



Numerical Simulation of the Effect of Channel bed Slope on the Hydraulic Performance of Sharp-Crested Rectangular Side Weir with Subcritical and Supercritical Regimes

Farhoud Kalateh¹ | Ehsan Aminvash²

1. Corresponding Author, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: f.kalateh@gmail.com

2. Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: ehsan.aminvash1994@gmail.com

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	<p>Side weirs are types of hydraulic structures, which are used for different purposes in water transmission systems. In most of the construction operations of irrigation channels and water transfer, based on the topographic conditions of the land, the bottom of the channels is sloped. The purpose of this research is to numerically investigate the changes in the slope of the bottom bed and evaluate the performance of the side weirs in flood conditions and supercritical and subcritical flow regimes. To simulate the flow, CFD method and FLOW-3D® software and RNG turbulence model were used. By examining the surface profile of the flow passing through the weirs at different bed slopes, it was observed that in a fixed slope, in the subcritical flow regime, the surface profile trend is increasing from the beginning to the end of the weir, and decreasing in the supercritical flow regime. As the slope of the main channel bed increases, the level of flow passing over the weir decreases. On average, by changing the regime from subcritical to supercritical, the weir efficiency decreased by 11.21%. Increasing the bed slope decreased the weir efficiency and discharge coefficient in the subcritical flow regime up to 14.54% and in the supercritical flow regime up to 9.26%. The increase in discharge coefficient with the increase of the weir height varied between 4.6 and 7.8 percent. With the increase of the slope of the channel bed, the velocity along the weir in the subcritical and supercritical flow regimes increased by 10.88 and 6.17%, respectively, and the transverse velocity decreased by 22.23 and 4.8 percent, respectively for the subcritical and supercritical flow regimes.</p>
Article history:	
Received: Jan. 26, 2023	
Revised: March. 3, 2023	
Accepted: March. 5, 2023	
Published online: March. 21, 2023	
Keywords: Bed slope, Flow rate coefficient, Flow regime, Side weir, Velocity distribution	

Cite this article Kalateh, F., & Aminvash, E. (2023). Numerical Simulation of the Effect of Channel bed Slope on the Hydraulic Performance of Sharp-Crested Rectangular Side Weir with Subcritical and Supercritical Regimes. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54 (1), 67- 84. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.354381.669440>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.354381.669440>



شبیه‌سازی عددی تأثیر شیب بستر کانال بر عملکرد هیدرولیکی سرریز جانبی مستطیلی لبه تیز با

رژیم‌های زیر و فوق بحرانی

فرهود کلاته^۱ | احسان امین‌وش^۲۱. نویسنده مسئول، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، رایانامه: f.kalateh@gmail.com۲. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، رایانامه: Ehsan.aminvash1994@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	سرریزهای جانبی از انواع سازه‌های هیدرولیکی می‌باشند، که با اهداف متفاوت در سیستم‌های انتقال آب بکار گرفته می‌شوند. در اکثر عملیات‌های احداث کانال‌های آبیاری و انتقال آب، براساس شرایط توپوگرافی زمین، کف کانال‌ها شیب‌دار اجرا می‌شود. هدف از تحقیق حاضر، بررسی عددی تغییرات شیب بستر کف و ارزیابی عملکرد سرریز جانبی در شرایط سیلابی و رژیم جریان فوق بحرانی و زیر بحرانی می‌باشد. برای شبیه‌سازی جریان از روش دینامیک سیالات محاسباتی و نرم افزار FLOW-3D® و از مدل آشستگی RNG استفاده شد. با بررسی پروفیل سطح جریان عبوری از سرریزها در شیب بستر متفاوت مشاهده گردید که در یک شیب ثابت، در رژیم جریان زیر بحرانی، روند پروفیل سطح از ابتدا تا انتهای سرریز افزایشی و در رژیم جریان فوق بحرانی کاهش می‌یابد. با افزایش شیب بستر کانال اصلی، سطح جریان عبوری از روی سرریز کاهش می‌یابد. به‌طور متوسط با تغییر رژیم از زیر بحرانی به فوق بحرانی، راندمان سرریز ۱۱/۲۱ درصد کاهش یافت. افزایش شیب بستر باعث کاهش راندمان سرریز و ضریب دبی در رژیم جریان زیر بحرانی تا ۱۴/۵۴ درصد و در رژیم جریان فوق بحرانی تا ۹/۲۶ درصد شد. افزایش ضریب دبی با افزایش ارتفاع سرریز، بین ۴/۶ تا ۷/۸ درصد متغیر بود. با افزایش شیب بستر کانال، سرعت در امتداد طولی سرریز، در رژیم جریان زیر بحرانی و فوق بحرانی به ترتیب ۱۰/۸۸ و ۶/۱۷ درصد افزایش و سرعت عرضی در امتداد عرضی برای رژیم جریان زیر بحرانی و فوق بحرانی به ترتیب ۲۲/۲۳ و ۴/۸ درصد کاهش یافت.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۶	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۱۲	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۴	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱/۱	
واژه‌های کلیدی:	
توزیع سرعت،	
رژیم جریان،	
سرریز جانبی،	
شیب بستر،	
ضریب دبی جریان.	

استناد: کلاته؛ فرهود، امین‌وش؛ احسان، (۱۴۰۲). شبیه‌سازی عددی تأثیر شیب بستر کانال بر عملکرد هیدرولیکی سرریز جانبی مستطیلی لبه تیز با رژیم‌های زیر و

فوق بحرانی. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۴ (۱)، ۸۴-۶۷. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.354381.669440>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.354381.669440>

مقدمه

برای توزیع عادلانه آب در بین متقاضیان و به حداقل رسانیدن تلفات آب، اندازه‌گیری دقیق دبی جریان ضروری است. در دهه‌های گذشته پژوهشگران و مهندسان علوم آب تلاش کرده‌اند با ساخت و نصب سازه‌های اندازه‌گیری در کانال‌ها، دبی جریان را با دقت مناسب اندازه‌گیری کنند. سرریز جانبی معمولاً شامل یک کانال اصلی و یک کانال هدایت‌کننده (سرریز جانبی) می‌باشد که به موازات آن نصب می‌گردد و هنگامی که جریان با سطح آزاد، بالاتر از تاج سرریز جانبی قرار گیرد، از آن سرریز می‌شود (Ranga Raju et al., 1979; Emiroglu et al., 2011; Venutelli, 2008). سرریزهای جانبی از انواع سازه‌های هیدرولیکی می‌باشند، که با اهداف متفاوت در سیستم‌های انتقال آب بکارگرفته می‌شوند. جریان بر روی سرریزهای جانبی از نوع متغیر مکانی با دبی کاهنده بوده و با فرض انرژی مخصوص ثابت بر روی سرریز، توزیع سرعت یکنواخت و در عرض کانال ثابت است. رابطه زیر را برای تعیین ضریب آبگذری در واحد عرض ارائه داده است (De-Marchi, 1934).

$$C_d = \frac{3q}{2\sqrt{2g} \times (h-p)^{3/2}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در رابطه فوق، h عمق آب در کانال اصلی $[L]$ ، p ارتفاع سرریز جانبی $[L]$ ، C_d ضریب دبی جریان عبوری $[-]$ ، g شتاب گرانش $[L^2T^{-2}]$ و q دبی واحد عرض $[L^2T^{-1}]$ می‌باشد. تحقیقات گسترده‌ای در زمینه سرریزهای جانبی انجام شده است. اکثر تحقیقات انجام یافته در این حوزه به صورت آزمایشگاهی بوده است که منجر به ارائه روابط توسط محققین شده است.

مطالعه‌های مرتبط به سرریزهای جانبی از اوایل قرن بیستم آغاز شد. (Di-marchi (1934 با اغماض از میزان کاهش انرژی در طول سرریز، رابطه‌ای برای دبی عبوری از سرریز جانبی لبه‌تیز مستطیلی ارائه نمود که به رابطه دیمارچی سرشناس شده است (رابطه ۱). وی برای بدست آوردن این معادله برای سرریزهای جانبی فرضیاتی لحاظ نمود. بعد از مطالعات دیمارچی، (Subramania et al., 1972) بر روی سرریز جانبی لبه تیز مستطیلی با ارتفاع تاج صفر آزمایشاتی انجام دادند. آزمایشات این محققین در یک آبراهه افقی مستطیلی انجام شد. آن‌ها رابطه (۲) را برای تعیین ضریب دبی ارائه نمودند.

$$C_m = C_m^* \sqrt{1 - \left(\frac{3Fr_1^2}{Fr_1^2 + 2} \right)} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که C_m^* ضریب ثابت انقباض و برابر $0/611$ تعیین گردید. نتایج تحقیق این محققین نشان داد که برای حالت جریان زیر بحرانی و ارتفاع سرریز صفر، ضریب دبی به عدد فرود وابسته است و پارامترهای بی‌بعد دیگر تأثیر چندانی بر روی ضریب دبی ندارند. برای حالت فوق‌بحرانی نیز ضریب دبی با عدد فرود به صورت خطی و با شیب ملایم تغییر می‌کند. ضریب دبی یا ضریب تخلیه پارامتری بدون بعد است که عبارت از نسبت دبی واقعی به دبی ایده‌آل می‌باشد.

Borgheti et al., (1999) به صورت آزمایشگاهی به بررسی تأثیر شکل سرریز و هندسه کانال در مقادیر ضریب دبی سرریز جانبی لبه‌تیز با شرایط رژیم زیربحرانی پرداختند. نتایج حاکی از این بود که فرضیات و نتایج دیمارچی در مورد ثابت بودن انرژی در حالت زیربحرانی صادق بوده و تأثیر شیب کف کانال را می‌توان اغماض نمود. (Keshavarzi et al., 2001) به بررسی آزمایشگاهی ضریب دبی سرریز جانبی در کانال دوزنقه‌ای با شیب‌های دیواره متفاوت اقدام نمودند. در ادامه تحقیق نیز از مدل ریاضی برای صحت‌سنجی مدل آزمایشگاهی استفاده نمودند. نتایج نشان داد که خروجی مدل ریاضی با مدل آزمایشگاهی تطابق خوبی دارد اما استفاده از مدل ریاضی برای شبیه‌سازی کانال با انتهای بسته را توصیه نکردند.

Ramamutrhy et al., (2006) با انجام آزمایش‌های مختلف بر روی سرریزهای جانبی و بر اساس پارامترهای بی بعد جریان و هندسه سرریز، ضریب دبی اصلاح‌شده‌ای را برای سرریزهای جانبی مستطیلی و دایره‌ای ارائه نمودند. همچنین در ادامه ضریب دبی را با روش حداقل مربعات جزئی چند متغیره غیر خطی پیش‌بینی نمودند. نتایج نشان داد که رابطه ارائه شده به خوبی می‌تواند ضریب دبی را تعیین کند و روش بکار رفته برای پیش‌بینی نیز قابلیت خوبی دارد. (Rosier (2007 به بررسی آزمایشگاهی اثر تغییرات بستر بر میزان جریان خروجی از سرریزهای جانبی آزمایشگاهی پرداختند. نتایج نشان داد که تغییرات قابل ملاحظه‌ای در پروفیل بستر شکل می‌گیرد. (Venutelli (2008 مشاهده کرد تغییرات ضریب توزیع سرعت در طول سرریز جانبی در حالت فوق‌بحرانی، نرخ کاهشی و در حالت زیربحرانی، نرخ افزایشی دارد. به عبارت دیگر توزیع سرعت در رژیم زیربحرانی در امتداد سرریز تدریجاً افزایش و در رژیم فوق‌بحرانی تدریجاً

کاهش می‌یابد.

Emiroglu et al., (2011) در یک کانال مستقیم آزمایشگاهی، ظرفیت دبی سرریزهای لبه تیز مستطیلی را مورد مطالعه قرار دادند. در نهایت معادله‌ای با در نظر گرفتن تمام پارامترهای ابعادی برای ضریب دبی سرریز جانبی مستطیل لبه تیز ارائه کردند که میانگین خطای معادله پیشنهادی ۴/۵۴ درصد بود. بررسی امکان استفاده از فرضیه دی مارچی برای سرریزهای جانبی توسط Paris et al., (2012) در حالت کانال با بستر متحرک مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که با توجه به اینکه در دهانه سرریز رسوبات ته‌نشین می‌شوند، تغییرات تراز بستر اتفاق می‌افتد که در نتیجه سبب افزایش در تراز سطح آب و در نتیجه دبی خروجی از سرریز جانبی می‌شود. حق‌شناس و وطن‌خواه (۱۳۹۴) با انجام آزمایش‌هایی به مقایسه روش‌های مختلف تخمین ضریب دبی سرریز جانبی لبه تیز نیم‌دایره‌ای در رژیم جریان زیربحرانی پرداختند. اسمعیل‌پور و همکاران (۱۳۹۵) با انجام ۲۲۰ آزمایش، ضریب دبی و پروفیل سطح آب در سرریز جانبی کنگره‌ای نیم‌دایره‌ای را با ایجاد رژیم جریان زیربحرانی مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق نشان داد که در سرریزهای کنگره‌ای نیم‌دایره‌ای ضریب دبی نسبت به سرریز جانبی مستطیلی ۲۱ درصد افزایش می‌یابد.

Maranzoni et al., (2017) به تجزیه و تحلیل تجربی و عددی جریان‌های سرریز جانبی در یک کانال همگرا پرداختند. داده‌های تجربی نشان می‌دهند که عدد فرود در کانال اصلی پایین دست سرریز و ارتفاع بدون بعد سرریز، متغیرهای مهمی برای توصیف بازده جریان خروجی هستند و تایید می‌کنند که غیر منشوری شدن کانال اصلی سبب افزایش قابل توجه در عملکرد جریان خروجی می‌شود. Kadhim et al., (2019) ضریب دبی روی سرریز جانبی شیب‌دار را با زاویه‌های مختلف بررسی کردند. مشخص شد میزان دبی روی کناره سرریز با افزایش زاویه شیب مخالف جهت جریان کاهش می‌یابد در صورت افزایش زاویه شیب در جهت جریان، میزان دبی روی سرریز جانبی کاهش می‌یابد. تأثیر عدد فرود نیز با ضریب دبی مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که به طور متناسب با یکدیگر مرتبط هستند. کریمی و همکاران (۱۳۹۹) سرریزهای کلید پیانویی جانبی با کلیدهای مورب با زوایای مختلف را مورد آزمایش قرار دادند. نتایج نشان داد که زاویه‌دار کردن کلیدها در جهت همسو با جریان خروجی از سرریز، ضریب دبی سرریز کلید پیانویی جانبی را در اعداد فرود بالا تا ۱۲ درصد افزایش می‌دهد. همچنین مورب نمودن کلیدها می‌تواند تلاطمی که معمولاً در سرریز کلید پیانویی متقارن اتفاق می‌افتد را کاهش دهد و ضریب دبی بالاتری را نتیجه دهد.

ویژگی‌های پروفیل سطح آب بر روی سرریز جانبی مستطیلی در حالت جریان فوق بحرانی توسط Jalili Ghazizadeh et al., (2022) مورد بررسی قرار داده شد. آن‌ها با استفاده از معادلات پیشنهادی، عمق جریان و دبی در کانال اصلی در هر مقطعی از سرریز جانبی را تخمین زدند. مقایسه پیش‌بینی‌های معادلات پیشنهادی با مجموعه‌های مختلف داده‌های تجربی موجود نشان داد که این معادلات می‌توانند نیم‌رخ سطح آب و دبی جریان را با دقت خوبی پیش‌بینی کنند و از اهمیت طراحی برخوردار هستند (Jalili Ghazizadeh et al., 2022).

در دهه‌های اخیر به خاطر افزایش امکانات سیستمی و دانش علوم کامپیوتری روش‌های عددی در حل مسائل هیدرولیکی رواج یافته است. Uyumaz (2005) سرریز جانبی در کانال‌های مثلی را مورد مطالعه قرار داد و یک مدل عددی تفاضل محدود را بر اساس فرض ثابت بودن انرژی در شرایط جریان فوق‌بحرانی برای محاسبه دبی تخلیه و پروفیل سطح آب ارائه نمود. با استفاده از دو تکنیک شبکه عصبی مختلف، Bilhan et al., (2010) ضریب دبی سرریزهای جانبی مستطیل شکل واقع در کانال مستقیم را با استفاده از روش‌های شبکه‌های عصبی پیش‌خور (FFNN) و شبکه‌های عصبی پایه شعاعی (RBNN) پیش‌بینی نمودند. نتایج نشان داد که تکنیک‌های محاسبات عصبی می‌توانند با موفقیت در مدل‌سازی ضریب دبی مورد استفاده قرار گیرند. براساس نتایج بدست آمده مشخص شد که مدل FFNN بهتر از RBNN است.

Aydin and Emiroglu (2013) با استفاده از نرم‌افزار ANSYS Fluent ظرفیت تخلیه سرریزهای جانبی را شبیه‌سازی کردند. آن‌ها تغییرات سطح آزاد را با روش VOF و مدل‌های مختلف آشفتگی مدل‌سازی نمودند. مشخص شد که ضریب دبی با افزایش عدد فرود افزایش یافته است. Azimi et al., (2016) ضریب دبی سرریزهای جانبی مستطیلی در یک کانال دایره‌ای با شرایط فوق بحرانی و با استفاده از مدل آشفتگی RNG k-ε و طرح حجم سیال (VOF) شبیه‌سازی نمودند. با توجه به نتایج مدل عددی، تغییرات انرژی ویژه در امتداد سرریز جانبی برای رژیم جریان فوق بحرانی تقریباً ثابت است و افت انرژی معنی‌دار نیست، اما با افزایش طول سرریز جانبی اختلاف انرژی بین سرریز جانبی بالادست و پایین دست افزایش می‌یابد.

Gharib et al., (2020) ضریب دبی سرریزهای جانبی قرار گرفته بر روی کانال‌های همگرا با استفاده از ماشین یادگیری افراطی

مدرن خود تطبیقی (SAELM) شبیه‌سازی نمودند. نتایج نشان داد که بهترین مدل SAELM مقادیر ضریب دبی را بر حسب عدد فرود، نسبت ارتفاع سرریز جانبی به عمق پایین دست پیش‌بینی می‌کند. (Ghaderi et al., (2020) ضریب تخلیه سرریزهای جانبی لبه‌تیز دوزنقه ای و پارامترهای مؤثر بر آنها را به صورت عددی بررسی کردند. (Abbasi et al., (2020) تأثیر پارامترهای هندسی گرداب‌گیر بر روی سرریز جانبی کنگره‌ای مثلی را با استفاده از مدل عددی FLOW-3D شبیه‌سازی نمودند. (Rasaei et al., (2021) کاربرد مدل عددی در تعیین ضریب دبی حاوی رسوبات معلق عبوری از سرریزهای جانبی را بررسی نمودند. نتایج ضمن تأیید توانایی مدل عددی FLOW-3D در شبیه‌سازی جریان حاوی رسوب عبوری از سرریزهای جانبی، نشان داد که با افزایش غلظت بار جریان معلق، ضریب دبی عبوری از سرریز جانبی افزایش می‌یابد.

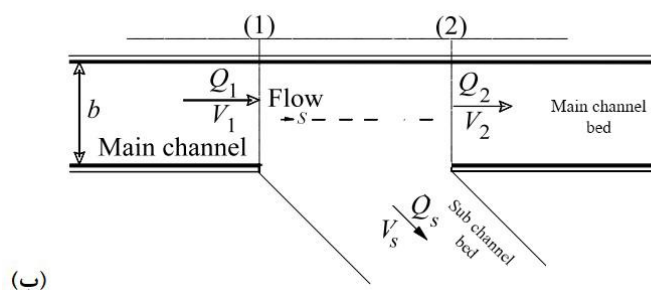
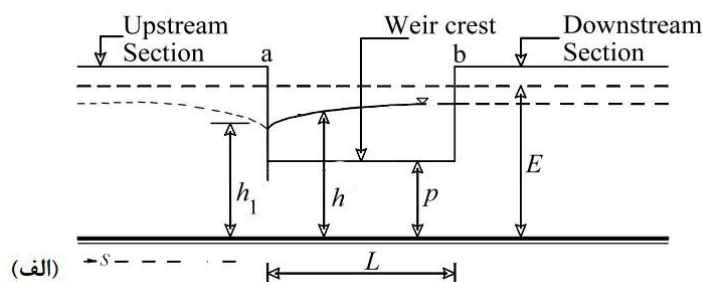
با توجه به بکارگیری سرریزهای جانبی در انتقال و کنترل دبی در جریان‌های سیلابی و مقادیر قابل توجه سرعت، وقوع جریان فوق‌بحرانی بر روی سرریز جانبی بسیار محتمل است. عمده مطالعات انجام شده در زمینه سرریزهای جانبی محدود به روش آزمایشگاهی بوده، بنابراین با توجه به شرایط محدود آزمایشگاه هزینه زیاد انجام آن‌ها و پیشرفت‌های اخیر در زمینه مدل‌های عددی، شبیه‌سازی این سرریز با نرم‌افزارهای CFD حائز اهمیت است. با بررسی تحقیقات انجام گرفته می‌توان دریافت که، تاکنون تحقیقات بر روی شرایط هندسی کانال اصلی مانند تغییرات شیب بستر کف و ارزیابی عملکرد سرریز جانبی در شرایط سیلابی و رژیم جریان فوق‌بحرانی انجام نشده است. بنابراین در تحقیق حاضر به شناسایی بیشتر مشخصات جریان عبوری از روی سرریزهای جانبی، تحلیل جریان در حالت زیربحرانی و فوق‌بحرانی و بررسی تأثیر تغییرات شیب بستر بر عملکرد هیدرولیکی سرریزهای جانبی پرداخته می‌شود.

مواد و روش‌ها

تحلیل ابعادی

برای سرریز جانبی مستطیلی لبه‌تیز، مطابق شکل ۱ با در نظر گرفتن پارامترهای هندسی، هیدرولیکی و شرایط جریان بر روی مدل، ضریب دبی جریان عبوری تابعی از پارامترهای مؤثر زیر می‌باشد.

$$C_d = f_1(Q_1, h_1, L, P, b, S, \rho, \mu, g) \quad \text{رابطه ۳}$$



شکل ۱. شماتیک جریان عبوری از سرریز جانبی لبه‌تیز الف: نمای روبرو، ب: نمای پلان

در این رابطه، Q_1 دبی جریان ورودی، h_1 عمق جریان بالادست سرریز جانبی، L طول سرریز جانبی، P ارتفاع سرریز جانبی، b عرض کانال اصلی، s شیب بستر کانال، ρ جرم مخصوص سیال، μ لزوجت دینامیکی سیال و g شتاب گرانش زمین می‌باشد. با استفاده از روش پی-باکینگهام، ضریب دبی جریان عبوری از سرریز جانبی براساس پارامترهای بدون بعد مستقل به صورت رابطه ۴ بدست می‌آید.

$$C_d = f_2\left(\frac{L}{b}, \frac{L}{h_1}, \frac{P}{h_1}, s, Fr_1, Re\right) \quad \text{رابطه ۴}$$

با توجه به ثابت بودن طول سرریز جانبی در تحقیق حاضر و هم‌چنین آشفته بودن جریان در کانال در محدوده دبی مورد بررسی، می‌توان این دو پارامتر را از رابطه بالا حذف کرد (Daneshfaraz et al., 2020, 2021a, b). لذا رابطه کلی بصورت زیر می‌باشد.

$$C_d = f_2\left(\frac{P}{h_1}, S, Fr_1\right) \quad \text{رابطه ۵}$$

مدل آشفته‌گی

نرم‌افزار FLOW-3D® یکی از نرم‌افزارهای حل مسائل CFD بوده و می‌تواند جریان‌های مختلف را شبیه‌سازی کند. معادلات حاکم بر جریان در این نرم‌افزار، معادلات ناویر-استوکس و بقای جرم می‌باشد (دانشفراز و همکاران، ۱۴۰۰). این نرم‌افزار برای تحلیل جریان در حالت تراکم ناپذیر، معادلات ناویر-استوکس را با روش حجم محدود بر روی یک میدان شبکه‌بندی حل می‌کند. فرم عمومی معادلات پیوستگی و مومنتم به ترتیب در روابط ۶ و ۷ ارائه شده است (Ghaderi et al., 2020).

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_j} = 0 \quad \text{رابطه ۶}$$

$$\frac{\delta U_i}{\delta t_i} + \rho U_i \frac{\partial U_i}{\partial x_i} - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho u'_j u'_i) + \rho g_i \quad \text{رابطه ۷}$$

که در آن، U_i و u'_i به ترتیب سرعت متوسط و سرعت نوسان در جهت x_i ، $U_i = (U, V, W)$ و $u'_i = (u', v', w')$ ، $x_i = (x, y, z)$ ، μ ، ρ و P به ترتیب جرم مخصوص، ویسکوزیته دینامیکی، فشار و شتاب گرانش می‌باشد. سرعت لحظه‌ای با استفاده از رابطه $u_i = U_i + u'_i$ برای هر سه جهت بدست می‌آید. شبیه‌سازی آشفته‌گی در نرم‌افزار FLOW-3D® با استفاده از مدل‌های آشفته‌گی صورت می‌گیرد که این مدل‌ها عبارتند از:

۱) مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES)، ۲) مدل دومعادله‌ای $k-\varepsilon$ ، ۳) مدل گروه‌های نرمال‌شده $k-\varepsilon$ (RNG) و ۴) طول اختلاط پاراتل.

در پژوهش حاضر از معادله‌های معروف دو معادله‌ای $k-\varepsilon$ استفاده می‌شود. با این تفاوت که ضرایب ثابت موجود در معادلات مدل $k-\varepsilon$ ، که توسط یک سری روش‌های تجربی استخراج می‌شدند، در مدل RNG بصورت روش صریح محاسبه می‌شوند. این مدل بر پایه گروه‌های نرمال‌شده رینولدز (RNG) که شامل رویکرد آماری برای حل معادلات متوسط‌گیری شده برای کمیت‌های آشفته‌گی نظیر انرژی جنبشی آشفته‌گی k و نرخ اتلاف آشفته‌گی ε آن است، می‌باشد. در شبیه‌سازی آشفته‌گی جریان با استفاده از مدل آشفته‌گی $k-\varepsilon$ (RNG) از معادلات زیر استفاده می‌کند.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad \text{رابطه ۸}$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{2\varepsilon}^* \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad \text{رابطه ۹}$$

که در معادلات فوق:

$$C_{2\varepsilon}^* = C_{2\varepsilon} + \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

$$\eta = \frac{Sk}{\varepsilon} \quad \text{رابطه ۱۱}$$

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

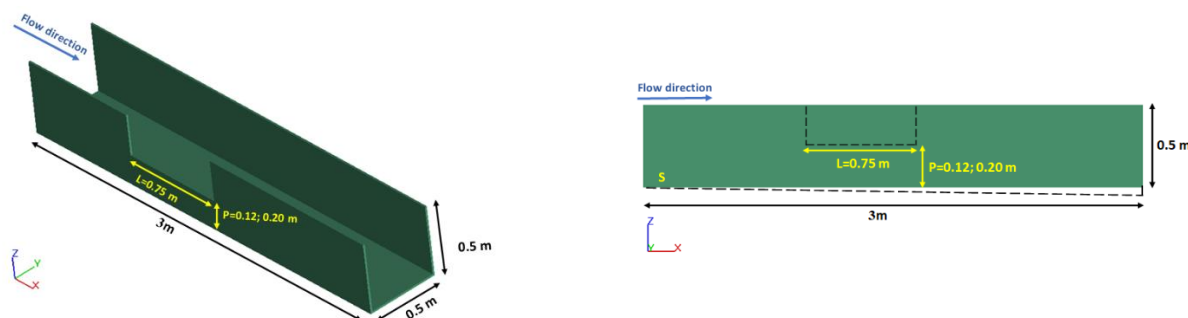
ضرایب بکارگرفته در مدل آشفتگی RNG مطابق جدول زیر می‌باشد.

جدول ۱. ثابت‌های مدل آشفتگی RNG ارائه شده توسط یاخوت و همکاران (۱۹۹۲)

C_μ	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	σ_k	σ_ε	η_0	β
۰/۰۸۴۵	۱/۴۲	۱/۶۸	۰/۷۱۹	۰/۷۱۹	۴/۳۸	۰/۰۱۲

مشخصات شبیه‌سازی و شبکه میدان حل

پارامترهای هندسی و هیدرولیکی متغیر شامل عدد فرود بالادست (Fr)، ارتفاع سرریز (P) و شیب بستر (S) می‌باشند که تأثیر هر کدام بر روی ضریب دبی جریان عبوری از سرریز جانبی لبه‌تیز بررسی شده است. بدین منظور سرریزهای جانبی در دو ارتفاع ۰/۱۲ و ۰/۲۰ متر با سه شیب بستر ۰/۰۰۱، ۰/۰۱ و ۰/۰۲ مختلف در ۸ عدد فرود بالادست مختلف با رژیم‌های زیربحرانی و فوق‌بحرانی و مجموعاً ۴۸ شبیه‌سازی انجام شد. در شکل ۲ نمایی از بدنه سرریز جانبی لبه‌تیز همراه با ابعاد آن ارائه شده است. شیب اولیه بستر کانال S=0.001 می‌باشد.

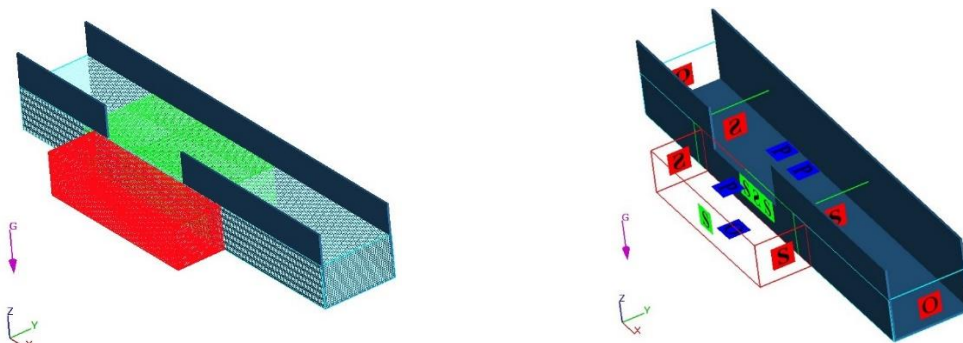


شکل ۲، نمایی از سرریز جانبی لبه‌تیز همراه با ابعاد آن

در تحقیق حاضر از ۳ مش بلاک با اندازه‌های مش مختلف انتخاب شده است. یک مش بلاک با ابعاد مش درشت‌تر و اندازه مش ۰/۱۲ متر در هر سه جهت برای کانال اصلی، یک مش بلاک در نواحی نزدیک سرریز جانبی با ابعاد مش ریزتر به اندازه مش ۰/۰۹ متر به طول ۱/۲۰ متر و هم عرض کانال اصلی در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که مش بلاک ریزتر در داخل مش بلاک بزرگ‌تر قرار گرفته است. با این تکنیک ابعاد سلول‌های محاسباتی در مش بلاک دوم ۳۰ تا ۴۵ درصد کوچک‌تر از ابعاد اسمی مش‌های بکار رفته در نرم‌افزار اعمال می‌شود. مش بلاک سوم نیز برای کانال فرعی با اندازه مش ۰/۰۸ متر به طول و عرض به ترتیب ۱/۲ متر و ۰/۳۵ متر ایجاد شده است. همچنین شرایط مرزی اعمال شده به همراه سایر مشخصات مش‌بندی در جدول ۲ و همچنین مش‌بندی شبکه میدان حل در شکل ۳ ارائه شده است.

جدول ۲. ابعاد مش‌بندی و شرایط مرزی شبکه میدان حل

نوع مش	تعداد مش	شرایط مرزی						سایز سلول (m)	مش بلاک
		Z direction		Y direction		X direction			
		Z max	Z min	Y max	Y min	X max	X min		
درشت	۳۹۸۵۶۲	Pressure	Wall	Symmetry	Symmetry	Outflow	VFR	۰/۰۱۲	MB 1
متوسط	۶۵۷۲۵۴	Pressure	Wall	Symmetry	Symmetry	Symmetry	Symmetry	۰/۰۰۹	MB 2
ریز	۹۸۷۶۵۲	Pressure	Outflow	Symmetry	Symmetry	Symmetry	Symmetry	۰/۰۰۸	MB 3



شکل ۳. شرایط مرزی اعمال شده در مدل تحقیق حاضر

معیارهای ارزیابی

جهت ارزیابی صحت‌سنجی پارامترهای بدست آمده از نتایج عددی با آزمایشگاهی حاصل از تحقیق Emiroglu et al., (2011) از دو پارامتر میانگین خطای مطلق (MAE) و درصد خطای متوسط (APE) استفاده شده که به ترتیب در روابط ۱۴ و ۱۵ ارائه شده است. ضریب دبی جریان عبوری از سرریز جانبی مورد صحت‌سنجی قرار گرفته است.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |M_{(EXP)} - M_{(NUM)}| \quad \text{رابطه ۱۴}$$

$$APE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{M_{(EXP)} - M_{(NUM)}}{M_{(EXP)}} \times 100 \right| \quad \text{رابطه ۱۵}$$

که در روابط فوق، $M_{(EXP)}$ پارامتر هیدرولیکی حاصل از نتایج آزمایشگاهی، $M_{(NUM)}$ پارامتر هیدرولیکی حاصل از حل عددی و N تعداد داده‌ها می‌باشد.

صحت‌سنجی

در تحقیق حاضر جهت صحت‌سنجی داده‌های عددی با آزمایشگاهی از تحقیق Emiroglu et al., (2011) استفاده شده است. در این تحقیق نتایج مربوط به نیم‌رخ سطح آب عبوری از سرریز جانبی و ضریب دبی جریان به دست آمده از Flow-3D با نتایج تحقیق Emiroglu et al., (2011) مقایسه و صحت‌سنجی شده است. در جدول ۳ نتایج پارامترهای ارزیابی ضریب دبی جریان عبوری از سرریز جانبی برای ارتفاع و طول سرریز جانبی به ترتیب ۲۰ و ۷۵ سانتی‌متر ارائه شده است. تحقیق حاضر در سال ۱۴۰۱ انجام گرفته و پیشینه پژوهش در بازه سال‌های ۱۹۳۴ تا ۲۰۲۲ ارائه شده است.

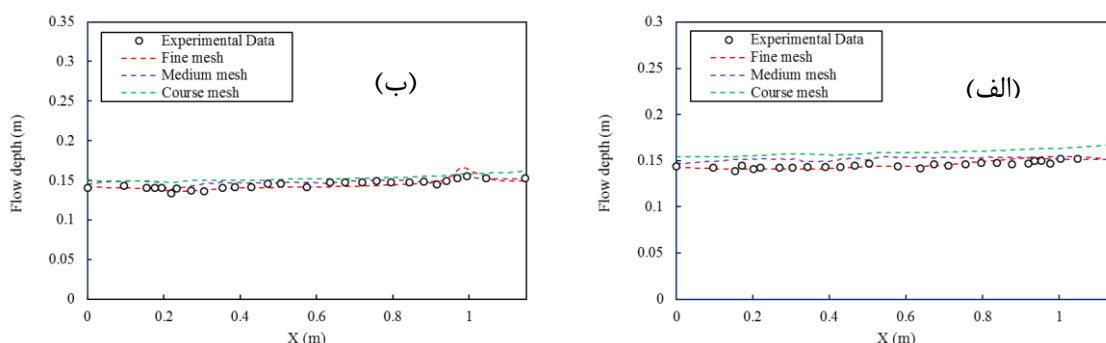
جدول ۳. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی ضریب دبی جریان عبوری از سرریز جانبی (L=0.75; P=0.2)

مدل	Fr (-)	C_d (EXP)	C_d (NUM)	MAE (-)	APE (%)
مدل ۱	۰/۲۸	۰/۵۸۳	۰/۵۵۴	۰/۰۲۸	۳/۹۳
مدل ۲	۰/۴	۰/۴۹۲	۰/۴۷۸	۰/۰۱۴	۲/۸۲
مدل ۳	۰/۶۳	۰/۵۴۵	۰/۵۵	۰/۰۰۵	۱/۰۴

در جدول ۳ نتایج حاصل از ضریب دبی جریان عبوری از سرریز جانبی را در سه عدد فرود بالادست مختلف نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که اختلاف بین نتایج عددی و آزمایشگاهی کمتر از ۵ درصد می‌باشد و بیشتر مقدار درصد خطا برای عدد فرود بالادست ۰/۲۸ و مقدار ۳/۹۳ درصد می‌باشد که می‌توان نتیجه گرفت تطابق خوبی بین نتایج حاکم است. مدل‌های ۱، ۲ و ۳ در جدول ۳ به ترتیب نتایج بهترین مدل در صحت‌سنجی داده‌های عددی و آزمایشگاهی برای اعداد فرود ۰/۲۸، ۰/۴ و ۰/۶۳ می‌باشد.

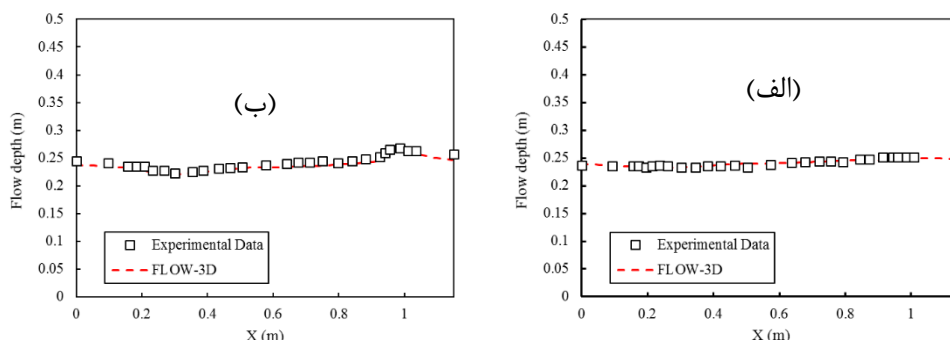
با مقایسه پروفیل سطح آب عبوری از سرریز جانبی در سه اندازه مختلف مش، با نتایج آزمایشگاهی مشاهده می‌شود که روند نتایج هماهنگی مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارد (شکل ۴). اختلاف نتایج بین اندازه مش متوسط و ریز کمتر از ۱/۵ درصد می‌باشد که نشان می‌دهد تأثیر اندازه مش در نتایج عددی تقریباً ناچیز است. لذا مش ریز بعنوان مش مناسب برای شبیه‌سازی انتخاب می‌شود. با توجه به اینکه با کوچک‌تر شدن اندازه مش، زمان پروسه شبیه‌سازی افزایش می‌یابد، لذا ریزتر کردن اندازه مش نسبت به حالت سوم برای کمتر کردن اختلاف ۱ درصد، شاید در برابر زمان و حجم خروجی شبیه‌سازی که می‌تواند اختلاف زمان و حجم خروجی شبیه‌سازی تقریباً ۲

برابری را ایجاد کند، به‌صرفه نباشد. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که اندازه مش ریز برای انتخاب بعنوان مش بهینه می‌تواند ایده‌آل می‌باشد. همچنین محدوده پارامترهای اندازه‌گیری شده در جدول ۴ ارائه گردیده است.



شکل ۴. مقایسه نیم‌رخ طولی جریان عبوری از سرریز جانبی در اندازه‌های مختلف مش الف: مقطع طولی نزدیک دهانه سرریز جانبی ب: مقطع طولی در مرکز عرضی کانال اصلی

شکل ۵ نتایج عددی نیم‌رخ طولی جریان عبوری از سرریز جانبی برای عدد فرود بالادست در دو مقطع طولی نزدیک دهانه سرریز جانبی و در مرکز عرضی کانال اصلی را در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که روند نیم‌رخ طولی جریان عبوری از سرریز جانبی برای نتایج عددی، نزدیک به نتایج آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده توسط Emiroglu et al., (2011) می‌باشد. مقادیر خطای MAE و APE برای مقطع طولی نزدیک به ترتیب ۰/۰۰۵۳ متر و ۲/۲۴ درصد و برای مقطع طولی در مرکز عرضی کانال اصلی به ترتیب ۰/۰۰۲۱ و ۰/۹۳ درصد می‌باشند که بیان‌گر ناچیز بودن خطای بین دو مقادیر عددی و آزمایشگاهی است.



شکل ۵. مقایسه پروفیل طولی جریان عبوری از سرریز جانبی (F1=0.63; L=0.75m; P=0.2m) الف: مقطع طولی نزدیک دهانه سرریز جانبی ب: مقطع طولی در مرکز عرضی کانال اصلی

جدول ۴. محدوده متغیرهای عددی پژوهش حاضر

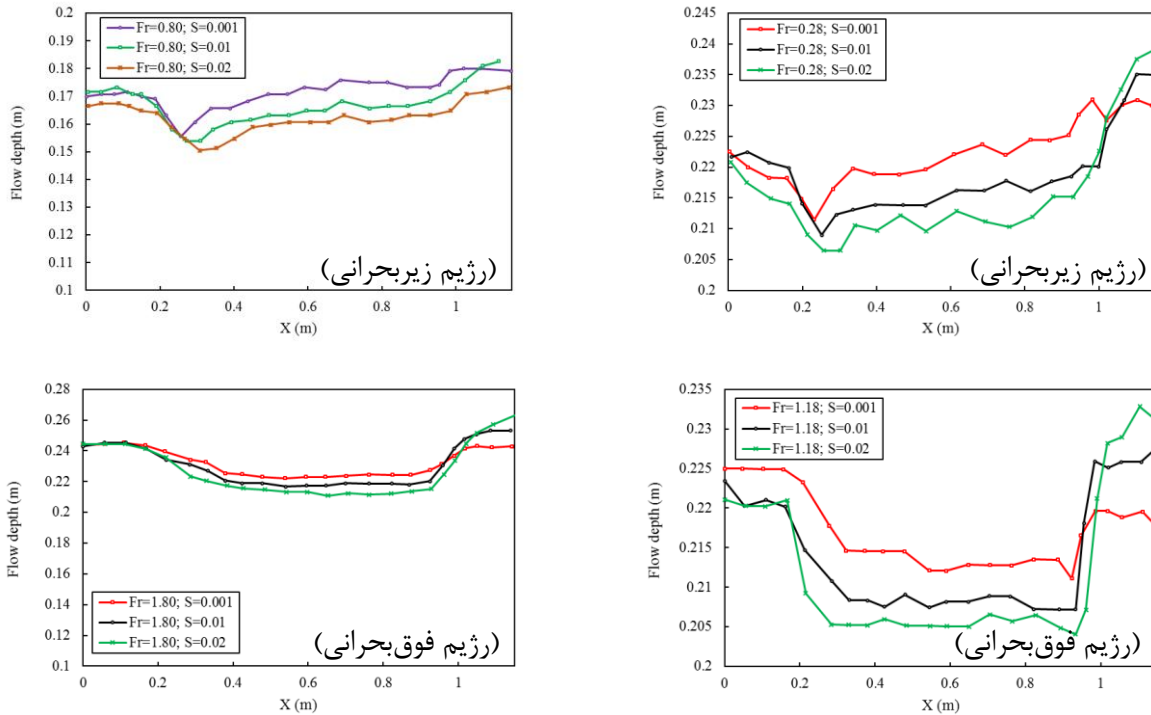
شیب بستر	طول سرریز (m)	ارتفاع سرریز (m)	عدد فرود بالادست	عمق جریان بالادست (m)	دبی ورودی (L/S)
۰/۰۲ و ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱	۰/۷۵	۰/۱۲ و ۰/۲۰	۱/۸ - ۰/۱۶۹	۰/۲۴۲ - ۰/۱۴	۳۳۰-۱۵

نتایج و بحث

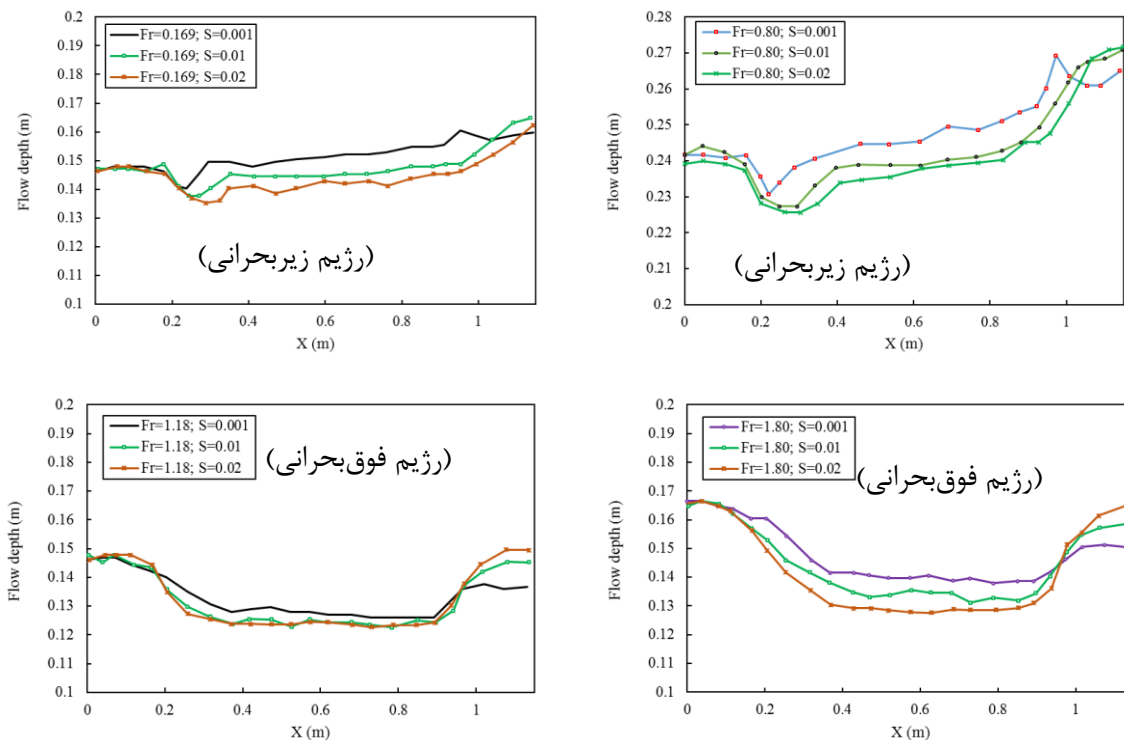
پروفیل طولی سطح جریان

در فعالیت‌های اجرایی، عموماً کانال‌های آبیاری و انتقال آب شیب‌دار هستند. شیب‌های بستر در نظر گرفته شده ۰/۰۰۱ (شیب شاهد)، ۰/۰۱ و ۰/۰۲ می‌باشند. در شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب پروفیل سطح جریان در امتداد طولی سرریز جانبی برای ارتفاع ۰/۲ متر و ۰/۱۲ متر و در دو رژیم جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی ارائه شده است. مشاهده می‌شود که در هر دو رژیم جریان، با افزایش شیب بستر کانال اصلی،

سطح جریان عبوری از روی سرریز کاهش می‌یابد. بطوریکه در رژیم جریان زیربحرانی، افت سطح جریان در ابتدای سرریز، با افزایش شیب بستر کانال، کمی گسترده‌تر و به سمت پایین‌دست منتقل می‌شود. با این حال روند افزایشی سطح جریان در رژیم جریان زیربحرانی تا انتهای سرریز در بسترهای شیب‌دار هم وجود دارد.



شکل ۶. تأثیر شیب بستر بر روی تغییرات پروفیل سطح جریان عبوری از سرریز جانبی ($P=0.20\text{ m}$) در رژیم‌های زیر و فوق‌بحرانی

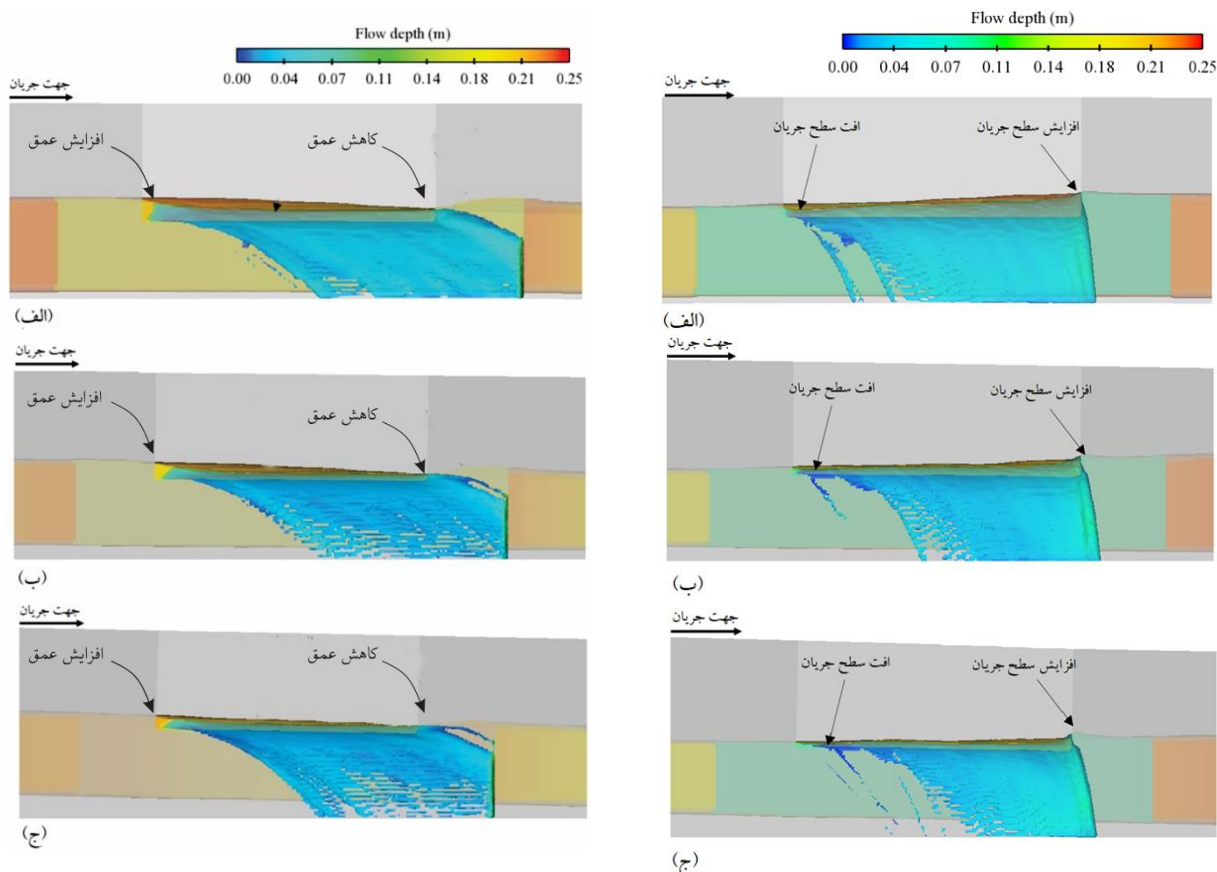


شکل ۷. پروفیل سطح جریان عبوری از سرریز جانبی در رژیم جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی ($P=0.12\text{ m}$)

هم‌چنین میزان کاهش سطح جریان با افزایش شیب بستر در ابتدای سرریز، بیشتر از انتهای آن می‌باشد. در رژیم جریان فوق‌بحرانی

نیز افت سطح جریان با افزایش شیب بستر کانال در ابتدای سرریز بیشتر از انتهای آن بوده و تقریباً اثرات شیب بستر روی سطح جریان در انتهای سرریز و پایین دست کانال اصلی ناچیز است. نتایج این بخش با نتایج (Azimi and Shabanlou (2018) تطابق دارد. نکته بعدی این است که تفاوت زیادی میان افت سطح جریان در مدل‌های سرریز با ارتفاع مختلف وجود ندارد.

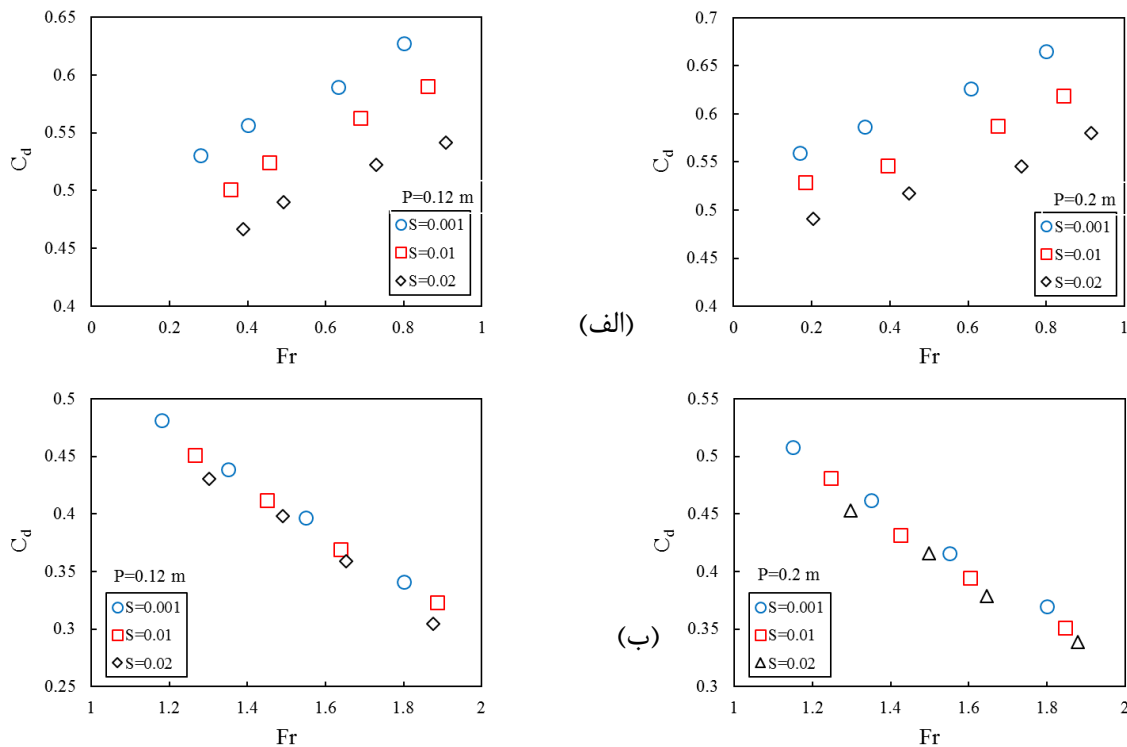
در شکل ۸ تغییرات عمق جریان برای دو رژیم زیربحرانی و فوق‌بحرانی در امتداد کانال و نزدیکی سرریز جانبی نمایش داده شده است. در این شکل به خوبی تأثیر شیب بستر در رژیم‌های جریان متفاوت بر پروفیل سطح جریان در نزدیکی سرریز جانبی نمایش داده شده است. افت سطح جریان با افزایش شیب بستر کانال در هر دو رژیم و روند صعودی عمق جریان در رژیم زیربحرانی و روند نزولی عمق جریان در امتداد سرریز در رژیم فوق‌بحرانی قابل مشاهده است.



شکل ۸. تغییرات عمق جریان در امتداد سرریز جانبی (سمت راست: رژیم زیربحرانی، سمت چپ: رژیم فوق‌بحرانی)
الف: $S=0.001$ ؛ ب: $S=0.01$ ؛ ج: $S=0.02$

راندمان سرریز جانبی و ضریب دبی جریان

در شکل ۹ تغییرات ضریب دبی به ازای عدد فرود در شرایط شیب بستر متفاوت و ارتفاع سرریز مختلف و دو رژیم جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی ارائه شده است. مشاهده می‌شود که در یک عدد فرود ثابت، با افزایش شیب بستر کانال اصلی ضریب دبی کاهش می‌یابد. بطوریکه در رژیم جریان زیر بحرانی و برای ارتفاع سرریز $0/12$ و $0/2$ متر، افزایش شیب بستر کانال به ترتیب باعث کاهش $15/86$ و $14/54$ درصد کاهش می‌یابد. با مقایسه رژیم‌های جریان در شیب‌های بستر متفاوت، می‌توان بیان کرد که روند افزایشی ضریب دبی در رژیم جریان زیربحرانی و روند کاهشی آن در رژیم جریان فوق‌بحرانی به ازای افزایش عدد فرود، در شیب‌های مختلف بستر پابرجا بوده با این تفاوت که تأثیر شیب بستر در کاهش ضریب دبی در رژیم جریان زیربحرانی، بیشتر از رژیم جریان فوق‌بحرانی است. برای مثال، ضریب دبی برای مدل سرریز با ارتفاع $0/2$ متر، با افزایش شیب بستر کانال در رژیم جریان زیربحرانی $14/54$ درصد کاهش می‌یابد، این در حالی است که در رژیم جریان فوق‌بحرانی ضریب دبی $9/26$ درصد کاهش یافته است.



شکل ۹. تغییرات ضریب جریان عبوری از سرریز جانبی در شیب‌های مختلف بستر الف: رژیم جریان زیربحرانی ب: رژیم جریان فوق‌بحرانی

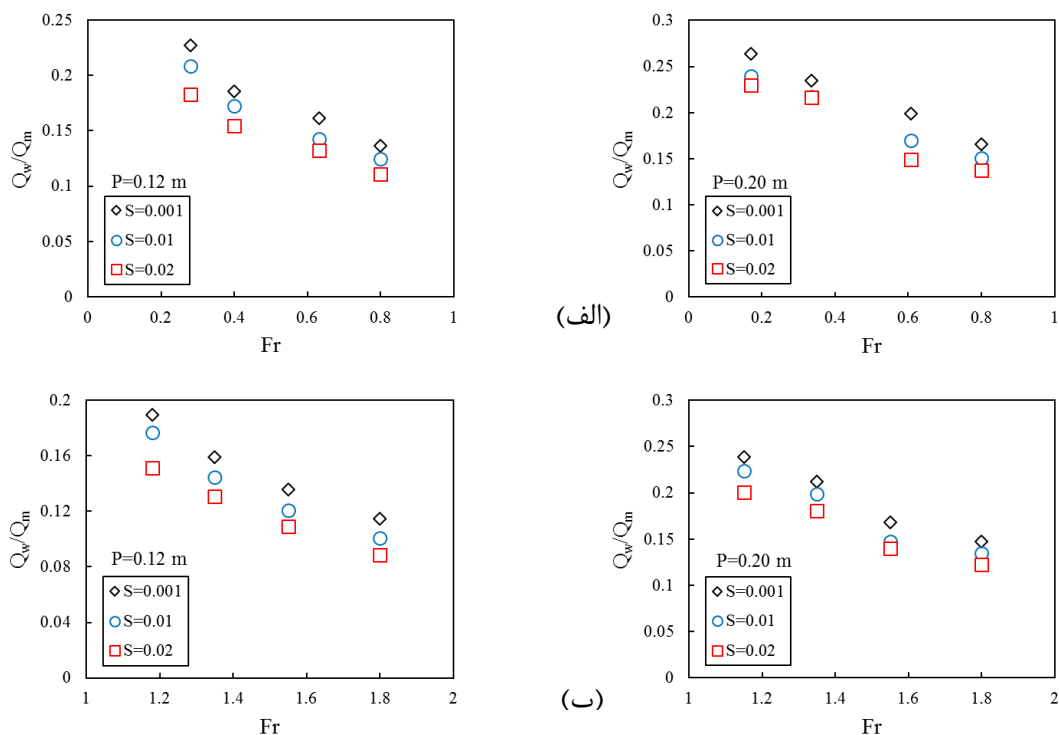
در شکل ۱۰ تغییرات راندمان سرریزهای جانبی مستطیلی به ازای شیب‌های مختلف بستر را در مقابل عدد فرود نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که برای یک مدل سرریز جانبی با ارتفاع ثابت، با افزایش شیب بستر کانال، راندمان سرریز کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر افزایش شیب بستر باعث کاهش دبی جریان عبوری از سرریز جانبی می‌گردد. بطوریکه در رژیم جریان زیربحرانی و برای مدل‌های سرریز با ارتفاع ۰/۱۲ متر و ۰/۲ متر، افزایش تقریباً ۲ درصد شیب بسستر، باعث کاهش راندمان سرریز به ترتیب ۰/۲۳ درصد و ۲۰ درصد می‌گردد. تأثیر شیب بستر در کاهش راندمان سرریز در ارتفاع کمتر سرریز بیشتر است. هم‌چنین در تمامی مدل‌ها با افزایش عدد فرود، روند تغییرات راندمان سرریز در هر دو رژیم جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی نزولی است. علت این امر می‌تواند ناشی از افزایش سرعت جریان با افزایش شیب بستر کانال اصلی و عدم فرصت کافی برای ورود جریان جانبی از سرریز به کانال فرعی باشد. با مقایسه دو رژیم جریان برای یک ارتفاع ثابت سرریز، می‌توان کاهش راندمان سرریز را در رژیم جریان فوق‌بحرانی نسبت به زیربحرانی مشاهده کرد. بطور متوسط در بیشترین شیب بستر کانال ($S=0.02$) با تغییر رژیم از زیربحرانی به فوق‌بحرانی، راندمان سرریز ۱۱/۳۹ درصد کاهش می‌یابد.

توزیع سرعت جریان

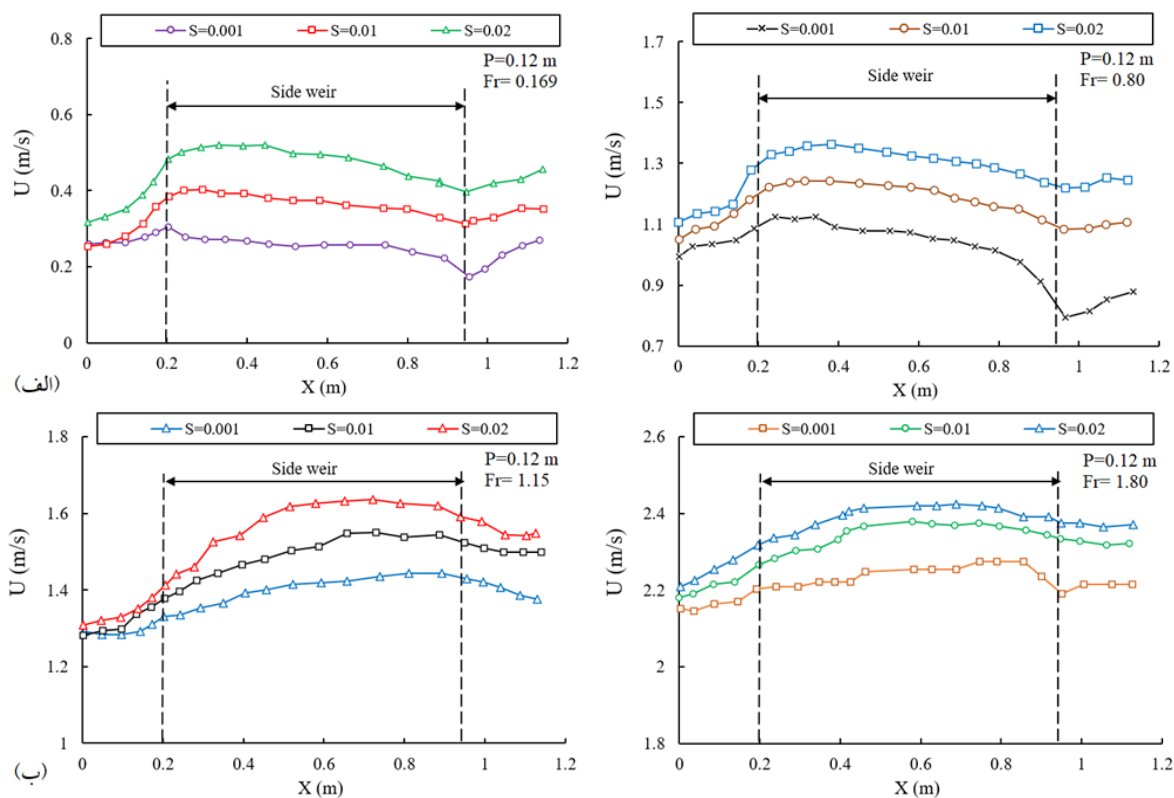
تأثیر شیب بستر کانال اصلی بر توزیع طولی سرعت در امتداد سرریز و در شرایط رژیم جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی در شکل ۱۱ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش شیب بستر کانال، سرعت در امتداد طولی سرریز، در هر دو رژیم جریان افزایش یافته است. بطوریکه در رژیم جریان زیربحرانی توزیع سرعت طولی، در ابتدای سرریز افزایشی و با حرکت به سمت انتهای سرریز کاهشی می‌یابد. این در حالی است که در رژیم جریان فوق‌بحرانی توزیع سرعت طولی در ابتدای سرریز تا یک سوم انتهایی آن افزایشی و در نزدیکی انتهای سرریز کاهش محسوسی دارد. بطور میانگین سرعت طولی با افزایش شیب بستر از ۰/۰۰۱ به ۰/۰۲ در رژیم جریان زیربحرانی ۱۰/۸۸ درصد و در رژیم جریان فوق‌بحرانی ۶/۱۷ درصد افزایش می‌یابد.

در شکل ۱۲ تأثیر شیب بستر کانال اصلی بر توزیع عرضی سرعت عرضی در امتداد سرریز و در شرایط رژیم جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی ارائه شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش شیب بستر کانال، سرعت عرضی در امتداد طولی سرریز، در هر دو رژیم جریان کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر با افزایش شیب بستر کانال، جریان با سرعت کمتری به سمت کانال فرعی منحرف می‌شود. با این حال در هر دو رژیم جریان و در هر سه شیب بستر مورد مطالعه تحقیق حاضر، توزیع سرعت عرضی، تقریباً در اواسط طولی سرریز متمایل به یک سوم انتهایی آن به حداکثر مقدار خود می‌رسد. بطور میانگین سرعت عرضی با افزایش شیب بستر از ۰/۰۰۱ به ۰/۰۲ در رژیم جریان زیربحرانی

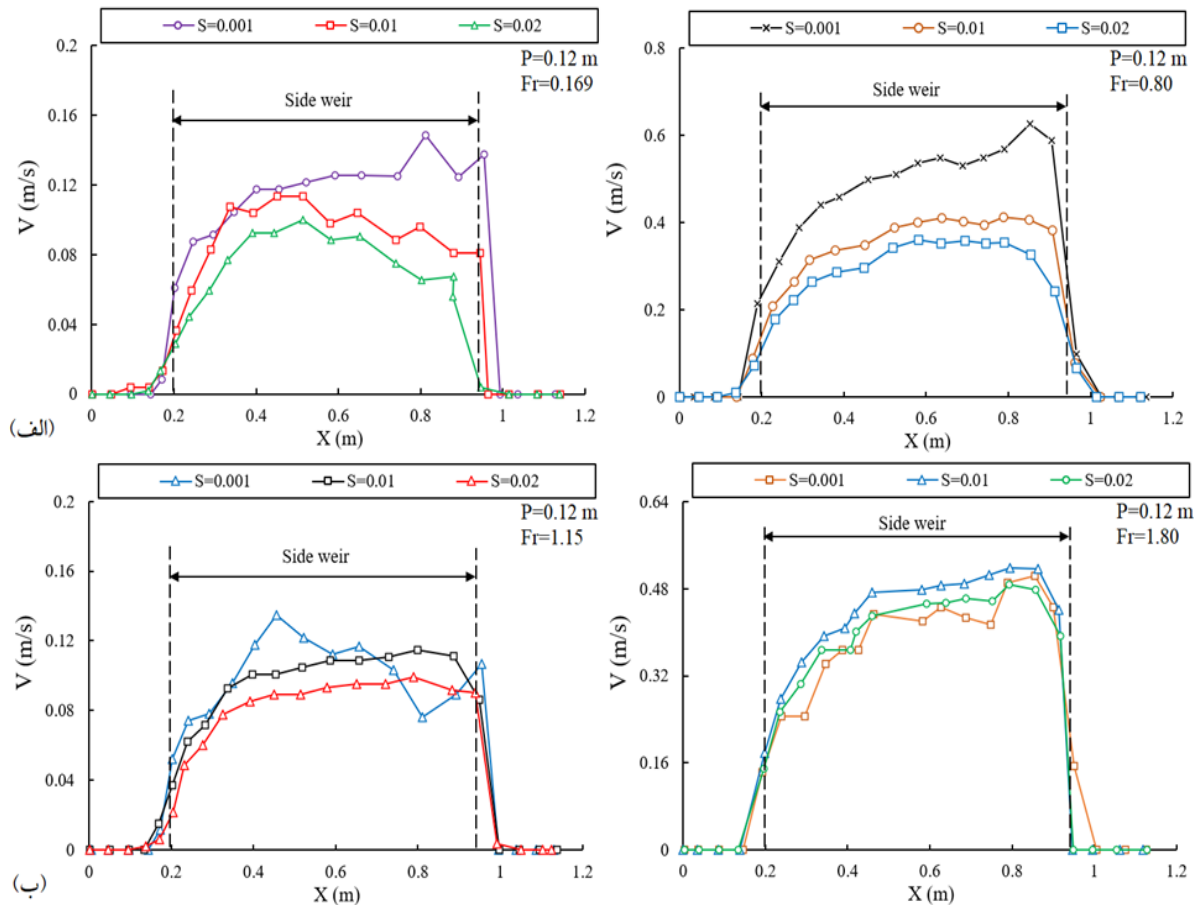
۲۲/۲۳ درصد و در رژیم جریان فوق بحرانی ۴/۸ درصد کاهش می‌یابد.



شکل ۱۰. تغییرات راندمان سرریز جانبی در شیب بستر متفاوت: الف) رژیم زیر بحرانی، ب) رژیم فوق بحرانی

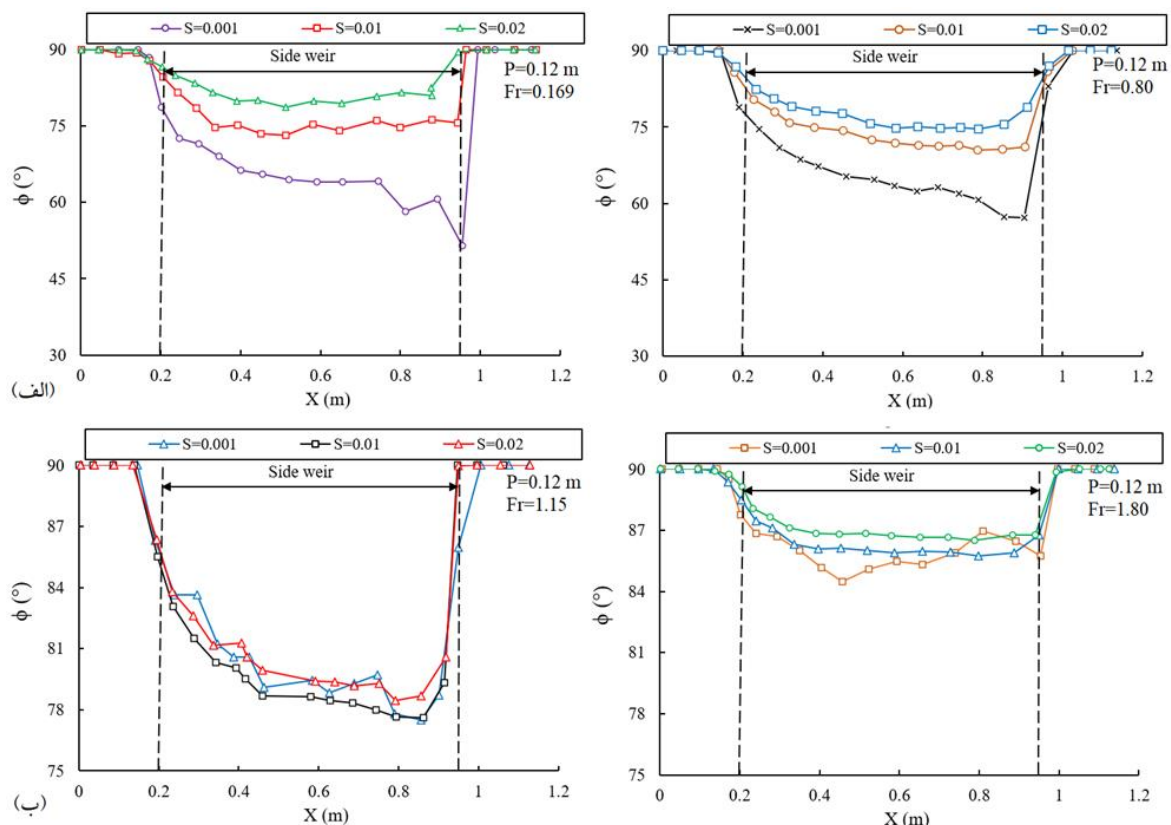


شکل ۱۱. توزیع طولی سرعت جریان در امتداد سرریز جانبی در شیب‌های بستر متفاوت الف: رژیم جریان زیر بحرانی ب: رژیم جریان فوق بحرانی



شکل ۱۲: توزیع عرضی سرعت جریان در امتداد سرریز جانبی در شیب‌های بستر متفاوت (الف) رژیم جریان زیربحرانی (ب) رژیم جریان فوق‌بحرانی

تغییرات زاویه انحرافی جت ریزشی در امتداد سرریز جانبی در شکل ۱۳ برای شیب‌های مختلف بستر کانال نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، افزایش شیب بستر کانال در هر دو رژیم جریان باعث کاهش زاویه انحرافی جت ریزشی در امتداد سرریز می‌گردد. علت آن افزایش سرعت طولی جریان و سخت شدن انحراف جریان به کانال اصلی می‌باشد. در این شکل نیز مشخص است که در هر سه شیب بستر کانال و در هر دو رژیم جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی، زاویه ϕ در ابتدا و انتهای سرریز ۹۰ درجه است که نشانگر عدم انحراف خطوط جریان از کانال اصلی به کانال فرعی می‌باشد. روند تغییرات زاویه انحرافی جت جریان تقریباً در هر سه شیب بستر یکسان است. بطوریکه در رژیم جریان زیربحرانی و با حرکت جریان در امتداد طولی سرریز جانبی، زاویه ϕ کاهش یافته و تقریباً در یک سوم انتهایی سرریز به حداقل مقدار خود می‌رسد. در رژیم جریان فوق‌بحرانی تقریباً روند کاهشی زاویه ϕ تا یک سوم انتهایی سرریز و افزایش آن تا انتهای سرریز با رژیم جریان زیر بحرانی یکسان است. در اعداد فرود بالا، جریان با زاویه کمتری به سمت کانال فرعی منحرف می‌شوند. بطور میانگین زاویه انحراف جت ریزشی با افزایش شیب بستر از ۰/۰۰۱ به ۰/۰۲ در رژیم جریان زیربحرانی ۱۲/۵۷ درصد و در رژیم جریان فوق‌بحرانی ۷/۷۲ درصد کاهش می‌یابد.



شکل ۱۳: تغییرات زاویه انحراف ریزش جت در امتداد سرریز جانبی در شیب‌های بستر متفاوت (الف) رژیم جریان زیربحرانی (ب) رژیم جریان فوق‌بحرانی

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به مطالعه و بررسی عددی تأثیر شیب بستر بر عملکرد هیدرولیکی سرریزهای جانبی در جریان فوق‌بحرانی و زیر بحرانی پرداخته شد. در پژوهش حاضر مشخصات جریان، شامل پروفیل سطح جریان، انرژی مخصوص، راندمان سرریز و ضریب دبی و توزیع سرعت طولی و عرضی در امتداد سرریز جانبی بررسی شد. با توجه به اهداف کلی تحقیق حاضر، اهم نتایج بدست آمده در بخش بعدی ارائه می‌گردد.

صحت‌سنجی داده‌های عددی با نتایج آزمایشگاهی با مقایسه سطح آب عبوری از سرریز جانبی و ضریب دبی جریان انجام گرفت. مقادیر خطای MAE و APE پروفیل سطح جریان برای عدد فرود ($Fr=0.63$) به ترتیب 0.053 و $2/24$ درصد و مقدار خطای نسبی برای ضریب دبی $4/93$ درصد حاصل شد که نشان‌گر کم بودن خطا و تطابق قابل قبول بین دو مقادیر عددی و آزمایشگاهی است. با بررسی پروفیل سطح جریان عبوری از سرریزها در دو رژیم جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی مشاهده شد که در رژیم جریان زیر بحرانی، هنگامی که عمق جریان در نزدیکی ابتدای سرریز جانبی بزرگتر از عمق بحرانی باشد، در ابتدای بالادست سرریز سطح جریان کمی دچار کاهش عمق داشته و در طول سرریز تا انتهای آن، روند صعودی دارد. در رژیم جریان فوق‌بحرانی عمق جریان با نزدیک شدن به ابتدای سرریز جانبی تقریباً با عمق جریان بحرانی برابر شده و سطح جریان روند کاهشی را تا انتهای سرریز داشته و در انتهای سرریز، افزایش نسبی در عمق جریان مشاهده گردید.

در تمامی مدل‌ها با افزایش عدد فرود، روند تغییرات راندمان سرریز در هر دو رژیم جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی به دلیل افزایش سرعت جریان و عدم فرصت کافی برای ورود جریان انحرافی از سرریز به کانال فرعی نزولی بود. در رژیم جریان زیربحرانی، با افزایش عدد فرود، ضریب دبی افزایش می‌یابد این در حالی است که در رژیم جریان فوق‌بحرانی با افزایش عدد فرود، ضریب دبی کاهش می‌یابد. ضریب دبی با افزایش عدد فرود در رژیم جریان زیربحرانی تا $15/8$ درصد افزایش و در رژیم جریان فوق‌بحرانی تا $41/1$ درصد کاهش یافت. افزایش ضریب دبی با افزایش ارتفاع سرریز، بین $4/6$ تا $7/8$ درصد متغیر بود.

با بررسی توزیع طولی سرعت مشاهده شد که در رژیم جریان زیربحرانی، حداکثر سرعت طولی در ابتدای بالادست سرریز جانبی اتفاق می‌افتد و با حرکت به سمت پایین دست سرریز، سرعت جریان کاهش پیدا می‌کند و با خارج شدن از طول سرریز، مجدد افزایش می‌یابد. در رژیم جریان فوق بحرانی با ورود جریان از بالادست سرریز جانبی، روند افزایشی دارد و هنگامی که به انتهای سرریز می‌رسد و با خارج شدن از طول سرریز، کاهش می‌یابد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

- اسمعیل‌پور، لیدا؛ فرسادی‌زاده، داود و علی حسین‌زاده دلیر (۱۳۹۵). بررسی مشخصات هیدرولیکی سرریز جانبی کنگره‌ای نیم‌دایره‌ای یک طرفه. *دانش آب و خاک*، ۲۶ (۱)، ۱۸۷-۱۹۵.
- حق‌شناس، وحید و علیرضا وطن‌خواه (۱۳۹۴). مقایسه روش‌های مختلف تخمین دبی سرریز جانبی لبه‌تیز نیم‌دایره‌ای در رژیم جریان زیربحرانی. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۴۶ (۴)، ۶۶۳-۶۷۱.
- داشفرز، رسول؛ امین‌وش، احسان و عباس‌زاده، حمیدرضا (۱۴۰۰). شبیه‌سازی عددی استهلاك انرژی در مواجهه با انقباض هلالی شکل مسیر جریان. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۲ (۲)، ۱۳۹۹-۱۳۱۴.
- کریمی، محمود؛ جلیلی قاضی‌زاده، محمدرضا؛ صانعی، مجتبی و جلال عطاری (۱۳۹۹). بررسی آزمایشگاهی سرریز کلید پیانویی جانبی با کلیدهای مورب. *نشریه مهندسی عمران امیرکبیر*، ۵۲ (۷)، ۱۶۷۱-۱۶۸۴.

REFERENCES

- Abbasi, S., Fatemi, S., Ghaderi, A., & Di Francesco, S. (2020). The effect of geometric parameters of the antivortex on a triangular labyrinth side weir. *Water*, 13(1), 14.
- Aydin, MC., & Emiroglu, ME. (2013). Determination of capacity of labyrinth side weir by CFD. *Flow Measurement and Instrumentation*, 29, 1-8.
- Azimi, H., & Shabanlou, S. (2018). Numerical study of bed slope change effect of circular channel with side weir in supercritical flow conditions. *Applied Water Science*, 8(6), 1-10.
- Azimi, H., Shabanlou, S., Ebtehaj, I., & Bonakdari, H. (2016). Discharge coefficient of rectangular side weirs on circular channels. *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, 17(7-8), 391-399.
- Bilhan, O., Emiroglu, M. E., & Kisi, O. (2010). Application of two different neural network techniques to lateral outflow over rectangular side weirs located on a straight channel. *Advances in Engineering Software*, 41(6), 831-837.
- Borghei, S.M., Jalili, M.R., & Ghodsian, M. (1999). Discharge coefficient for sharp-crested side weir in subcritical flow. *Journal of Hydraulic engineering*, 125(10), 1051-1056.
- Daneshfaraz, R., Aminvash, E., & Abbaszadeh, H. (2021). Numerical Simulation of Energy Dissipation in Crescent-Shaped Contraction of the Flow Path. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(5), 1299-1314 (in persian).
- Daneshfaraz, R., Aminvash, E., Di Francesco, S., Najibi, A., & Abraham, J. (2021b). Three-dimensional study of the effect of block roughness geometry on inclined drop. *Numerical Methods in Civil Engineering*, 6 (1), 1-9.
- Daneshfaraz, R., Aminvash, E., Esmaeli, R., Sadeghfam, S., & Abraham, J. (2020). Experimental and numerical investigation for energy dissipation of supercritical flow in sudden contractions. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 8(4), 396-406.
- Daneshfaraz, R., Aminvash, E., Ghaderi, A., Kuriqi, A., & Abraham, J. (2021a). Three-dimensional investigation of hydraulic properties of vertical drop in the presence of step and grid dissipators. *Symmetry*, 13(5), 895.
- De marchi, G. (1934). Saggio di teotia de funzionalmental degli stramazzi laterali. *L'Energia Electricia*, Rome, Italy, 11, 849-860 (in Italian).
- Emiroglu, M. E., Agaccioglu, H., & Kaya, N. (2011). Discharging capacity of rectangular side weirs in straight open channels. *Flow Measurement and Instrumentation*, 22(4), 319-330.
- Esmailpour, L., Farsadizadeh, D., & Hosseinzadeh Dalir, A. (2016). Investigation of Hydraulic Characteristics of One-Side Semi-Circular Labyrinth SideWeir. *Water and Soil Science*, 26(1-1), 187-

- 195 (in persian).
- Ghaderi, A., Dasineh, M., Abbasi, S., & Abraham, J. (2020). Investigation of trapezoidal sharp-crested side weir discharge coefficients under subcritical flow regimes using CFD. *Applied Water Science*, 10(1), 1-12.
- Gharib, R., Heydari, M., Kardar, S., & Shabanlou, S. (2020). Simulation of discharge coefficient of side weirs placed on convergent canals using modern self-adaptive extreme learning machine. *Applied Water Science*, 10(1), 1-11.
- Haghshenas, V., & Vatankhah, A. (2015). Comparison of Different Discharge Estimation Methods for Sharp-Crested Semi-Circular Side Weir under Subcritical Flow Regimes. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 46(4), 663-671 (in persian).
- Jalili Ghazizadeh, M., Fallahi, H., & Jabbari, E. (2022). Characteristics of water surface profile over rectangular side weir for supercritical flows. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 147(5), 04021011.
- Kadhim, A.M., & Majid, F. (2019). Experimental study to estimate the discharge coefficient over inclined side spillway. *Wasit Journal of Engineering Sciences*, 7(2), 44-54.
- Karimi, M., Jalili-Ghazizadeh, M., saneie, M., & Attari, J. (2020). Experimental study of piano key side weir with oblique keys. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(7), 1671-1684 (in persian).
- Keshavarzi, A., Fararoui, A. R., & Honar, T. (2001). Hydraulic of flow over side weir in open-end and closed-end conditions. *J. Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 123(4): 461-475.
- Maranzoni, A., Pilotti, M., & Tomirotti, M. (2017). Experimental and numerical analysis of side weir flows in a converging channel. *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(7), 04017009.
- Paris, E., Solari, L., & Bechi, G. (2012). Applicability of the De Marchi hypothesis for side weir flow in the case of movable beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, 10(1061), 653-656.
- Ramamurthy, A.S., Qu, J., & Vo, D. (2006). Nonlinear PLS method for side weir flows. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 132(5), 486-489.
- Ranga Raju, K. G., Gupta, S.K., & Prasad, B. (1979). Side weir in rectangular channel. *Journal of the Hydraulics Division*, 105(5), 547-554.
- Rasaei, M., & Salemian, A. (2021). Application of numerical model in determining the discharge coefficient containing suspended sediments passing through side weirs. *Journal of Hydraulic Structures*, 7(3), 42-58.
- Rosier, B. (2007). Interaction of side weir overflow with bed-load transport and bed morphology in a channel. *Laboratoire de constructions hydrauliques*.
- Subramanya, K., Awasthy, D. & Satyanarayana, T. (1972). Spatially varied flow over side weirs. *Journal of Hydraulic Division*, 98(1), 1-10.
- Uyumaz, A. (2005). Discharge control by a side weir in a triangular main channel. 10th International Conference on Urban Drainage, Copenhagen, Denmark, August 21-26.
- Venutelli, M. (2008). Method of solution of non-uniform flow with the presence of rectangular side weir. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 134(6), 840-846.
- Yakhot, V., Orszag, S. A., Thangam, S., Gatski, T. B., & Speziale, C. G. (1992). Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 4(7), 1510-1520.



Numerical Simulation of the Effect of Channel bed Slope on the Hydraulic Performance of Sharp-Crested Rectangular Side Weir with Subcritical and Supercritical Regimes

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Side weirs are types of hydraulic structures, which are used for different purposes in water transmission systems. In most of the irrigation and water transfer channel construction operations, based on the topography of the land, the bottom of the channels is sloped, and depending on the hydrological conditions of the region, both subcritical and supercritical flow regimes may be created. The aim of this research is to numerically investigate the effect of bed slope on the hydraulic performance of side weirs in supercritical and subcritical flow.

Materials and Methods

The computational fluid dynamics method and FLOW-3D[®] software and RNG turbulent method were used to simulate the flow. The present research was carried out in 2022 and the literature review is presented in the period from 1934 to 2022. By examining the surface profile of the flow passing through the weirs at different bed slopes, it was observed that in a fixed slope, in the subcritical flow regime, the trend of the surface profile is increases from the beginning to the end of the weir, and decreasing in the supercritical flow regime. As the slope of the main channel bed increases, the level of flow passing over the weir decreases. On average, by changing the regime from subcritical to supercritical, the weir efficiency decreased by 11.21 percent.

Results and Discussion

Validation of numerical data with laboratory results was done by comparing the level of water passing through the side weir, and the coefficient of flow. The MAE, and APE error values of the flow surface profile for the Froude number ($Fr=0.63$) were 0.0053, and 2.24%, respectively, and the relative error value for the discharge coefficient was 4.93%, which indicates the low error and acceptable agreement between the values It is numerical and experimental. Increasing the bed slope decreased the weir efficiency and flow rate coefficient in the subcritical flow regime up to 14.54 percent and in the supercritical flow regime up to 9.26 percent. The increase in flow rate coefficient with the increase of the weir height varied between 4.6 and 7.8 percent. With the increase of the slope of the channel bed, the velocity along the length of the weir increases by 10.88 and 6.17 percent, respectively, in the subcritical and supercritical flow regimes, and the transverse velocity along the transverse direction for the subcritical and supercritical flow regimes decreased by 22.23 and 4.8 percent, respectively. By examining the longitudinal distribution of the velocity, it was observed that in the subcritical flow regime, the maximum longitudinal velocity occurs at the beginning of the upstream of the side weir, and by moving towards the downstream of the weir, the flow velocity decreases and increases again after leaving the length of the weir. In the supercritical flow regime, it has an increasing trend when the flow enters from the upstream of the side weir, and it decreases when it reaches the end of the weir, and goes out of the length of the weir.

Keywords: *Bed slope, Flow rate coefficient, Flow regime, Side weir, Velocity distribution.*