

Numerical Simulation of Flow over Sharp- and Broad-Crested Weirs with Horizontal and Sloping Crests in a Channel Bend

Mahdi Yasi^{1*}, Nadereh Salamat Ravandi²

¹ Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran, Karaj Paradise, Karaj, IRAN

² Lecturer, Department of Soil and water, University of Salaheddin, Arbil, Iraq

*Corresponding Author: m.yasi@ut.ac.ir

Received: 15 Dec. 2021
Accepted: 17 June 2022



Homepage: ijwer.uoz.ac.ir

Abstract: The main aim of the present study was to simulate flow pattern upstream of sharp- and broad-crested weirs across a 90-degree laboratory channel bend, using the FLOW-3D model. The results indicated that Modeling results were not sensitive to the turbulent mixing length and roughness heights of the channel. Moreover, horizontal crested weirs are sufficient outside the bend. Sloping crest weirs provide better convergence of the unit flow rates across the bend in sections between 30 and 60 degrees. It was proved that the slope of the weir crest is to be in the range of 2° to 5° toward the outer bank of the bend. The broad-crested weirs are superior within the channel bend. Simulation results from the two FLOW-3D and FLUENT models are almost identical for flow patterns around the weirs.

Keywords: Broad-crested weir, Channel bend, FLOW-3D, FLUENT, Sloping-crested spillway

Introduction: The construction of water structures such as spillways in the longitudinal curvature of rivers is not appropriate (Ayaseh, 2011), and causes asymmetric distribution of water and sediment flow throughout the river and along the tributary, uneven water load along the river, unbalanced operation of sluices, differences on the left and right banks capacity of the river and problems in the operation stages.

There is a long history of flow studies in waterway turns (Chanel and Doering, 2008; Abad and García, 2014). The secondary current in the curvature causes a causal slope in the water surface from the outer arch to the inner arch and lateral pressure across the width, interacts with the non-uniform longitudinal velocity profile, and creates a helical flow in the output area of the bend (Yasi and Valimohammadi Moghim, 2016; Hoseini Mobarra and Yasi, 2017).

One of the hypotheses to establish a more uniform distribution of flow across the river bend is to change the transverse floor profile to sloping (Abdolahpour, 2010).

FLOW-3D has a good capability for modeling complex systems (Chanel and Doering, 2008; Developer of software for computational fluid dynamics (Flow Science Inc.), 2008). Thus, in the present study it is applied to simulate overflows in a waterway turn and to detect the effects of inclined crest on the flow pattern.

Material and Methods: The FLOW-3D model is capable of simulating the flow of the overflows at the turn of a waterway. This model simultaneously solves the three-dimensional equations of continuity and Navier-Stokes, Equations (1) and (2), (Paul et al., 2008). The model applies the FAVOR leveling method to take into account solid boundary geometry (Fig. 1), and the VOF fluid volume method to simulate the flow with a free surface.

Input boundary experiences fixed yield, constant pressure governs output boundary condition, and for the rest of the boundaries, the condition of symmetry was considered. The FLOW-3D model is calibrated and adjusted for three-flow, low-medium, and high-flow conditions based on the results of experimental flow tests in the flume screw interval. The simulation process in the FLOW-3D model is shown in the display process in Fig. 2.

In this study, the flow pattern at six cross-sections (upstream, inlet or zero degrees, 30, 60, 90 degrees, and downstream of the turn) were derived, for three states 1) there was a sharp-crest overflow, 2) there was a wide-crest weir, and 3) there was no overflow. The experiments were performed under low (26 liters per second), medium (45 liters per second), and high (58 liters per second) flow.

Results and Discussion: Ensuring the calibration and validation process of the FLOW-3D model, the results were compared with similar experimental results for 16 sharp-crest weir tests and 16 wide-crest weir tests, also compared with results from the FLUENT simulator model.

The results were presented for each of the weir installation sections (in the interval of twice the width of the flume from the upstream of the overflow to twice the width of the flume from downstream of the weir), and for the weir with horizontal and inclined crest. The results show that canal discharge for the state of the installed (sharp or wide-crest) weir is more than for the state where a weir was not installed, Fig. 3. Moreover, it shows that inclined-crest overflows cause discharge distribution per unit width (q) to be more non-uniform across the upstream section control of the weir. Therefore, horizontal-crest overflows (sharp or wide-crest) are more suitable for the upstream section of the curvatures.

Fig. 4 indicates that both horizontal-sharp-crest and wide-crest overlays produce a more uniform flow (q) in the initial section (zero degrees). However, the wide-crest overflow performs better, and the sharp-crest overflow increases the discharge intensity toward the outer wall.

According to Fig. 5, for the cross-section located at 30° , when there is no overflow the maximum velocity occurs at the inner walls of the bend. Although the flow shows similar behavior where a wide or sharp crest weir was installed, installing a weir decreased the measure of speed changes.

Investigation of the effect of overflow on flow pattern at 60° showed that a horizontal-sharp-crest overflow causes to deviate the maximum velocity and consequently discharge to the middle of the weir crest, while the horizontal wide-crest overflow causes the maximum velocity to deviate towards the outer wall, Fig. 6.

The flow pattern at 90° (Fig. 7) shows that a horizontal sharp-crest overflow causes to deviate the maximum velocity towards the inner wall, while the horizontal wide-crest overflow deviates it to the middle of the weir crest.

Conclusion: This research simulates an overflow (sharp or wide-crest) in different sections of a 90° bend with FLOW-3D to derive the flow pattern. The results showed that in all cross-sections, the wide-crest weirs have a better performance than the sharp-crest weirs. The horizontal-crest overflow is more effective than an overflow with an inclined crest in the upstream, beginning, end, and downstream cross-sections, although, inclined-canopy overflows distribute the flow more uniformly. Moreover, the flow patterns obtained by both FLOW-3D and FLUENT numerical models are the same and satisfactory, however, the FLUENT model products better the flow velocities in the boundary layer (near walls).

© 2022 University of Zabol, Zabol, Iran.



This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

شبیه‌سازی جریان بر روی سرریزهای لبه‌تیز و لبه‌پهن با تاج افقی و شیب‌دار در پیچ یک آبراهه

مهدی یاسی^{۱*}، نادره سلامت راوندی^۲

^۱ دانشیار، گروه مهندسی آبیاری، دانشگاه تهران، پردیس کرج، کرج، ایران
^۲ مربی آموزشی، گروه مهندسی خاک و آب، دانشگاه صلاح‌الدین، اربیل، عراق

*پست الکترونیکی نگارندهٔ مسئول: m.vasi@ut.ac.ir

وبگاه نشریه: ijwer.uoz.ac.ir



تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۳/۱۷

چکیده: احداث سرریزها در محدوده پیچ رودخانه، مشکلاتی را از نظر هدایت جریان به آبگیرهای طرفین پدید می‌آورد. یکی از فرضیه‌ها برای توزیع یکنواخت‌تر جریان در عرض پیچ رودخانه، تساوی دبی جریان در واحد عرض، از طریق تغییر پروفیل تاج سرریز از حالت افقی به حالت شیب‌دار است. هدف اصلی از تحقیق حاضر، شبیه‌سازی کارکرد سرریزها در پیچ یک آبراهه با استفاده از مدل عددی FLOW-3D و مقایسه آن با نتایج مطالعات پیشین از مدل فیزیکی و مدل عددی FLUENT بوده است. در این بررسی، از نتایج ۳۲ آزمون تجربی جریان بر روی سرریزهای لبه‌تیز و لبه‌پهن، در یک فلوم آزمایشگاهی با پیچ ۹۰ درجه استفاده گردید. پایداری و حساسیت مدل FLOW-3D نسبت به پنج عامل: اندازه شبکه محاسبات، زمان مدل‌سازی، نوع مدل تلاطمی، طول اختلاط تلاطم و ضریب زبری مورد آزمون قرار گرفت. نتایج مدل FLOW-3D نیز نشان می‌دهد که در مقاطع عرضی بالادست، ابتداء، انتها و پایین‌دست پیچ، عملکرد سرریزهای با تاج افقی مناسب است. سرریزهای با تاج شیب‌دار در بازه ۳۰ تا ۶۰ درجه پیچ، و با زاویه ۲ تا ۵ درجه با افق (به سمت دیواره خارجی)، موثر هستند. شبیه‌سازی الگوی جریان برای دو مدل FLOW-3D و FLUENT عموماً همسان بوده، و متوسط درصد خطای برآورد دبی در واحد عرض سرریز از دو مدل کمتر از ۵ درصد و قابل قبول است. مدل FLUENT در شبیه‌سازی توزیع سرعت جریان در لایه مرزی (نزدیک دیواره‌ها) عملکرد بهتری نسبت به مدل FLOW-3D دارد.

کلیدواژه‌ها: سرریز لبه‌تیز، سرریز با تاج شیب‌دار، پیچ آبراهه، FLOW-3D، FLUENT

جهان نشان می‌دهد که به دلایل مختلف، این نوع سازه‌ها در محدوده پیچ رودخانه‌ها احداث می‌شوند. در سرریزها و سدهای انحرافی، توزیع نامتقارن جریان آب و رسوب در عرض پیچ رودخانه و در طول تاج سرریز، سبب غیریکنواختی بار آبی در طرفین رودخانه، کارکرد نامتعادل دریچه‌های آبگیر در اثر فرسایش یا رسوب‌گذاری، و تفاوت

۱- مقدمه

احداث سازه‌های آبی (نظیر: سرریز یا بند انحرافی، پل بند، کف بند) در بازه مستقیم رودخانه، یا در بازه مستقیم حدفاصل دو پیچ معکوس در رودخانه‌های پیچانرودی (با فاصله بیش از دو برابر عرض از پیچ) مناسب‌تر است (Ayaseh, 2011). به‌هرحال، شواهد میدانی در ایران و

ظرفیت آبیگری در ساحل چپ و راست رودخانه می‌گردد؛ و مشکلاتی را در مراحل بهره‌برداری پدید می‌آورد.

سابقه مطالعات جریان در پیچ آبراهه‌ها زیاد است (Chanel and Doering, 2008; Abad and García, 2014; Mozaffari, 2014). جریان در عرض و طول پیچ‌ها غیریکنواخت است، و در بستر متحرک به علت آبشستگی و ته‌نشینی مواد رسوبی در پیچ، بسیار پیچیده است. جریان ثانویه در پیچ، باعث ایجاد شیب عرضی در سطح آب از قوس خارجی به قوس داخلی و گرادیان فشار جانبی در عرض می‌گردد. در تعادل موضعی بین نیروی گریز از مرکز و گرادیان فشار جانبی، جریان ثانویه در داخل مقطع عرضی شکل می‌گیرد. قدرت جریان ثانویه در پیچ، حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد قدرت جریان اولیه محوری است. در اثر اندرکنش جریان ثانویه با پروفیل غیریکنواخت سرعت طولی، جریان حلزونی در ناحیه خروجی پیچ به وجود می‌آید (Hoseini Mobarra and Yasi, 2017).

یکی از فرضیه‌ها جهت برقراری توزیع یکنواخت‌تر جریان در عرض پیچ رودخانه، تساوی بده جریان در واحد عرض آبراهه از طریق تغییر پروفیل عرضی کف به حالت شیب‌دار است (Abdolahpour, 2010). مطالعات در مورد کارایی سرریزها در محدوده پیچ رودخانه‌ها، بسیار محدود است. اولین مطالعه برای آزمون سرریزهای با تاج شیب‌دار، بر روی یک سرریز کرامپ ساخته‌شده در مسیر مستقیم آبراهه شهری ملبورن، استرالیا انجام گرفته است (Ho et al., 2003). جهت علاج مشکل آبیگری در شرایط کم‌آبی، تاج سرریز با زاویه شیب حدود ۷ درجه به سمت ساحل آبیگیر ساخته شد. مطالعه بر روی مدل فیزیکی با دو مقیاس هندسی (۱:۱۰) و (۱:۳) نشان داد که شیب‌دار نمودن تاج سرریز در راستای مستقیم، مشکلات آبیگری و رسوب‌گذاری را بیشتر می‌کند و تنها در پیچ آبراهه توصیه می‌گردد.

مطالعات برای ارزیابی کارکرد سرریزهای لبه‌تیز، لبه‌کوتاه کرامپ و لبه‌پهن با تاج افقی و شیب‌دار، در پیچ یک فلوم بزرگ انجام شده است (Abdolahpour, 2010; Yasi and Valimohammadi Moghim, 2016; Hoseini Mobarra and Yasi, 2017). در این مطالعات، آزمون تجربی جریان در یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۲۴ متر، عرض ۰/۹ متر،

عمق ۰/۸ متر، با یک پیچ ساده ۹۰ درجه و شعاع انحنای نسبی ۳، انجام گرفت. جنس کف و دیواره‌ها از سنگ با ارتفاع زبری ۰/۳ میلی‌متر بود (Abdolahpour, 2010)، و ضخامت تاج سرریزهای لبه‌تیز و لبه‌پهن به ترتیب ۰/۲ و ۳۰ سانتی‌متر (Yasi and Valimohammadi Moghim, 2016) سرریزهای با تاج افقی و شیب‌دار در مقاطع مختلف از بالادست تا پایین‌دست پیچ مورد آزمون قرار گرفتند. نتایج نشان داد که استقرار سرریزهای با تاج افقی در بازه‌های مستقیم بالادست و پائین‌دست پیچ، و مقاطع ورودی و خروجی پیچ مناسب‌تر است. در محدوده میانی پیچ، سرریزهای لبه‌تیز با شیب تاج ۳ درجه (زاویه تاج سرریز نسبت به افق) به سمت دیواره خارجی؛ و سرریزهای کرامپ با شیب تاج ۲ تا ۵ درجه در مقاطع ۳۰ و ۶۰ درجه پیچ مناسب هستند (Hoseini Mobarra and Yasi, 2017). برای سرریزهای لبه‌پهن، تاج شیب‌دار با زاویه ۲ تا ۵ درجه، به ترتیب در مقاطع زاویه‌ای ۳۰، ۶۰ و ۴۵ درجه از ابتدای پیچ کارکرد بهتری دارند (Yasi and Valimohammadi Moghim, 2016).

مطالعات تجربی و مدل‌های شبیه‌سازی جریان از روی سرریزها و در سامانه سدهای انحرافی و تنظیمی، در محدوده پیچ آبراهه‌ها اندک است. در بازه مستقیم، از مدل FLOW-3D برای ارزیابی رابطه سنج بده جریان بر روی سرریز دریچه‌دار نوع اوجی استفاده گردید (Chanel and Doering, 2008). نتایج مدل در سه شرایط جریان با نتایج نظیر از مدل فیزیکی مقایسه گردید؛ که به جز برای بازشدگی‌های کوچک دریچه‌ها، تطابق خوبی نشان داد. شبیه‌سازی الگوی جریان در پیچ ۹۰ درجه، در شرایط بدون و با سرریزهای لبه‌تیز و لبه‌پهن، با استفاده از مدل عددی FLUENT و مقایسه با نتایج نظیر تجربی نشان داد که مدل عددی FLUENT قادر است توزیع عمق، سرعت متوسط عمقی و بده جریان به صورت رضایت‌بخش تولید کند (Ayaseh, 2011).

مطالعه پدیده کاویتاسیون بر روی سرریز سد دوستی به کمک FLOW-3D نشان داد که امکان وقوع پدیده کاویتاسیون در سرریز سد دوستی وجود ندارد (R. and Gh, 2011). شبیه‌سازی جریان بر روی سرریز اوجی سد نازلو با

مدل به صورت هم‌زمان، معادلات سه‌بعدی پیوستگی و ناویر استوکس را (به صورت زیر) حل می‌کند (Chanel and Doering, 2008).

$$\frac{\partial}{\partial x}(u_i A_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left(u_j A_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + G_i + f_i \quad (2)$$

که در آن، u_i سرعت جریان در جهت‌های مختصات کارتیزین x ، y و z ؛ $A_{i,j}$ کسری از سطح برای جریان که در جهت‌های x ، y و z باز هستند؛ P فشار؛ G_i شتاب حجمی؛ f_i ترم‌های لزجت؛ و V_f نسبت کسر حجمی فضای باز به جریان است.

برای تهیه هندسه مرزهای جامد جریان، از نرم‌افزار AutoCAD استفاده شده است (شکل ۱). برای شبیه‌سازی سطوح و احجام صلب مثل مرزهای هندسی آبراهه و سرریز، و برای شبکه‌بندی محاسباتی جریان از روش FAVOR استفاده گردید. در این روش، هندسه جریان با محاسبه کسر مساحت وجوه و کسر حجم هر المان شبکه که به وسیله موانعی محصور شده‌اند، تعریف می‌شود. برای مشخص کردن حدود شبکه‌بندی، بلوک‌هایی مشخص

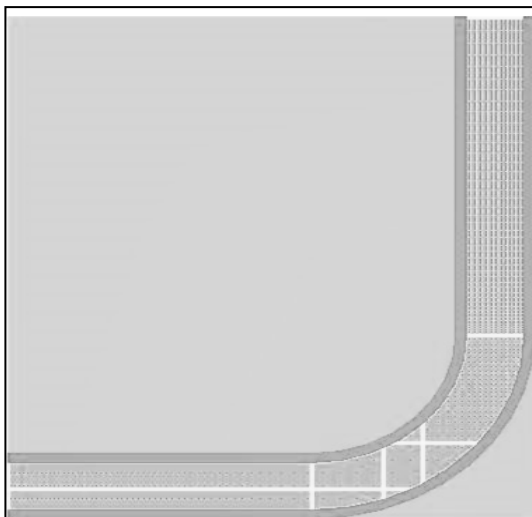
مدل FLOW-3D نشان داد که این نرم افزار قابلیت خوبی برای مدل‌سازی سرریزهای پیچیده با سامانه هوادهی را دارد (Mozaffari, 2014). FLOW-3D برای مطالعه فشار روی تاج و آبگذری از سرریز اوجی (Ho et al., 2003)، برای بررسی اثر مقیاس و اثر زبری بر جریان از روی سرریز (Kim and Park, 2005)، و در آزمون سه سرریز مختلف (Paul et al., 2008) به کار گرفته شده است.

هدف اصلی از تحقیق حاضر، آزمون قابلیت مدل عددی FLOW-3D برای شبیه‌سازی کارکرد سرریزها در پیچ یک آبراهه، و مقایسه آن با نتایج نظیر از مدل عددی FLUENT و مطالعات پیشین تجربی است.

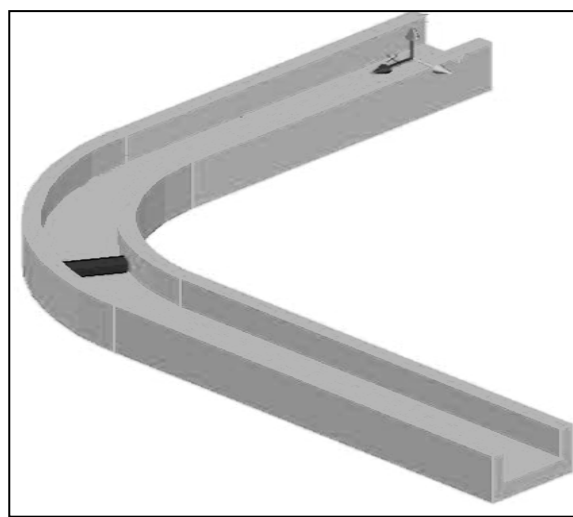
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مدل شبیه‌ساز FLOW-3D

برای شبیه‌سازی جریان بر روی سرریزها در پیچ یک آب-راهه از مدلسسسل عددی FLOW-3D استفاده گردید. این مدل توسط شرکت Flow Science در سال ۱۹۹۸ توسعه یافته است. برای مدل کردن هندسه مرزهای جامد جریان از روش سطح‌بندی FAVOR؛ و برای شبیه‌سازی جریان با سطح آزاد از روش حجم سیال VOF استفاده می‌گردد. این



(A)



(B)

Fig. 1 Solid boundary geometry (A) and numerical model networking (B)
 شکل ۱ (الف) مرزهای جامد (ب) شبکه‌بندی مدل عددی در نمای افقی فلو

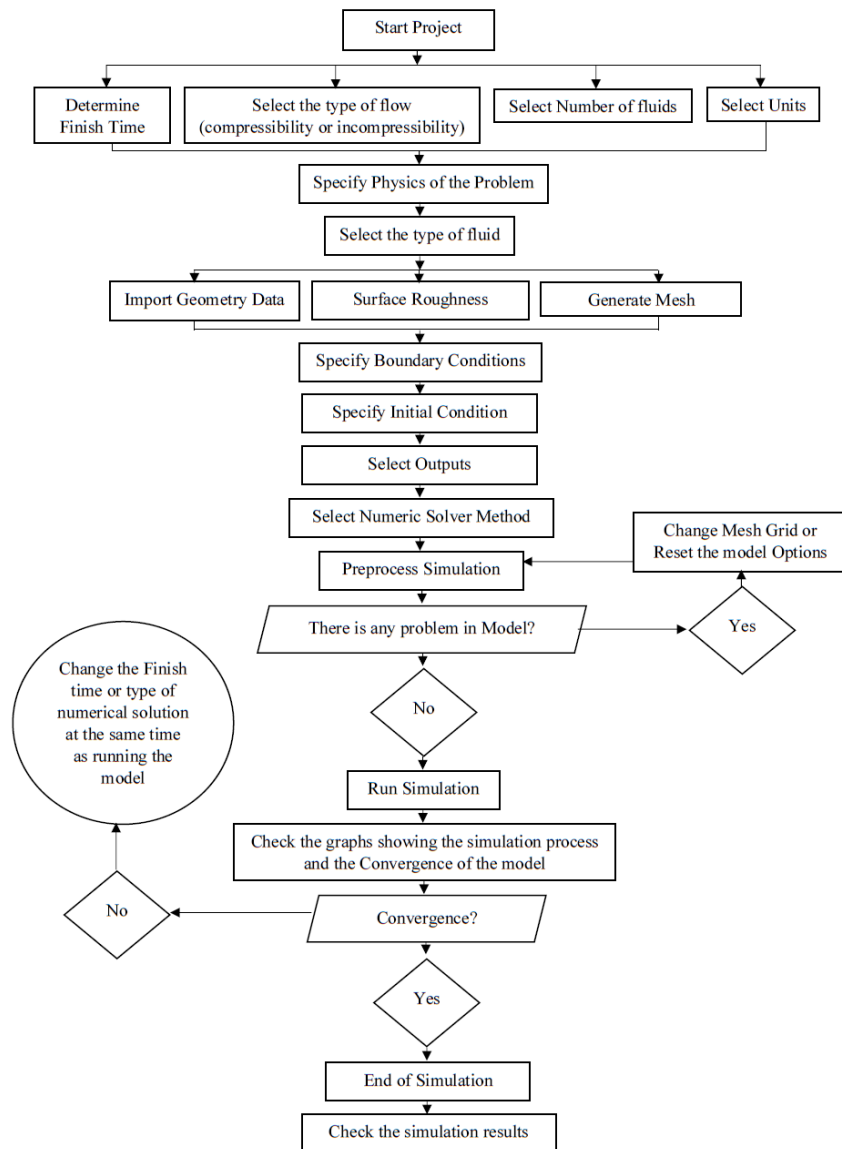


Fig. 2 Simulation process in FLOW-3D model
شکل ۲ روند شبیه‌سازی در مدل FLOW-3D

زیاد واسنجی و تنظیم گردید. روند شبیه‌سازی در مدل FLOW-3D در روندنمای شکل ۲ نشان داده شده است.

۲-۲- حساسیت سنجی و تنظیمات مدل

به منظور بررسی اثر شبکه محاسبات عددی بر روی نتایج، پنج اندازه شبکه (۶ سانتی‌متر، $8 \times 133 \times 92$ ؛ ۵ سانتی‌متر، $9 \times 160 \times 111$ ؛ ۳ سانتی‌متر، $15 \times 266 \times 185$ ؛ $2/5$ سانتی‌متر، $18 \times 320 \times 233$ ؛ و $2/25$ سانتی‌متر، $18 \times 389 \times 288$)

می‌شود که کلیه اندازه‌های سازه موردنظر و فضای آزاد در داخل آن، تعریف می‌شود.

در این بررسی مرزهای هندسه جامد جریان شامل کانال و سرریزها می‌باشد. برای شرط مرزی ورودی، بده ثابت؛ برای شرط مرزی خروجی، فشار ثابت؛ و برای بقیه مرزها، شرط تقارن در نظر گرفته شد. مدل FLOW-3D بر اساس نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی جریان در بازه پیچ فلوم، برای شرایط بدون و با سرریز، و تحت سه جریان کم، متوسط و

جدول ۱ درصد خطای متوسط دبی جریان در واحد عرض، نسبت به داده‌های تجربی در اندازه شبکه‌های متفاوت

Table 1 Percentage error of average flow rate per unit width compared to experimental data in different grid sizes

Weir location	Upstream of the bend	Bend entrance 0°	At bend 30°	At bend 60°	Bend exit 90°	Downstream of the bend
Grid size (m)						
0.03	15.7	9.3	10.4	10.8	11.7	11.4
0.025	10	6.2	9.4	9.0	9.0	8.7
0.0225	5	5.1	3.0	2.0	3.6	6.0

مورد استفاده قرار گرفت. نتایج مربوط به عمق آب، سرعت - های متوسط عمقی، و بده واحد عرض در مقاطع مختلف پیچ مورد بررسی قرار گرفت. برای دو شبکه بزرگ‌تر ۵ و ۶ سانتی‌متری، خطای محاسباتی خیلی بیشتر از ۵ درصد و غیرقابل قبول بود.

برای سه شبکه ریزتر، درصد خطای بده جریان واحد عرض، در مقاطع مختلف، نسبت به داده‌های تجربی در جدول ۱ مقایسه شده است. نتایج مدل به اندازه شبکه محاسباتی حساسیت زیادی نشان داد. با کوچک‌تر کردن اندازه شبکه، نتایج مدل‌سازی تغییر قابل ملاحظه‌ای نداشت، ولی زمان اجرای مدل از ۳۰ ساعت (برای شبکه ۲/۲۵ سانتی‌متر) به حدود ۵۰ ساعت (برای اندازه ۲ سانتی‌متر) افزایش می‌یافت. با توجه به نتایج پایداری مدل در شبیه‌سازی جریان، اندازه شبکه معادل (۲/۲۵ سانتی‌متر) انتخاب شد.

مطالعه از مدل تلاطم RNG استفاده گردید. (2001; Chanel and Doering, 2008). بنابراین در این مطالعه از مدل تلاطم RNG استفاده گردید.

برای بررسی حساسیت مدل به ارتفاع زبری، ابتدا ارتفاع معادل زبری بستر برابر با ۰/۰۰۳ متر (ارتفاع زبری بستر سنگ فلوم) قرار داده شد. سپس مدل برای ۱۰ برابر کمتر و بیشتر زبری (۰/۰۳، ۰/۰۰۳ و ۰/۰۰۳ متر) مورد آزمون قرار گرفت. بنابراین ارتفاع زبری معادل ۰/۰۰۳ متر) مشابه مدل‌سازی با (FLUENT) در نظر گرفته شد. بر اساس راهنمای نرم‌افزار، مقدار طول اختلاط تلاطم به صورت ۷ درصد از طول مشخصه هر شبیه‌سازی تعریف می‌گردد. طول مشخصه در این شبیه‌سازی معادل بار آبی بر روی سرریز است. مدل برای سه طول اختلاط تلاطم ۱۰ برابر بزرگ‌تر و ۱۰ برابر کوچک‌تر از ۷ درصد (۰/۰۹، ۰/۰۰۹ و ۰/۰۰۹) اجرا شد. نتایج نشان داد که مدل به تغییر این ضریب، حساسیت محسوسی نشان نمی‌دهد. بنابراین طول اختلاط تلاطم به میزان ۷ درصد بار آبی بر روی سرریز تعیین گردید.

در FLOW-3D پنج مدل تلاطم ارائه شده است: (۱) طول اختلاط پراتل؛ (۲) مدل یک معادله‌ای؛ (۳) مدل دو معادله‌ای ای $k-\epsilon$ ؛ (۴) مدل RNG؛ و مدل شبیه‌سازی گردابه‌ای بزرگ (LES)، مدل تلاطم RNG، $k-\epsilon$ و LES برای جریان‌های با سطح آزاد ارائه شده‌اند. مدل LES نیازمند استفاده از پردازشگرهای قوی با حجم ذخیره بسیار بالاست، بنابراین عملاً استفاده از آن محدود است. نتایج مربوط به بررسی مدل‌های تلاطم نشان می‌دهد که دو مدل تلاطم $k-\epsilon$ و RNG نتایج تقریباً یکسانی در شبیه‌سازی بده واحد عرض در مقاطع مختلف پیچ ارائه می‌دهند. مدل RNG توسط محققین مختلف به‌عنوان بهترین مدل تلاطمی در شبیه‌سازی جریان در پیچ گزارش شده است (Blanckaert and Graf, 2001; Hoseini Mobarra and Yasi, 2017).

۲-۳- خروجی مدل

برای درستی داده‌های خروجی مدل عددی، اطمینان از شرایط پایدار در جریان برای انتخاب زمان اجرای مدل ضروری می‌باشد. با بررسی نمودارهای متوسط انرژی جنبشی نسبت به زمان در آزمون‌های متعدد، زمان مناسب برای اجرای مدل ۱۷۰ ثانیه انتخاب گردید.

مدل FLOW-3D قابلیت نمایش نتایج شبیه‌سازی را به‌صورت گرافیکی ۱، ۲ و ۳ بعدی و به‌صورت فایل متن در نقاط مشخص دارد. برای به دست آوردن اطلاعات موردنیاز (عمق d و سرعت V) در نقاط مختلف هر یک از مقطع‌های عرضی، و تحلیل نتایج به‌صورت سرعت متوسط عمقی (V_d) برترین مدل معرفی کرده است (Blanckaert and Graf,)

تعداد ۳۲ آزمون با مدل FLOW-3D انجام گردید. مدت‌زمان اجرای هر یک از آزمون‌های مدل بر روی کامپیوتر شخصی معادل ۳۰ ساعت بود. زمان خالص انجام آزمون‌های شبیه‌سازی معادل ۱۰۵۰ ساعت، (۴۴ روز)، و زمان کل (شامل اجرای آزمون‌های مدل در مراحل واسنجی، صحت‌سنجی، تنظیم مدل، و نیز آزمون‌های نهایی) معادل ۲۰۰۰ ساعت (۸۳ روز) بود.

۳- نتایج و بحث

با اطمینان از روند واسنجی و صحت‌سنجی مدل FLOW-3D، نتایج شبیه‌سازی جریان با این مدل با نتایج نظیر تجربی برای ۱۶ آزمون سرریز لبه‌تیز و ۱۶ آزمون سرریز لبه‌پهن؛ و نیز با نتایج نظیر از مدل شبیه‌ساز FLUENT مقایسه گردید.

۳-۱- بررسی توزیع عرضی جریان

مهم‌ترین شاخص برای توزیع یکنواخت جریان در عرض پیچ رودخانه، همسانی بده جریان در واحد عرض است (Abdolahpour, 2010; Valimohammadi Moghim, 2011). در این بررسی، از نتایج مربوط به عمق و سرعت جریان در نقاط مختلف مقطع کنترل بالادست سرریز، مقدار بده واحد عرض (q) در عرض مقطع کنترل جریان محاسبه شده است. سپس نمودار نمایش توزیع q در عرض مقطع کنترل سرریز ارائه گردیده است.

و بده جریان واحد عرض (q) در هر مقطع، مختصات نقاط در فایلی به نرم‌افزار معرفی شد؛ و نتایج به‌صورت فایل عددی موردبررسی قرار گرفت.

برای تعریف سرریز در آزمون‌های مختلف از روش کدبندی استفاده شده است. این کدها شامل هفت مشخصه است که با کاما (,) از هم جدا شده‌اند (جدول ۲). نوع مدل در هر آزمون نیز به‌صورت (مدل تجربی: EXP)، و مدل عددی (FLOW-3D یا FLUENT) مشخص شده است. به‌طور مثال، عبارت EXP:SH.C.W,H,20,20,0,55,28 به معنای نتایج مربوط به آزمون تجربی، سرریز لبه‌تیز، با تاج افقی، با ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر، به ترتیب در دیواره خارجی و داخلی پیچ، در مقطع ابتدای پیچ (صفر درجه)، با بده جریان ۵۵ لیتر در ثانیه، و با متوسط عمق آب ۲۸ سانتی‌متر در مقطع کنترل سرریز است. در هر مقطع معین، نتایج آزمون بدون سرریز به‌صورت نمایه Noweir نشان داده شده است.

در این بررسی، الگوی جریان در بازه پیچ، با و بدون سرریز، با دو نوع سرریز (لبه‌تیز و لبه‌پهن)، برای سه بده جریان شاهد کم (۲۶ لیتر بر ثانیه)، متوسط (۴۵ لیتر بر ثانیه) و زیاد (۵۸ لیتر بر ثانیه)؛ در شش موقعیت استقرار سرریزها (بالادست پیچ، ورودی پیچ یا صفر درجه، ۳۰ درجه، ۶۰ درجه، ۹۰ درجه یا خروجی پیچ، و پائین‌دست پیچ)؛ و سه ارتفاع مختلف سرریز، شبیه‌سازی گردید.

جدول ۲ عامل‌های به کار رفته در هر مدل و کدهای متناظر

Table 2 Factors used in each model and corresponding codes

Parameter	---	Code
The type of weir	Sharp-Crested Weir	SH.C.W
	Broad-Crested Weir	BR.C.W
The slope of weir crest	Horizontal	H
	Inclined	S
The height of the overflow Crest at the outer wall of bend	---	P1
The height of the overflow Crest at the inner wall of bend	---	P2
Position of overflow in the bend	0°	0
	30°	30
	60°	60
	90°	90
Discharge	Q	The magnitude of Q
Average water depth in the upstream control section	d	The magnitude of d

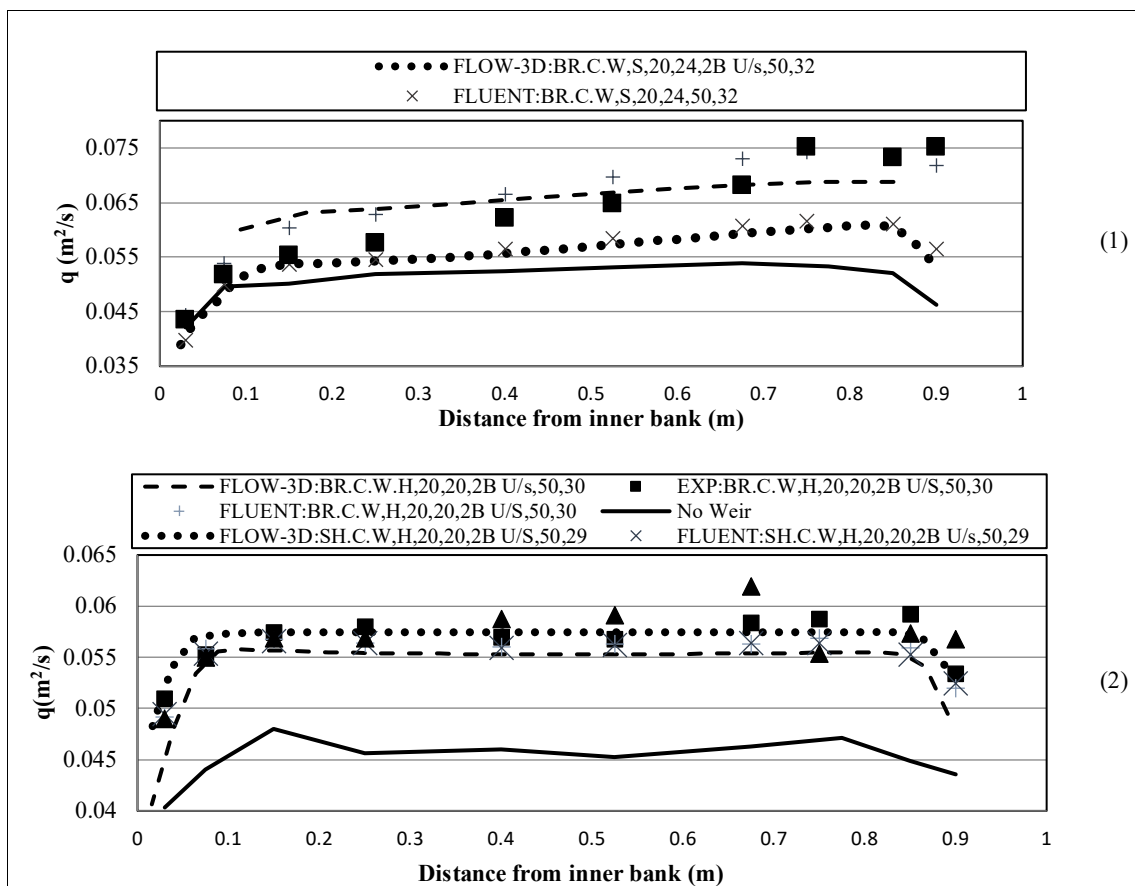


Fig. 3 Effect of 1) sharp-crested weirs and 2) broad-crested weirs with a horizontal and inclined crest on the flow pattern upstream of the bend.

شکل ۳ تأثیر سرریز (۱) لبه تیز و (۲) لبه پهن با تاج افقی و شیب‌دار بر الگوی جریان در مقطع بالادست پیچ

شده است. سرریزهای با تاج شیب‌دار بر شدت غیریکنواختی توزیع بده جریان در واحد عرض (q) در عرض مقطع کنترل بالادست سرریز پیچ می‌افزاید. از این‌رو، سرریزهای با تاج افقی (لبه‌پهن یا لبه‌تیز) برای مقطع بالادست پیچ مناسب‌تر هستند.

۳-۳- سرریز در مقطع ورودی پیچ

نتایج شکل ۴ نشان می‌دهد که هر دو سرریز لبه‌تیز و لبه‌پهن با تاج افقی تأثیر بهتری در توزیع یکنواخت‌تر بده جریان واحد عرض (q) در مقطع ابتدای پیچ (صفر درجه) دارند. به‌هرحال، سرریز لبه‌پهن عملکرد بهتری داشته و سرریز لبه‌تیز موجب افزایش q به سمت دیواره خارجی شده است. هر دو نوع سرریز، موجب کاهش سرعت در دیواره داخلی و موجب افزایش سرعت و در نتیجه افزایش بده واحد عرض به سمت دیواره خارجی شده‌اند. بنابراین، سرریز لبه-

نتایج این بررسی برای هر یک از مقاطع استقرار سرریز (در دامنه دو برابر عرض فلوم از بالادست پیچ تا دو برابر عرض در پائین‌دست فلوم)، و برای سرریزهای با تاج افقی و شیب‌دار، در زیر ارائه شده است. یادآوری می‌گردد که در شکل‌های زیر، شرایط جریان در پیچ آبراهه بدون سرریز نیز نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر بده واحد عرض با وجود سرریز (سرریز افقی یا شیب‌دار)، و در نتیجه بده کل کانال بیشتر از حالت بدون سرریز است. مقایسه نتایج بین دو حالت با و بدون سرریز وابسته به محدودیت آزمایش در مقیاس فلوم آزمایشگاهی است، و بهتر است که در این مقاله نادیده گرفته شود.

۳-۲- سرریز در بالادست پیچ

نتایج استقرار سرریزها در فاصله دو برابر عرض آبراهه در بالادست پیچ، برای شرایط مختلف در شکل ۳ نشان داده

پهن با تاج افقی کارایی بهتری دارد.

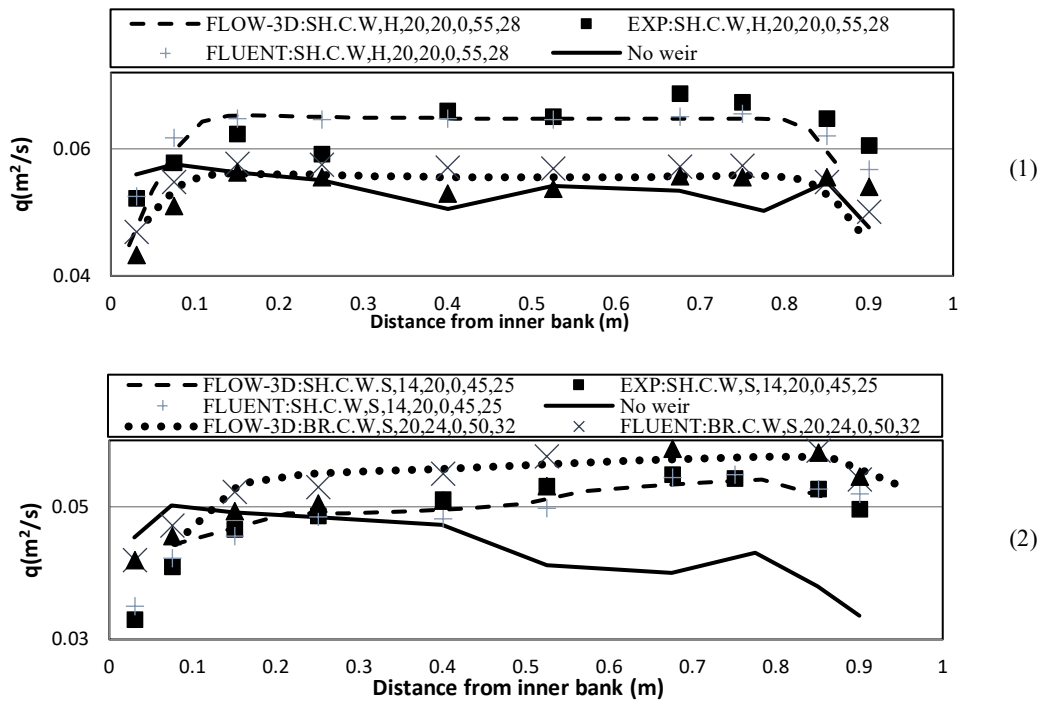


Fig. 4 Effect of 1) sharp-crested weirs and 2) broad-crested weirs with a inclined crest on the flow pattern of the cross-section having zero-degree.

شکل ۴ تأثیر سرریز (۱) لبه تیز و (۲) لبه پهن با تاج شیب‌دار بر الگوی جریان در مقطع صفر درجه

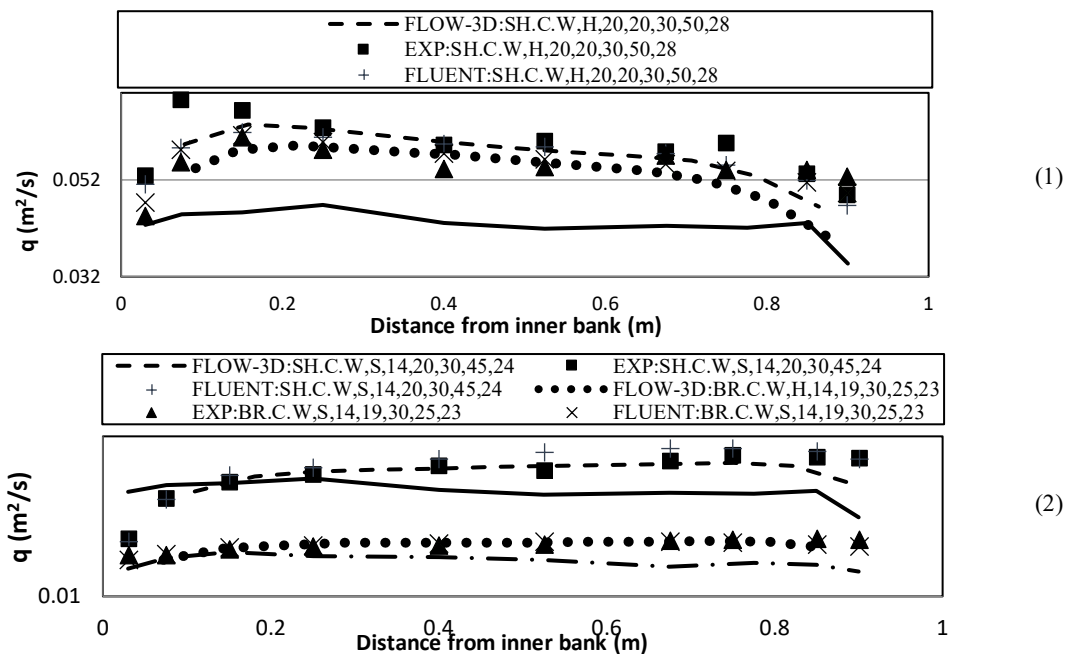


Fig. 5 Effect of 1) sharp-crested weirs and 2) broad-crested weirs with an inclined crest on the flow pattern of the cross-section having 30-degree.

شکل ۵ تأثیر سرریزهای (۱) لبه تیز و (۲) لبه پهن با تاج شیب‌دار بر الگوی جریان در مقطع ۳۰ درجه پیچ

افقی و شیب‌دار، سرریزهای با تاج شیب‌دار مؤثرتر بوده‌اند

۳-۵- سرریز در مقطع ۶۰ درجه پیچ

بررسی اثر سرریز بر سرعت متوسط عمقی نشان داد که در مقطع ۶۰ درجه، سرریز لبه‌تیز با تاج افقی موجب انحراف سرعت ماکزیمم و در نتیجه بده واحد عرض به سمت میانه کانال؛ و سرریز لبه‌پهن با تاج افقی موجب انحراف سرعت ماکزیمم به سمت دیواره خارجی می‌گردد. برای سرریزهای با تاج شیب‌دار، توزیع سرعت متوسط عمق و بده واحد عرض در مقطع کنترل سرریزها یکنواخت‌تر بوده است (شکل ۶).

۳-۶- سرریز در مقطع ۹۰ درجه (خروجی) پیچ

بررسی نتایج مربوط به سرریزهای لبه‌تیز و لبه‌پهن با تاج افقی نشان می‌دهد، سرریز لبه‌تیز موجب انحراف سرعت حداکثر به سمت دیواره داخلی پیچ و سرریز لبه‌پهن موجب انحراف آن به سمت میانه کانال شده است.

۳-۴- سرریز در مقطع ۳۰ درجه پیچ

بر اساس شکل ۵، در مقطع ۳۰ درجه از ابتدای پیچ، برای شرایط بدون سرریز، سرعت حداکثر در دیواره داخلی پیچ قرار دارد. در سرریزهای لبه‌پهن و لبه‌تیز با تاج افقی نیز همچنان سرعت حداکثر در دیواره داخلی پیچ قرار دارد؛ ولی تغییرات سرعت در این مقطع کمتر شده است. نتایج نشان می‌دهد که در این مقطع، سرریز لبه‌پهن عملکرد بهتری نسبت به سرریز لبه‌تیز دارد.

با حضور سرریزهای با تاج شیب‌دار، بررسی سرعت متوسط عمقی در مقطع کنترل بالادست سرریزها نشان می‌دهد که سرعت در دیواره داخلی پیچ کاهش می‌یابد؛ و سرریزهای لبه‌پهن عملکرد بهتری دارند. تغییرات بده واحد عرض نیز روندی مشابه تغییرات سرعت متوسط عمقی را نشان می‌دهد. در هر دو حالت نیز سرریزهای لبه‌پهن بهتر بوده‌اند. در مقایسه بین نتایج مربوط به سرریزهای لبه‌پهن با تاج

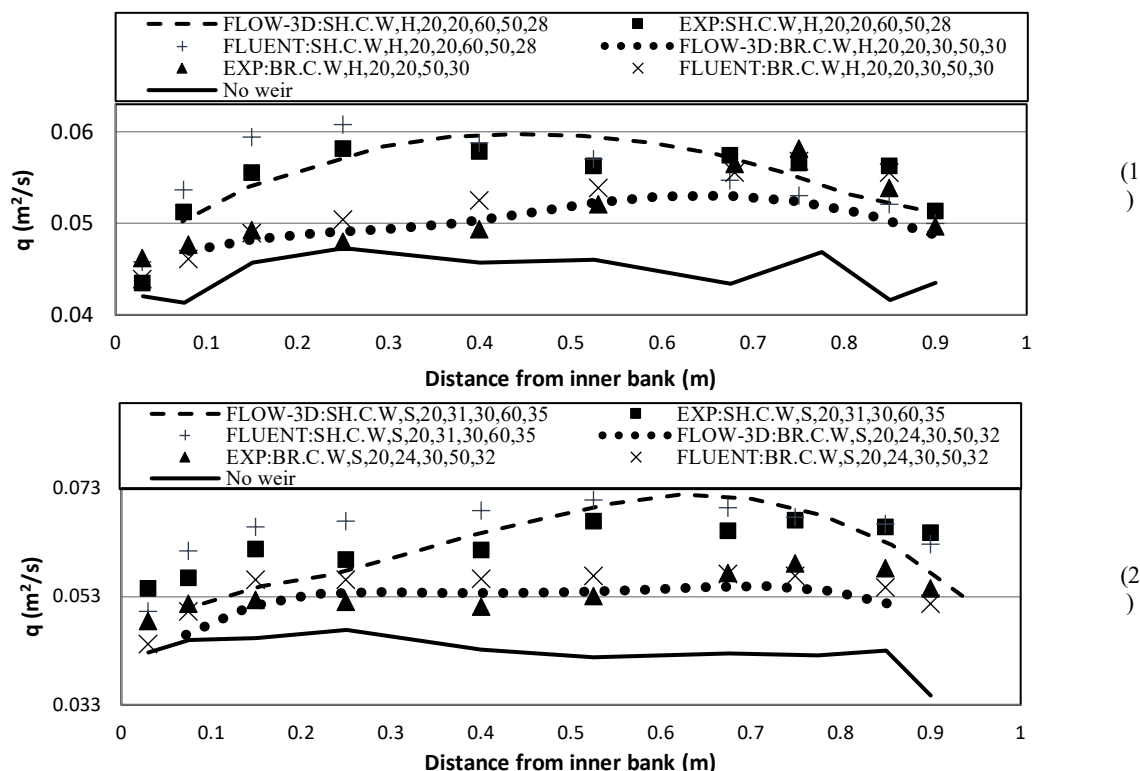


Fig. 6 Effect of 1) sharp-crested weirs and 2) broad-crested weirs with a inclined crest on the flow pattern of the cross-section having 60-degree.

شکل ۶ تأثیر سرریزهای (۱) لبه‌تیز و (۲) لبه‌پهن با تاج شیب‌دار بر الگوی جریان در مقطع ۶۰ درجه پیچ

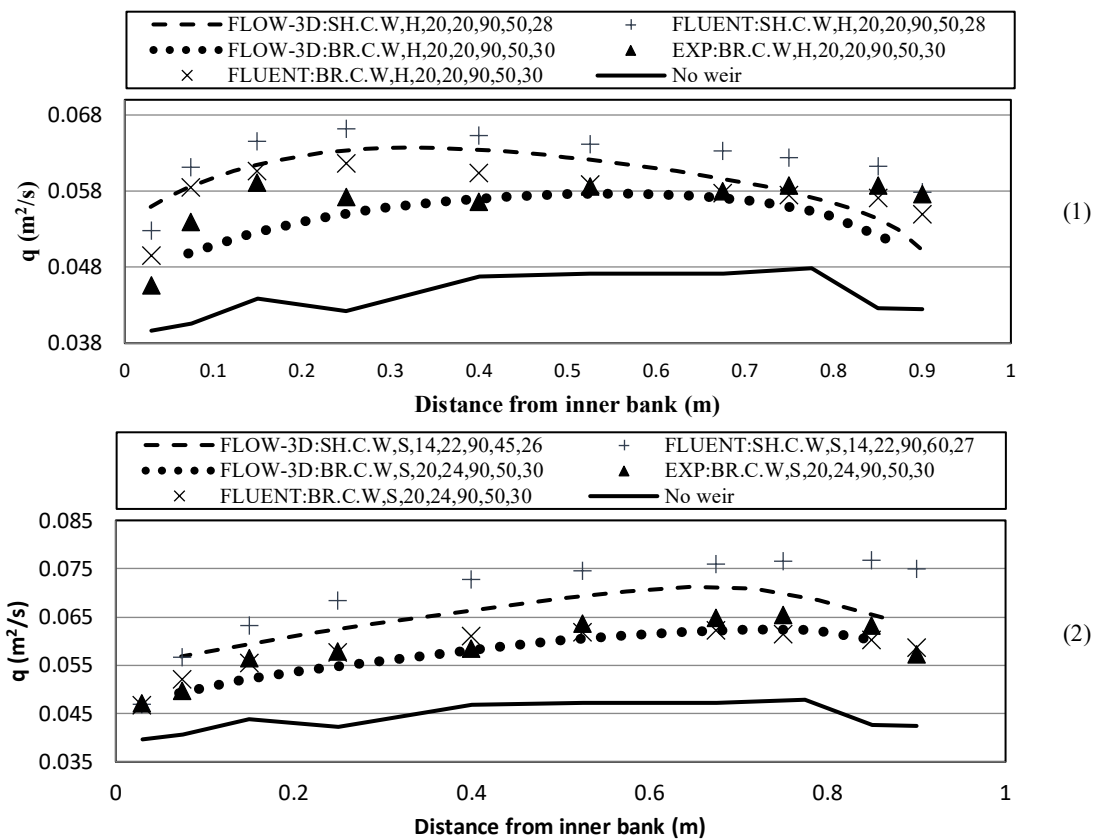


Fig. 7 Effect of 1) sharp-crested weirs and 2) broad-crested weirs with an inclined crest on the flow pattern of the cross-section having 90-degree.

شکل ۷ تأثیر سرریزهای (۱) لبه تیز و (۲) لبه پهن با تاج شیب‌دار بر الگوی جریان در مقطع ۹۰ درجه پیچ

سرریزهای با تاج افقی موجب کاهش اختلاف بین سرعت متوسط عمقی در سمت دیواره داخلی و خارجی پیچ شده-اند؛ ولی همچنان جریان تحت تأثیر پیچ قرار داشته، و حداکثر سرعت متوسط عمقی به سمت دیواره خارجی پیچ تمایل دارد. همچنین سرریز لبه تیز اثری بر شیب سطح آب بالادست نداشته است؛ ولی سرریز لبه پهن موجب افزایش سطح آب در سمت دیواره داخلی شده است. نمودارهای بده واحد عرض این سرریزها در شکل ۸ نشان می‌دهد که، سرریز لبه پهن عملکرد بهتری نسبت به سرریز لبه تیز داشته است. نتایج نشان‌دهنده عملکرد نامناسب تاج شیب‌دار در هر دو نوع سرریز در مقطع پایین دست پیچ است.

۳-۸- مقایسه نتایج دو مدل عددی FLOW-3D و

FLUENT

عددی FLOW-3D و FLUENT ارزیابی گردیده است. نتایج به‌طور نمونه برای موقعیت سرریز در زاویه ۳۰ درجه پیچ آبراهه، به‌صورت جدول ۳ ارائه شده است. نتایج عمومی

در نمودارهای مربوط به توزیع بده واحد عرض در شکل ۷ نیز همین روند قابل مشاهده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که سرریز لبه پهن با تاج افقی در مقطع ۹۰ درجه عملکرد بهتری نسبت به سرریز لبه تیز با تاج افقی دارد. بررسی نتایج مربوط به سرریزهای لبه تیز و لبه پهن با تاج شیب‌دار نشان می‌دهد که این سرریزها تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر یکنواختی توزیع سرعت عرضی و بده واحد عرض در مقطع ۹۰ درجه نداشته‌اند. بنابراین سرریز لبه پهن با تاج افقی در این مقطع مؤثرتر عمل کرده است.

۳-۷- سرریز در پایین دست پیچ

نتایج مربوط به کاربرد سرریزهای لبه تیز و لبه پهن با تاج افقی و شیب‌دار در مقطع پایین دست پیچ نشان می‌دهد که،

درصد خطای شبه‌سازی مشخصات جریان (عمق، سرعت متوسط عمقی و بده واحد جریان) در مقطع کنترل سرریزهای لبه تیز و لبه پهن، با تاج شیب‌دار از دو مدل

بوده است؛ ولی متوسط آن همسان و کمتر از ۵ درصد است. به‌طورکلی، مدل FLOW-3D در شبیه‌سازی عمق آب، و مدل FLUENT در شبیه‌سازی توزیع سرعت بهتر بوده‌اند. مقایسه توزیع عمقی سرعت شبیه‌سازی شده با نتایج نظیر تجربی نشان می‌دهد که مدل FLUENT در شبیه‌سازی جریان در شرایط مرزی (مجاورت دیواره‌های کانال) عملکرد بهتری داشته است.

نشان می‌دهد که خطای برآورد خصوصیات جریان از هر دو مدل در حد قابل قبولی قرار داشته، و همواره کمتر از ۱۰ درصد است. در مجموع، هر دو مدل قابلیت همسانی در شبیه‌سازی توزیع بده جریان واحد عرض داشته‌اند. دامنه تغییرات درصد خطای شبیه‌سازی بده واحد عرض (q) در شرایط مختلف سرریز و جریان، در مدل FLOW-3D بین ۰/۵ تا ۸ درصد، و در مدل FLUENT بین ۱ تا ۵ درصد

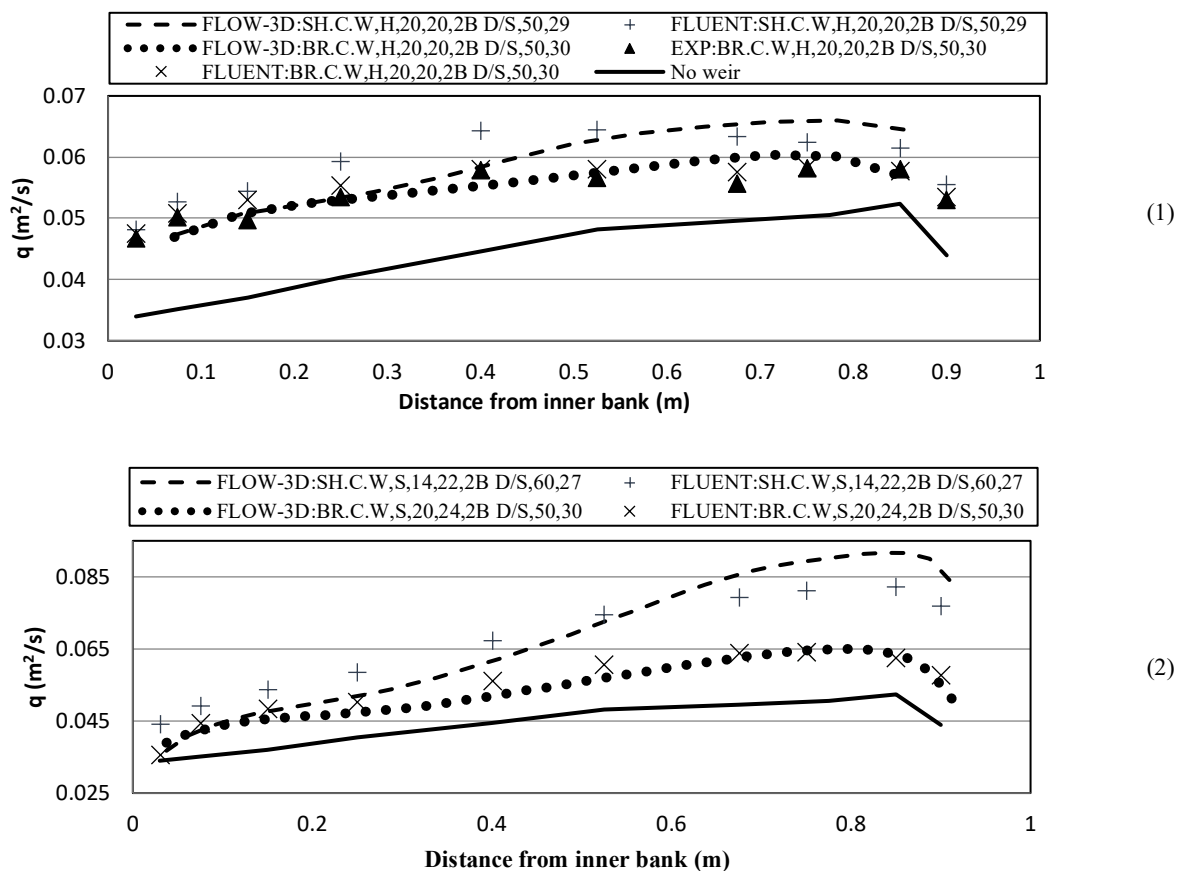


Fig. 8 Effect of 1) sharp-crested weirs and 2) broad-crested weirs with an inclined crest on the flow pattern downstream of the bend.

شکل ۸ تأثیر سرریزهای (۱) لبه تیز و (۲) لبه پهن با تاج شیب‌دار بر الگوی جریان در مقطع پایین دست پیچ

جدول ۳ درصد متوسط خطای شبیه‌سازی جریان در مقطع کنترل سرریزهای با تاج شیب‌دار در مقطع ۳۰ درجه

Table 3 The average percentage of simulation error in the weir control section with a sloping crest in section 30 degrees from the bend entrance

Weir	Discharge per unit width percentage		Flow depth percentage		Depth averaged velocity percentage	
	FLUENT	FLOW-3D	FLUENT	FLOW-3D	FLUENT	FLOW-3D
Sharp-crested	4.4	5.1	1.8	1.1	4.0	4.8
Broad-crested	4.4	4.5	1.7	0.7	4.5	4.3

۵- فهرست نشانه‌ها

u_i	سرعت جریان در جهت‌های مختصات کارتزین x , y و z	(ms^{-1})
A_{ij}	کسری از سطح جریان در جهت‌های x , y و z	
P	فشار (Pa)	
G_i	شتاب حجمی (ms^{-2})	
f_i	ترم‌های لزجت (-)	
V_f	نسبت کسر حجمی فضای باز به جریان (-)	
d	عمق (m)	
V	سرعت (ms^{-1})	
V_d	سرعت متوسط عمقی (ms^{-1})	
q	بده واحد عرض (m^2s^{-1})	

۶- سپاس‌گزاری

این پژوهش بخشی از پایان‌نامه کارشناسی ارشد نویسنده دوم، تحت راهنمایی نویسنده اول است، که در گروه مهندسی آب دانشگاه ارومیه انجام گردید. از مجموعه همکاران گروه مهندسی آب دانشگاه ارومیه سپاس‌گزاری می‌گردد.

References

- Abad JD, García MH (2014) Hydrodynamics in Kinoshita-generated meandering bends: importance for river-planform evolution. URL:<https://www.flow3d.com/wp-content/uploads/2014/08/Hydrodynamics-in-Kinoshita-generated-meandering-bends-Importance-for-river-planform-evolution.pdf>
- Abdolahpour M. 2010. Sloping sharp-crested weirs in a channel bend. Master of Science, Urmia University. Urmia, Iran, [in Persian].
- Ayaseh A. 2011. Numerical simulation of flow over a weir in a channel bend. Master of Science, Urmia University. Urmia, Iran [in Persian].
- Blanckaert K, Graf WH. 2001. Mean flow and turbulence in open-channel bend. *Journal of Hydraulic Engineering*, **127**(10):835-847.
- Chanel PG, Doering JC. 2008. Assessment of spillway modeling using computational fluid dynamics. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **35**(12):1481-1485.
- Developer of software for computational fluid dynamics (Flow Science Inc.) (2008) Flow-3D user's manuals. Version 9.3 URL:<https://fddocuments.in/document/flow-3d-user-manual-v93.html?page=3>
- Ho D, Boyes K, Donohoo S, Cooper B. 2003. Numerical flow analysis for spillways. Paper presented at the 43 rd ANCOLD Conference,

منبع‌ها

علت اصلی ضعف FLOW-3D، عدم توانایی مدل RNG در شبیه‌سازی تلاطم جریان در لایه مرزی است؛ و این پدیده در مطالعات مشابه نیز گزارش شده است (Chanel and Doering, 2008). در سایر نواحی عرضی جریان، نتایج دو مدل همپوشانی خوبی دارند

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، مدل عددی FLOW-3D در شبیه‌سازی الگوی جریان و یکنواختی توزیع بده واحد عرض در مقطع کنترل بالادست سرریزهای لبه‌پهن و لبه‌تیز، در بازه یک فلوم با پیچ ۹۰ درجه و انحنای نسبی ۳، مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور از مدل‌سازی تجربی سرریزهای لبه‌تیز عبدالله‌پور (۱۳۸۹) و لبه‌پهن ولی محمدی و یاسی (۱۳۹۴) استفاده شده و با نتایج نظیر از شبیه‌سازی عددی مدل FLUENT مقایسه گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که: (۱) در نواحی بالادست، ابتدا، انتها و پایین دست پیچ، عملکرد سرریزهای با تاج افقی مناسب‌تر از سرریزهای با تاج شیب‌دار است؛ (۲) در مقاطع ۳۰ تا ۶۰ درجه از میانه پیچ، سرریزهای با تاج شیب‌دار تأثیر خوبی در یکنواختی توزیع جریان (با شاخص بده واحد عرض) در مقطع کنترل سرریز دارند؛ (۳) در تمامی مقاطع، سرریز لبه‌پهن عملکرد بهتری نسبت به سرریز لبه‌تیز دارد؛ (۴) نتایج شبیه‌سازی الگوی جریان در مقطع کنترل سرریزها از هر دو مدل عددی FLOW-3D و FLUENT رضایت‌بخش است؛ (۵) متوسط درصد خطای شبیه‌سازی بده واحد عرض (q) در شرایط مختلف سرریز و جریان، برای دو مدل همسان و کمتر از ۵ درصد بوده است؛ و (۶) مدل FLUENT در شبیه‌سازی توزیع سرعت جریان در لایه مرزی (نزدیک دیواره‌ها) عملکرد بهتری نسبت به مدل FLOW-3D دارد. آزمون استقرار سرریزهای لبه‌پهن با تاج شیب‌دار غیرخطی (پلکانی) در پیچ آب‌راهه، برای مطالعات تکمیلی پیشنهاد می‌گردد. مطالعات تجربی و مدل‌های شبیه‌سازی جریان از روی سرریزها و در سامانه سدهای انحرافی و تنظیمی، در محدوده پیچ آب-راهه‌ها اندک است. همچنین، شبیه‌سازی جریان آب با انتقال رسوب از موضوعات قابل توجه برای مطالعات در آینده است.

- R. M, Gh B. 2011. Calculation of hydraulic parameters, flow velocity and depth in dams' spillways using FLOW-3D (Case study: Doosti Dam). Paper presented at the 1st Int. Conf. on modeling plant-water-soil-air, Kerman, Iran,
- Valimohammadi Moghim A. 2011. Evaluation of the performance of a broad-crested weir in a channel bend. . Master of Science, Urmia,Iran. Urmia University
- Yasi M, Valimohammadi Moghim A. 2016. Hydraulic Evaluation of Horizontal and Sloping Broad-Crested Weirs in a Channel Bend. Irrigation and Drainage Structures Engineering Research, 16(65):55-70. <https://doi.org/10.22092/aridse.2016.105701>.
- Hobart, Tasmania, 24-29 October.
- Hoseini Mobara SH, Yasi M. 2017. Performance of crump weirs in a channel bend. *Iranian Water Research Journal*, 10(1):59-67 [in Persian].
- Kim DG, Park JH. 2005. Analysis of flow structure over ogee-spillway in consideration of scale and roughness effects by using CFD model. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 9(2):161-169.
- Mozaffari S. 2014. Numerical simulation of flow over Ogee spillways with FLOW-3D model (Case study: Nazloo Dam). Master of Science, Urmia, Iran. Urmia University
- Paul G, Chanel H, John K. 2008. Assessment of Spillway Modeling Using Computational Fluid Dynamics. *Journal of civil Engineering*, 35(1481-1485).