه حاضر برای مدلسازی سرریز استوانه‌ای از اطلاعات آزمایشگاهی قره‌گزلو (1391) استفاده شده است (شکل 1) [11]. در این آزمایش دبی ورودی 2 لیتر بر ثانیه، در کانالی به طول 5 متر، عرض 7/5 سانتی متر و ارتفاع 14 سانتی متر و برروی استوانه‌ای با قطر 75 میلی متر مورد آزمایش قرار گرفت و عمق جریان بالادست سرریز، به صورت جریان آزاد در نظر گرفته شده است.



شکل (1) مدل شماتیک مدلسازی شده

برای شبیه‌سازی جریان در مدل سرریز از شرط مرزی دبی ورودی برای سطح ورودی استفاده شد. برای سطح z_{max} ، شرایط مرزی، در حالت سطح آزاد سیال است. دیوار جانبی و کف کانال به صورت دیواره و برای سطح خروجی، دبی خروجی تعریف شده است. مدلسازی‌ها با سه مدل آشفتگی $K-E$ ، LES و RNG و 2 مش بندی با تعداد مش‌های 300850 و 344448 استفاده شد. طبق نتایج به دست آمده، معیار خطای $RMSE^3$ برای مدل آشفتگی $K-E$ ، 0/2508 به دست آمده است که کمترین خطا را نسبت به دو مدل آشفتگی دیگر دارد. با کاهش تعداد مش‌ها به 300850 خطای مدلسازی نسبت به حالت فیزیکی 7/69 درصد افزایش می‌یابد. به دلیل اهمیت مقادیر پارامترهای هیدرولیکی در راستای z ، از مش‌های با ابعاد ریز تری نسبت به جهات x و y استفاده شد. برای 344448 عدد مش مدلسازی شده با مدل آشفتگی $K-E$ ، مقدار معیار خطای $RMSE$ برای H_w/R برابر با 0/2508 و برای ضریب دبی و دبی به ترتیب برابر با 0/005 و 0/013 به دست آمده است که نشان دهنده تطابق بالای نتایج مدلسازی عددی با نتایج آزمایشگاهی می‌باشد.

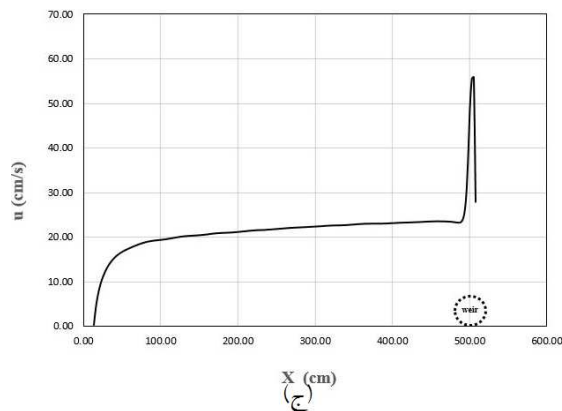
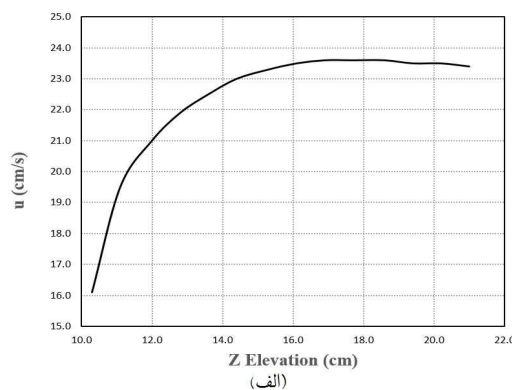
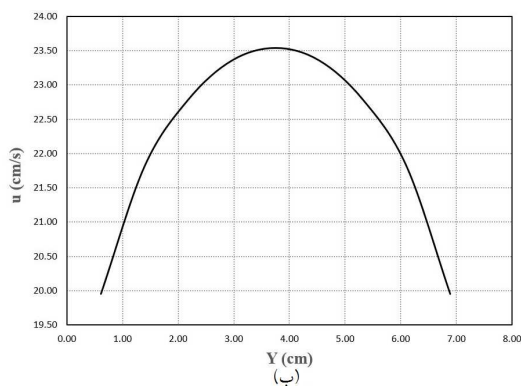
نتایج و بحث

³ Root Mean square Error

الف- بررسی تغییرات 3 بعدی سرعت

در مطالعه آزمایشگاهی انجام شده فقط به بررسی ضریب آگذری سرریز پرداخته شده است و خصوصیات جریان و سرعت، مورد بررسی قرار نگرفته است.

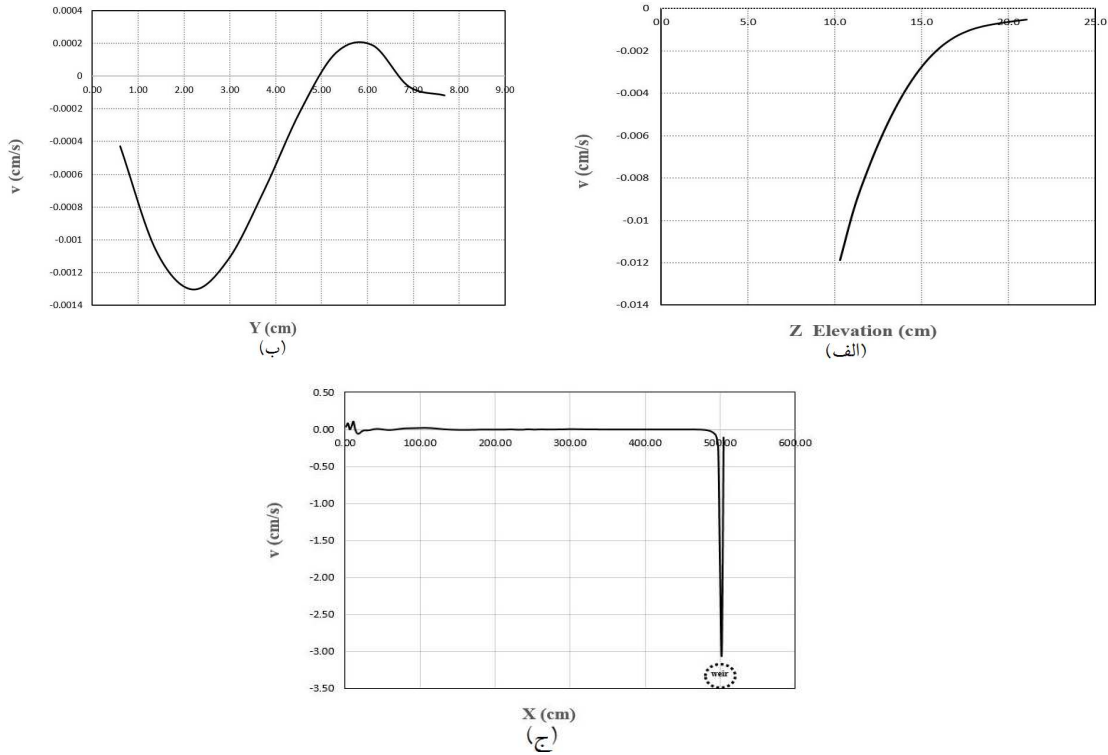
در تحقیق حاضر از نتایج مدل عددی جهت بررسی خصوصیات سرعت جریان پیرامون سرریز استفاده شده است. سرعت در جهت X با u، در جهت y، v و در جهت Z با w نشان داده شده است. همچنین سرعت برآیند با $V = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$ نمایش داده می شود. شکل (2-الف) تغییرات سرعت طولی جریان (u) نسبت به عمق کانال را نشان می دهد. نتایج این نمودار حاکی از آن است که با افزایش عمق آب در مقطع، سرعت به تدریج افزایش می یابد. همان طور که شکل (2-ب) نشان می دهد پارامتر سرعت طولی در عرض به تدریج افزایش یافته و در نیمه آن به بیشترین مقدار خود رسیده و دوباره کاهش می یابد. در ادامه تغییرات سرعت در راستای طولی کانال در شکل (2-ج) نشان داده شده است و نتایج آن بیان کننده آن است که نرخ سرعت در این راستا افزایش می یابد و با رسیدن جریان به سرریز، مقدار سرعت رشد چشمگیری داشته و پس از عبور از آن دوباره کاهش می یابد.



شکل (2) تغییرات سرعت طولی (u) در: الف- (y=0/0375m, x=4/7m) ب- (z=0/094m, y=0/0375m) ج- (z=0/094m, x=4/7m)

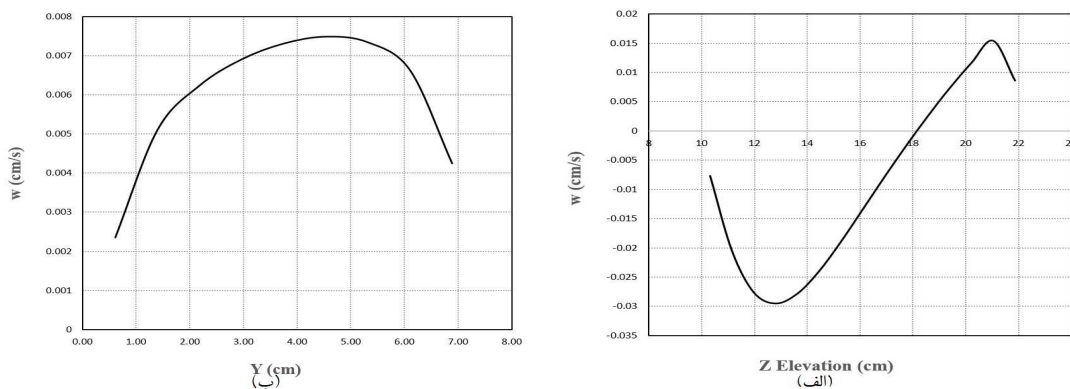
از بررسی شکل (3-الف) مشخص می شود سرعت عرضی (v) جریان در عمق کانال از مقداری بسیار کم به صفر نزدیک می شود و با نزدیک شدن جریان به سطح، تحت تاثیر سرعت طولی زیاد، از مقدار آن کاسته می شود. بررسی پارامتر سرعت عرضی در عرض کانال در شکل (3-ب) نشان می دهد که جریان از وسط عرض کانال به سمت کناره ها تمایل دارد. همچنین پروفیل سرعت عرضی در طول کانال در

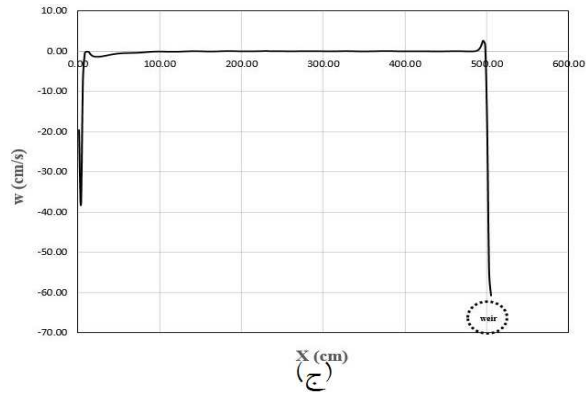
شکل (3-ج) نشان می‌دهد با عبور جریان از روی سرریز، مقدار سرعت به شدت افزایش یافته و سپس با دور شدن از سرریز، مقدار آن کاهش می‌یابد.



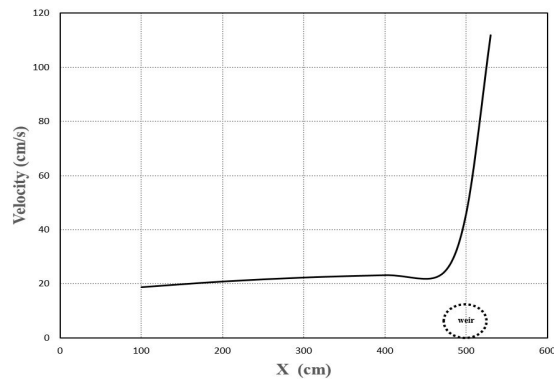
شکل (3) تغییرات سرعت عرضی (v) در: الف- $(y=0/0375m, x=4/7m)$ ، ب- $(z=0/094m, y=0/0375m)$ ، ج- $(z=0/094m, x=4/7m)$

در ادامه شکل (4-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، سپس روند کاهشی در پیش گرفته تا به مقدار صفر می‌رسد و مجدداً افزایش می‌یابد. شکل (4-ب)، نمایانگر پروفیل w نسبت به عرض کانال است، که نتایج آن مشخص کننده سیر صعودی سرعت تا $0/0075$ سانتی متر بر ثانیه و سپس سیر نزولی آن است که مشابه تغییرات سرعت طولی جریان در عرض کانال است. روند تغییرات سرعت w نسبت به طول کانال در شکل (4-ج) مشخص شده است، نتایج حاکی از آن است که مقدار سرعت در این راستا تا قبل از رسیدن جریان به سرریز تقریباً ثابت است، سپس با رسیدن جریان به سرریز افزایش می‌یابد که علت آن هم ریزش جریان از سرریز است. تغییرات سرعت متوسط جریان در شکل (5) مشخص شده است. سرعت متوسط جریان نیز در حین عبور از سرریز به سرعتی بیش از 2 برابر بزرگتر از سرعت اولیه می‌رسد و پس از عبور از سرریز نیز به روند افزایشی خود ادامه می‌دهد.





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



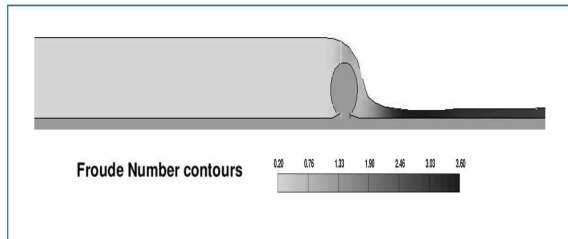
شکل (5) تغییرات سرعت متوسط در $(z=0/094m, y=0/0375m)$

ب- بررسی بردار سرعت

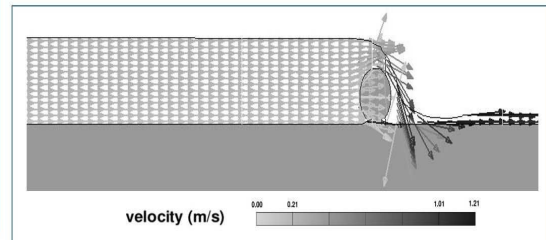
مقدار بردار برآیند سرعت در صفحه xz به فرم $(xz / \sqrt{u^2 + w^2})$ و زاویه آن به صورت $(\arctan(w/u))$ تعریف می‌شود. شکل (6)، بردارهای سرعت جریان در راستای طول را نمایش می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد سرعت جریان پس از عبور از سرریز، افزایش قابل توجهی می‌یابد. همچنین بردارهای سرعت تا پیش از رسیدن به سرریز، با هم موازی بوده اما در لحظه عبور از روی سرریز، شکلی نامنظم به خود می‌گیرند.

ج- بررسی تغییرات عدد فرود

نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد، عدد فرود از ابتدای طول کانال تا قبل از رسیدن جریان به سرریز دارای مقداری تقریباً ثابت و زیر بحرانی است، در حین عبور جریان از سرریز، این مقدار افزایش یافته است و به حالت فوق بحرانی میل می‌کند. همچنین عدد فرود پس از عبور از سرریز رشد قابل توجهی داشته‌است که به دلیل رابطه‌ی مستقیم عدد فرود با سرعت رخ می‌دهد و پس از عبور از سرریز نیز همچنان افزایش می‌یابد و به حالت فوق بحرانی می‌رسد. (شکل 7).



شکل (7)



شکل (6)

شکل (6) نمایش بردارهای سرعت در راستای طول در نیمرخ طولی کانال
شکل (7) بررسی تغییرات عدد فرود در نیمرخ طولی کانال ($y=0/0375m$)

نتیجه‌گیری

در این مدل‌سازی، جریان عبوری از سرریز استوانه‌ای در کانال مستطیلی شبیه‌سازی گردید. نتایج نشان دهنده آن است که سرعت جریان در هر سه راستا هنگام عبور از سرریز، افزایش یافته‌است. سرعت جریان در راستای X و Y نسبت به طول کانال در مقاطع پس از سرریز، مقدار بیشتری نسبت به مقاطع قبلی دارد و همین امر موجب افزایش عدد فرود در مقاطع پس از سرریز گردیده و به حالت فوق بحرانی رسیده است. همچنین سرعت متوسط نیز تا قبل از رسیدن به سرریز به تدریج افزایش یافته‌است و از مقدار اولیه 20 (cm/s) ، در حین عبور از سرریز به 45 (cm/s) می‌رسد که مقداری بیش از 2 برابر مقدار سرعت اولیه است. همچنین بردارهای سرعت در راستای طول تا پیش از رسیدن به سرریز، موازی با یکدیگر بوده و پس از عبور از آن، نامنظم شدند.

منابع

- [1] ورجاوند، پ.، فرسادی زاده، د. خسروی نیا، پ. رفیعی، ز. (1385). "شبیه‌سازی جریان در سرریزهای استوانه‌ای با استفاده از مدل Fluent و مقایسه نتایج با مدل فیزیکی"، مجله دانش آب و خاک، جلد 20/1، شماره 2.
- [2] قره‌گزلو، م.، مسعودیان، م. (1390). "اثر قطر و هد آب روی سرریز استوانه‌ای روی ضریب دبی"، چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- [3] هنر، ت.، مظلوم شهرکی، ص. (1393). "تحلیل ضریب دبی سرریزهای جانبی استوانه‌ای و نیم استوانه‌ای در جریان‌های زیر بحرانی"، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، سال هجدهم، شماره شصت و نهم.
- [4] سوری، ا.، مسعودیان، م. کردی، ا. راتچر، ک. (1393). "بررسی آزمایشگاهی تغییرات ضریب دبی و افت انرژی در سرریز-دریچه استوانه‌ای با حرکت قائم"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، جلد 44، شماره 4.



[5] Chason, H., and Montes, J. S. (1998). "Over flow characteristics of circular weirs: Effects of inflow conditions". J Irrig and Drain Engin, ASCE, 124: 152-161.

[6] Gabbar Al Babely, E., Wahab AAl Muhammad, A. and Akram Al, M. (2011). "Overflow Characteristic of Cylindrical Shape Crest Weirs Over Horizontal Bed". Tikrit Journal of Engineering Sciences, Vol.18, 4: 92-39.

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

[8] اسماعیلی، ک.، نقوی، ب. کورش وحید، ف. یزدی، ج. (1389). "مدل سازی آزمایشگاهی و عددی الگوی جریان در سرریزهای استوانه‌ای"، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد 24، شماره 1.

[9] شاه‌رخ، م. (1387). "مقایسه انواع مدل‌های توربولانس در جریانهای آشفته"، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران.

[10] شجاعیان، ز.، کاشفی‌پور، س. م. (1390). "شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش سد مخزنی نمود"، نشریه دانش آب و خاک، جلد 23، شماره 2.

[11] قره‌گزلو، م. (1391). "بررسی آزمایشگاهی جریان همزمان از مدل ترکیبی سرریز-دریچه‌ی استوانه‌ای"، پایان‌نامه کارشناسی

ارشد، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری.