

Numerical Investigation of the Effect of Side Guide Plates on Flow Pattern and Hydraulic Performance of a Converging Side Weir

Kosar Neysi, Mehdi Daryaei*, Seyed Mahmood Kashefipour and Mohammadreza Zayeri¹

(Received: August 16-2025 ; Revised: September 8-2025 ; Accepted: September 29-2025)

1. Department of Water Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

*: Corresponding author, Email: M.Daryaei@scu.ac.ir

Abstract

One of the key challenges in the design of side weirs is enhancing discharge efficiency, which is defined as the dimensionless ratio of the flow rate over the weir to the total incoming discharge. This study investigates the hydraulic performance of a converging side weir equipped with flow-guiding side plates. A three-dimensional numerical model using FLOW-3D software was employed to simulate flow conditions in the presence of guide plates with varying angles, relative lengths (defined as the ratio of plate length to the upstream channel width), and installation positions, to identify hydraulically optimal configurations. Following validation of the model against experimental data, 28 different scenarios were evaluated. The results demonstrated that under proper conditions, the installation of side guide plates can significantly improve discharge efficiency. Among all cases, the configuration with a 60° deflecting angle and a relative length of 0.2, installed at the upstream location (X_1) of the weir, yielded the best performance, increasing efficiency from a baseline of 62% to 82%. Analysis of the velocity field further revealed that the formation of a low-velocity zone behind the plate plays a critical role in directing the flow toward the weir. Overall, the use of side guide plates presents a simple, low-cost, and effective solution for enhancing the hydraulic performance of converging side weirs without requiring structural redesign.

Keywords: Oblique side weir, Flow pattern, Weir discharge efficiency, Irrigation and drainage network

How to cite this article: Neysi, K., Daryaei, M., Kashefipour, S.M. and Zayeri, M. 2025. Numerical Investigation of the Effect of Side Guide Plates on Flow Pattern and Hydraulic Performance of a Converging Side Weir. *J. Water and Soil Sci.* 29(4): 94-109. DOI: [10.47176/jwss.29.4.72011](https://doi.org/10.47176/jwss.29.4.72011)

Copyright © 2025 Neysi et al. Published by Isfahan University of Technology.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

بررسی عددی تأثیر صفحات جانبی هدایت کننده بر الگوی جریان و عملکرد هیدرولیکی سرریز جانبی همگرا

کوثر نیسی، مهدی دریائی* , سید محمود کاشفی پور و محمدرضا زایری^۱

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۵/۲۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۶/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۷/۷)

۱. گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: M.Daryaei@scu.ac.ir

چکیده

یکی از چالش‌های اساسی در طراحی سرریزهای جانبی، افزایش راندمان تخلیه سرریز است که به صورت نسبت بدون بعد دبی عبوری از سرریز به دبی جریان ورودی تعریف می‌شود. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر صفحات جانبی هدایت کننده بر عملکرد هیدرولیکی سرریز جانبی همگرا انجام شد. برای این منظور، از نرم افزار FLOW-3D به منظور شبیه سازی جریان در حضور صفحات با زوایا، طول‌های نسبی (نسبت طول صفحه به عرض کانال بالادست) و موقعیت‌های مختلف نصب استفاده شد تا شرایط بهینه نصب صفحه از نظر هیدرولیکی شناسایی شود. پس از اعتبارسنجی مدل با داده‌های آزمایشگاهی، ۲۸ سناریو ارزیابی شد. نتایج نشان داد که نصب صفحات جانبی می‌تواند در شرایط مناسب، راندمان تخلیه را به طور قابل توجهی افزایش دهد. در این میان، ترکیب زاویه ۶۰ درجه (دافع) و طول نسبی ۰/۲، در موقعیت ابتدایی سرریز (X_۱)، بهترین عملکرد را ارائه داد و راندمان را از مقدار پایه ۶۲٪ در حالت شاهد (بدون صفحه جانبی) به ۸۲٪ ارتقا داد. بررسی الگوی سرعت جریان نیز نشان داد که شکل گیری ناحیه کم سرعت در پایین دست صفحه، نقش کلیدی در هدایت مؤثر جریان به سمت سرریز ایفا می‌کند. به طور کلی، استفاده از صفحات جانبی می‌تواند به عنوان راهکاری ساده، کم هزینه و مؤثر برای بهبود عملکرد سرریزهای جانبی همگرا استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: سرریز کناری مورب، الگوی جریان، راندمان تخلیه سرریز، شبکه آبیاری و زهکشی

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. © ۱۴۰۴.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط به استناد صحیح به مقاله و با رعایت

شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است: (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



مقدمه

سازه‌های آبی از اجزای مهم مهندسی رودخانه و هیدرولیک هستند که برای هدایت و کنترل طراحی می‌شوند. سرریز جانبی یکی از سازه‌های آبی متداول و کاربردی است که در یک طرف کانال احداث می‌شود و بخشی از جریان آب را از کناره کانال اصلی به کانال جانبی که در موازات کانال اصلی قرار دارد، تخلیه می‌کند. در نتیجه، حضور این سازه موجب شکل‌گیری جریان متغیر مکانی با دبی کاهشی در کانال اصلی و با دبی افزایشی در کانال جانبی می‌شود. درک رفتار هیدرولیکی این نوع جریان‌ها، به‌ویژه در مجاورت سازه‌هایی مانند سرریز جانبی، مستلزم بهره‌گیری از ابزارهای دقیق تحلیل جریان است. با توجه به محدودیت‌های پژوهش‌های آزمایشگاهی، استفاده از مدل‌های عددی در زمینه تحلیل جریان‌های هیدرولیکی مشابه سرریز جانبی منطقی به نظر می‌رسد. نرم‌افزارهایی همچون FLOW-3D توانایی تحلیل شرایط هیدرولیکی و جریان‌های پیچیده را دارند.

پژوهشگران زیادی با به‌کارگیری مدل‌های عددی به تحلیل رفتارهای هیدرولیکی سرریزها پرداخته‌اند. هو و همکاران (۱۱) با استفاده از نرم افزار FLOW-3D به بررسی الگوهای جریان سرریزهای کلید پیانویی با تاج‌های مختلف پرداختند. نتایج نشان داد نسبت عرض سرریز تأثیر قابل توجهی بر راندمان تخلیه می‌گذارد. کلاته و امین‌وش (۱۳) با به‌کارگیری نرم افزار FLOW-3D سرریز جانبی در یک کانال شیب‌دار را شبیه‌سازی کردند. نتایج آنها نشان داد افزایش شیب بستر باعث کاهش راندمان و ضریب دبی سرریز در رژیم جریان زیربحرانی تا ۱۴/۵۴ درصد و در رژیم فوق بحرانی تا ۹/۲۶ درصد می‌شود. دانشفراز و همکاران (۵) تأثیر به‌کارگیری شیار را بر عملکرد هیدرولیکی سرریزهای جانبی دوزنقه‌ای بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که ضریب دبی در مدل بدون شیار افزایش یافته؛ درحالی‌که در مدل شیاردار کاهش می‌یابد. همچنین مشخص شد که استفاده از شیارها به‌طور قابل توجهی تنش‌های برشی در تاج سرریز را کاهش داده و در نتیجه از

آسیب‌های احتمالی به سازه جلوگیری می‌کند. خیبر و همکاران (۱۴) در یک مطالعه آزمایشگاهی عملکرد سرریز کناری لولایی با زوایای مختلف بازشدگی به سمت کانال جانبی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش زاویه بازشدگی، راندمان سرریز به میزان ۲۰ تا ۴۵ درصد افزایش می‌یابد. همچنین پژوهشگران متعددی از نرم‌افزار برای شبیه‌سازی جریان در انواع سرریزها استفاده کردند (۴، ۶، ۱۰ و ۱۷).

در بررسی‌های انجام‌شده در پژوهش‌های مرتبط با سرریز جانبی به‌طور مشخص کلیدواژه سرریز جانبی همگرا (Converging Side Weir) به همراه یادگیری ماشین (Machine Learning) و FLOW-3D در مرکز توجه پژوهش‌های اخیر قرار گرفته است. یادگیری ماشین یکی از الگوریتم‌های پرکاربرد هوش مصنوعی است و به‌طور گسترده برای پیش‌بینی ضریب دبی سرریزهای جانبی استفاده می‌شود (۲۷). همچنین، نرم‌افزار FLOW-3D به‌عنوان یک ابزار شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی شناخته می‌شود و پیش‌ازاین نمونه‌هایی از پژوهش‌های مرتبط با آن در زمینه سرریزهای جانبی بیان شد. در این میان، سرریز جانبی همگرا نوعی سرریز جانبی با ساختار هندسی مورب است که به‌دلیل عملکرد هیدرولیکی مناسب، موضوع مطالعات متعدد و نوینی قرار گرفته است. مارانزونی و همکاران (۱۶) با بررسی آزمایشگاهی سرریز جانبی همگرا در شرایط جریان زیربحرانی نشان دادند که راندمان سرریز جانبی همگرا در مقایسه با سرریز جانبی در کانال منشوری مستقیم (بدون همگرایی) افزایش می‌یابد. صفار و همکاران (۲۱) با شبیه‌سازی عددی سرریز جانبی در کانال همگرا، به بررسی پروفیل‌های سطح آب و سرعت پرداختند. آنان با مقایسه کانال همگرا و ساده نتیجه گرفتند که کاهش عرض کانال پایین‌دست باعث افزایش عمق آب و انرژی ویژه بالادست می‌شود. در نتیجه، حتی در صورت دبی کم می‌توان آب را از سرریز جانبی منحرف کرد. زارعی و همکاران (۲۸) با استفاده از مدل هوش مصنوعی، ضریب دبی سرریز جانبی همگرا را با دقت زیادی تخمین زدند. نتایج آنها نشان داد پارامتر عدد فرود در پایین‌دست مؤثرترین

قسمت دیواره کانال اصلی (مقابل سرریز) به منظور دستیابی به بیشترین راندمان تخلیه، هدف اصلی این پژوهش به شمار می‌رود.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه، شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D انجام شد. این نرم‌افزار بر پایه حل معادلات RANS و تکنیک حجم محدود عمل می‌کند. معادلات حاکم بر جریان سیال در نرم‌افزار FLOW-3D شامل معادله پیوستگی و معادلات اندازه حرکت هستند. معادله پیوستگی، بر پایه قانون بقای جرم بنا شده و با اعمال توازن جرم بر یک حجم کنترل سیال، به فرم معادله ۱ است.

$$V_f \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial p u A_x}{\partial x} + \frac{\partial p v A_y}{\partial y} + \frac{\partial p w A_z}{\partial z} + \varepsilon \frac{u A_x}{x} = 0 \quad (1)$$

که در آن پارامتر V_f نمایانگر کسر حجم سیال، ε نرخ اتلاف انرژی و پارامتر p بیانگر چگالی سیال است. فشار سیال با نماد p مشخص می‌شود که مشتق زمانی آن در معادله لحاظ شده است. مؤلفه‌های سرعت جریان در سه راستای مختصاتی با نمادهای w, v, u نمایش داده شده‌اند. ضرایب A_x, A_y و A_z مساحت کسری محیط نسبت به جریان در راستاهای x, y و z هستند (۲۰ و ۲۶). همچنین معادلات مومنتوم برای یک سیال غیرقابل تراکم به صورت معادلات ۲ تا ۵ است.

$$\frac{\partial}{\partial x}(u A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(w A_z) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left(u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x + F_x \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left(u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + G_y + F_y \quad (4)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left(u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + G_z + F_z \quad (5)$$

در این معادلات، V_f نمایانگر کسری از حجم سلول محاسباتی است که برای عبور جریان آزاد است. پارامترهای A_x, A_y و A_z

پارامتر ورودی است. مارانزونی و تومپروتنی (۱۵) در بررسی سرریز جانبی همگرا دریافتند که میزان انحراف آب به سمت سرریز در مقایسه با کانال مستطیلی افزایش می‌یابد. همچنین پژوهش‌های متعدد دیگری به بررسی هیدرولیک جریان در سرریز جانبی همگرا پرداخته‌اند (۸، ۱۹، ۲۲ و ۲۵).

از سوی دیگر افزایش راندمان تخلیه در سرریزهای جانبی، یکی از اهداف کلیدی در طراحی و بهینه‌سازی این نوع سرریزها محسوب می‌شود. استفاده از سازه‌های کمکی در مجاورت سرریز، از جمله راهکارهای مؤثر برای بهبود انتقال جریان به سمت سرریزهای جانبی به‌شمار می‌رود. در همین راستا، پژوهشگران سازه‌های مختلفی را پیشنهاد داده‌اند (۱، ۲، ۱۲، ۲۳ و ۲۴). از جمله سازه ضد گرداب مانند پژوهش الفتلاوی و الکفاجی (۳)، صفحات هدایت‌کننده در کف کانال همچون پژوهش عبدالهی و همکاران (۲) و کبیری سامانی و همکاران (۱۲) و صفحات هدایت‌کننده روی تاج سرریز مانند مطالعه شهریاری و همکاران (۲۴). مزیت اصلی این نوع سازه‌ها در آن است که راهکار پیشنهادی بدون نیاز به تغییر در ساختار فیزیکی سرریز قابل اجراست. این ویژگی باعث می‌شود نتایج این پژوهش‌ها به‌صورت مستقیم در پروژه‌های بهسازی قابل استفاده باشد، نیاز به سرمایه‌گذاری سنگین برای بازطراحی یا اصلاح سازه حذف شود و امکان افزایش راندمان در شبکه‌های آبیاری موجود با کمترین هزینه فراهم شود.

نوآوری این پژوهش، نصب یک صفحه جانبی هدایت‌کننده به‌عنوان یک سازه اضافی بر دیواره مقابل سرریز جانبی همگرا برای افزایش دبی است. این سازه با در نظر گرفتن محدودیت‌ها و اثرهای جانبی منفی سازه‌های پیشین از جمله تشکیل ورتکس‌های مخرب در سازه‌های نصب‌شده در بالای تاج سرریز یا انسداد کانال ناشی از انباشت ضایعات به سازه‌های نصب‌شده در کف طراحی و انتخاب شده است. به نظر می‌رسد موقعیت، زاویه و طول این صفحه جانبی می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر الگوی جریان و رفتار هیدرولیکی سیستم داشته باشد؛ بنابراین، شناسایی پیکربندی بهینه نصب صفحه جانبی در

به ترتیب بیانگر کسری از سطح باز در راستاهای x ، y و z هستند که جریان می‌تواند از آن عبور کند. همچنین، ترم‌های G_x ، G_y و G_z معرف مؤلفه‌های شتاب ناشی از نیروی گرانشی در سه راستای مختصات هستند. به همین ترتیب، F_x ، F_y و F_z به ترتیب ترم‌های شتاب حاصل از نیروهای لزجی (ویسکوز) را در راستاهای x ، y و z نشان می‌دهند (۲۷). داده‌های آزمایشگاهی به‌کاررفته در این پژوهش برای اعتبارسنجی خروجی‌های نرم‌افزار از نتایج آزمایش‌های مارانزونی و همکاران (۱۶) استخراج شده است. آزمایش‌های آنها در فلولی با طول ۱۱ متر، عرض ۰/۷ متر و ارتفاع ۰/۴ متر انجام شده است. آب از مخزن با هد ثابت وارد فلول شده و در نهایت به مخزن پایین‌دست در انتهای فلول منتقل می‌شود. به منظور همگرایی کانال، عرض فلول از ۰/۳۶ متر به ۰/۱۸ متر کاهش یافته است. سرریز جانبی مستطیلی به فاصله ۵/۴۵ از ابتدای فلول و ضخامت ۰/۰۵۵ متر، طول ۱/۵۱۱ متر و ارتفاع تاج ۰/۱۸۳ متر قرار گرفته شد.

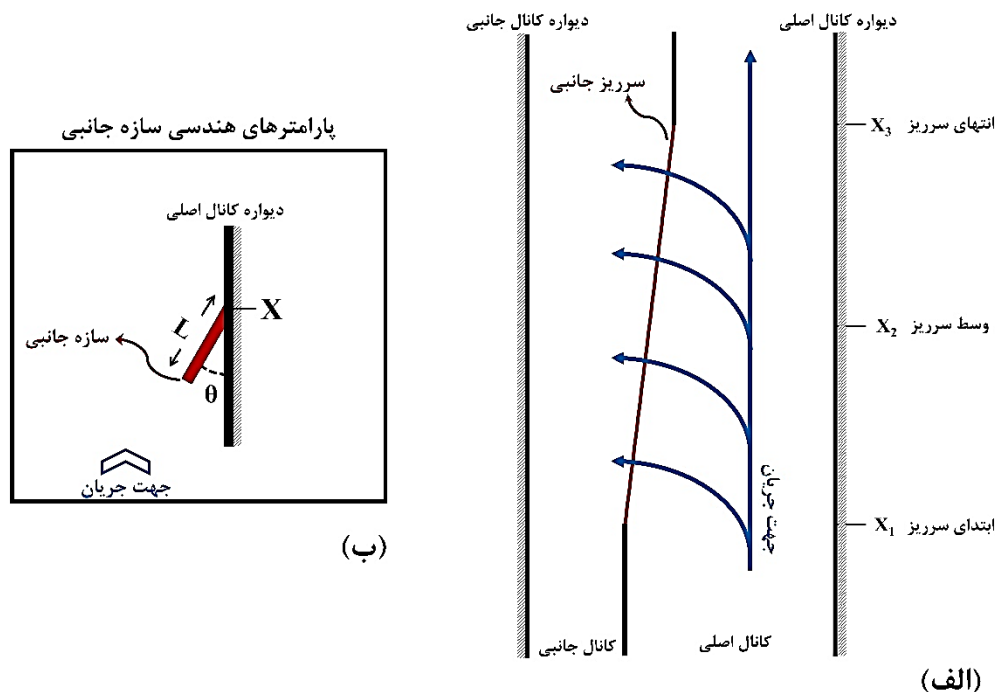
شکل ۱، نمایی شماتیک از سرریز جانبی همگرا و صفحه جانبی نصب‌شده در دیواره مقابل آن را نشان می‌دهد. در شکل ۱-الف، نمای دید از بالا از کل مجموعه شبیه‌سازی‌شده دیده می‌شود که شامل کانال اصلی، کانال جانبی و سرریز جانبی همگراست. سرریز جانبی به صورت مورب با زاویه ۷ درجه و شرایط مشابه پژوهش مارانزونی و همکاران (۱۶) قرار گرفته است. روی دیواره مقابل سرریز جانبی، صفحه جانبی تعبیه شده است. سه موقعیت برای نصب این صفحه تعریف شده است: ابتدای سرریز (X_1)، میانه سرریز (X_2) و انتهای سرریز (X_3). در شکل ۱-ب، نمای شماتیکی از صفحه جانبی و پارامترهای هندسی مؤثر آن نشان داده شده است. این صفحه جانبی با طول L و زاویه نصب θ نسبت به دیواره کانال، در موقعیت طولی X نصب می‌شود. زاویه نصب θ نشان‌دهنده زاویه بین محور طولی کانال و راستای قرارگیری صفحه جانبی است.

در این پژوهش، برای تحلیل اثر طول صفحه، سه مقدار طول نسبی برابر با ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ (نسبت طول صفحه به

عرض کانال بالادست) در نظر گرفته شده است. از آنجا که عرض کانال بالادست برابر با ۰/۳۶ متر است، این مقادیر به ترتیب معادل ۳/۶، ۷/۲ و ۱۰/۸ سانتی‌متر هستند. برای هر یک از طول‌های انتخابی، سه زاویه نصب ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه نیز اعمال شده است. موقعیت نصب صفحه نیز، همان‌طور که در شکل ۱-الف نشان داده شده، به صورت X_1 ، X_2 و X_3 تعریف شده که به ترتیب متناظر با نصب صفحه در ابتدا، وسط و انتهای سرریز هستند.

در تمامی حالت‌های شبیه‌سازی، ضخامت صفحه جانبی برابر با ۱/۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. در جدول ۱ سناریوهای مختلف پژوهش حاضر جمع‌آوری شده‌اند.

برای تمام شبیه‌سازی‌ها، دبی ورودی به سرریز ۴۵ لیتر بر ثانیه و صفحه جانبی در شرایط غیرمستغرق قرار داشت. برای انجام شبیه‌سازی عددی، فرآیند مش‌بندی به منظور تفکیک دامنه محاسباتی به سلول‌های گسسته و افزایش دقت نتایج انجام شد. در این راستا، سه مش‌بلاک مجزا برای نواحی مختلف جریان شامل بالادست، محدوده سرریز و پایین‌دست تعریف گردید (شکل ۲). ابعاد سلول‌ها در نواحی بالادست و پایین‌دست به صورت یکنواخت و برابر با ۱/۶ سانتی‌متر در نظر گرفته شد تا محاسبات با سرعت مناسب انجام شوند. در محدوده سرریز، به منظور افزایش دقت در حل جزئیات جریان، اندازه مش به ۰/۸ سانتی‌متر کاهش داده شد. در شبیه‌سازی‌هایی که صفحه جانبی نیز در هندسه مدل لحاظ شده بود، یک مش‌بلاک مستقل با ابعاد ریزتر برابر با ۰/۶ سانتی‌متر در ناحیه اطراف صفحه اختصاص داده شد تا هندسه صفحه به‌طور دقیق‌تر مدل‌سازی شود و الگوی جریان پیرامون آن با جزئیات بیشتری ثبت گردد. شرایط اولیه به صورت تعریف یک Fluid Region تا تراز تاج سرریز در کانال در نظر گرفته شد. به این ترتیب در آغاز شبیه‌سازی سطح آزاد جریان در این تراز قرار داشت. در سطح آزاد جریان نیز شرط فشار اتمسفری لحاظ شد. شرایط مرزی اعمال‌شده برای هر یک از نواحی مدل، به طور کامل در شکل ۲ نمایش داده شده‌اند. در ورودی کانال اصلی از شرط مرزی



شکل ۱. نمای دید از بالا شرایط هندسی پیاده شده در مدل: (الف) سرریز جانبی همگرا، (ب) صفحه جانبی

در معادلات یادشده، x_{ip} نشان دهنده مقادیر آزمایشگاهی اندازه گیری شده، x_{im} مقادیر حاصل از شبیه سازی عددی توسط نرم افزار FLOW-3D و N_t تعداد کل داده ها است.

نتایج و بحث

برای کالیبراسیون مدل، مقطع مشخصی در مرکز هندسی سرریز جانبی همگرا، در فاصله ۰/۷۵ متر از ابتدای تاج سرریز به عنوان مقطع مرجع انتخاب شد. مقادیر بی بعد سرعت طولی جریان (u/U) در این مقطع و در سه تراز عمقی (شامل دو تراز نزدیک به سطح آب و یک تراز نزدیک به بستر) استخراج و با داده های تجربی متناظر مقایسه شدند. در گام بعد، سه مدل آشفتگی پرکاربرد شامل RNG، $k-\epsilon$ و $k-\omega$ در نرم افزار FLOW-3D اعمال و نتایج حاصل از هر مدل با داده های آزمایشگاهی تطبیق داده شد. نتایج این تحلیل ها نشان داد که مدل RNG کمترین مقدار خطا را در بازسازی ویژگی های جریان داشته و در مقایسه با دو مدل دیگر، از دقت بیشتری برخوردار است (شکل ۳).

Volume Flow Rate با دبی ثابت (با اختصار Q) استفاده شد. در پایین دست کانال اصلی و همچنین در خروجی سرریز جانبی، شرط مرزی Outflow (با اختصار O) اعمال شد. دیواره های کانال و بدنه سرریز با شرط مرزی Wall (با اختصار W) تعریف شدند. برای سایر وجوه مدل، شرط مرزی Symmetry (با اختصار S) در نظر گرفته شد.

شبیه سازی ها به مدت ۲۵ ثانیه انجام شد و نتایج پس از عبور از زمان گذرا و رسیدن جریان به شرایط پایدار مورد تحلیل قرار گرفتند. معیارهای آماری شامل میانگین خطای مطلق درصدی (MAPE) و خطای نسبی ($E\%$) برای سنجش دقت شبیه سازی استفاده شد. معادلات ۶ و ۷ به منظور محاسبه این معیارها به کار گرفته شدند (۷).

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{x_{ip} - x_{im}}{x_{ip}} \right|}{N_t} \times 100 \quad (6)$$

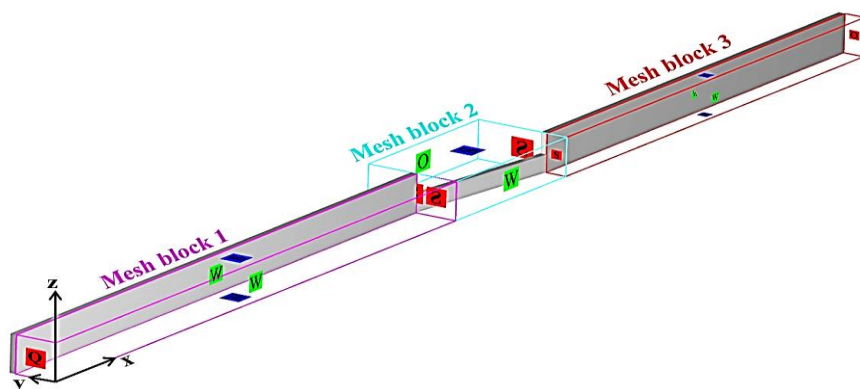
$$E\% = \frac{\sum_{i=1}^n |x_{ip} - x_{im}|}{\sum_{i=1}^n x_{ip}} \times 100 \quad (7)$$

جدول ۱. سناریوهای مورد بررسی قرار گرفته در این پژوهش

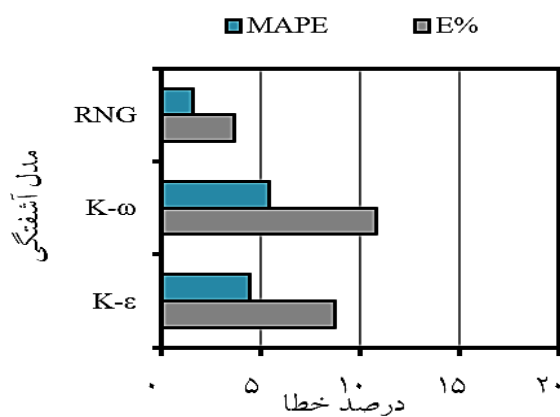
شماره شبیه‌سازی	مشخصات صفحه جانبی		
	موقعیت	زاویه‌ی نصب	طول نسبی
شاهد	-	-	-
۱	X ₁	۶۰	۰/۱
۲			۰/۲
۳			۰/۳
۴		۹۰	۰/۱
۵			۰/۲
۶			۰/۳
۷		۱۲۰	۰/۱
۸			۰/۲
۹			۰/۳
۱۰	X ₂	۶۰	۰/۱
۱۱			۰/۲
۱۲			۰/۳
۱۳		۹۰	۰/۱
۱۴			۰/۲
۱۵			۰/۳
۱۶		۱۲۰	۰/۱
۱۷			۰/۲
۱۸			۰/۳

جدول ۱. سناریوهای مورد بررسی قرار گرفته در این پژوهش (ادامه جدول ۱)

۱۹		۰/۱
۲۰	۶۰	۰/۲
۲۱		۰/۳
۲۲		۰/۱
۲۳	X_3	۰/۲
۲۴		۰/۳
۲۵		۰/۱
۲۶	۱۲۰	۰/۲
۲۷		۰/۳



شکل ۲. نمایی از بلوک‌های مش و شرایط مرزی پژوهش حاضر



شکل ۳. مقایسه عملکرد مدل‌های آشفتگی مختلف بر اساس شاخص خطا (E%) و (MAPE)

شبیه‌سازی شماره ۲ بهترین راندمان تخلیه را دارد؛ یعنی در حالتی که صفحه در زاویه ۶۰ و طول نسبی ۰/۲ قرار دارد. در این حالت راندمان سرریز به ۸۲ درصد می‌رسد.

الگوی سرعت جریان برای این شبیه‌سازی در شکل ۶ نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که نحوه توزیع سرعت در امتداد کانال اصلی به شدت تحت تأثیر طول نسبی و زاویه نصب صفحه جانبی قرار دارد.

با توجه به شکل ۶ زمانی که صفحه جانبی نصب می‌شود، یک ناحیه کم‌سرعت در پایین دست سازه شکل می‌گیرد. این ناحیه شبیه به یک دیوار کاذب عمل می‌کند و جریان را به سمت سرریز هدایت می‌کند. این ناحیه با رنگ آبی در شکل ۶ به طور مشخص دیده می‌شود. در حالت شاهد این محدوده دیده نمی‌شود (شکل ۴). می‌توان این محدوده را کاملاً تحت تأثیر صفحه جانبی دانست.

برای طول‌های بیشتر صفحه، زاویه قائم (۹۰ درجه) شرایط پایدارتری برای انحراف جریان ایجاد می‌کند؛ درحالی‌که در طول‌های کمتر، زاویه دافع (۶۰ درجه) به سبب تقویت جدایش جریان و گسترش ناحیه کم‌سرعت، در افزایش راندمان نقش مؤثرتری دارد. طول نسبی ۰/۱ در این موقعیت در مقایسه با سایر طول‌های صفحات تأثیر کمتری بر راندمان سرریز جانبی دارد. این امر به دلیل عدم توسعه کامل ناحیه جدایش جریان در پایین دست صفحه کوتاه و محدود بودن سطح مؤثر برای انحراف جریان است. در شبیه‌سازی‌های شماره ۱، ۳، ۴، ۵، ۷، ۸ و ۹، به وضوح دیده می‌شود که ناحیه کم‌سرعت (ناحیه آبی‌رنگ در شکل ۶) به صورت کامل و پیوسته شکل نگرفته است. این موضوع باعث شده تأثیر این آرایش‌ها بر افزایش راندمان تخلیه سرریز جانبی نسبتاً محدود باشد. در مقابل، در شبیه‌سازی‌های شماره ۲ و ۶، ناحیه کم‌سرعت تا انتهای محدوده سرریز جانبی امتداد یافته که این امر منجر به هدایت بهتر جریان به سمت سرریز و در نتیجه افزایش قابل توجه راندمان تخلیه شده است.

به منظور ارزیابی دقت و اطمینان‌پذیری نتایج عددی، مطالعه‌ای به منظور بررسی استقلال مش انجام شد. در این راستا، سه شبکه با تعداد سلول‌های مختلف شامل ۱/۵، ۱ و ۱/۵ میلیون ارزیابی شدند. نتایج شبیه‌سازی با داده‌های آزمایشگاهی مارانزونی و همکاران (۱۱) مقایسه شد که در جدول ۲ ارائه شده‌اند. مقادیر خطای به دست آمده برای مش‌های یادشده به ترتیب برابر با ۸/۲ درصد، ۳/۷ درصد و ۲/۵۶ درصد بوده است. بر اساس تحلیل نتایج، شبکه با یک میلیون سلول به عنوان مش بهینه انتخاب شد. این انتخاب به این منظور صورت گرفت که این مش با کاهش محسوس خطا نسبت به شبکه درشت‌تر و اختلاف ناچیز با شبکه ریزتر، تعادلی مناسب میان دقت عددی و هزینه‌ی محاسباتی فراهم کرده و از کارایی مناسبی برخوردار است.

در این پژوهش ابتدا یک آزمایش شاهد با دبی ۴۵ لیتر بر ثانیه بدون حضور صفحه جانبی انجام شد. با استفاده از معادله ۸، راندمان هر شبیه‌سازی محاسبه شد (۱۸).

$$\eta = \frac{Q_0}{Q_i} \quad (18)$$

در این معادله، Q_i به عنوان دبی ورودی (۴۵ لیتر بر ثانیه) و Q_0 به عنوان دبی انحرافی از سرریز جانبی معرفی می‌شوند. برای حالت شاهد با توجه به اینکه دبی انحرافی معادل $Q_0 = 28 \text{ lit/s}$ است، بنابراین راندمان سرریز جانبی همگرا در این حالت برابر ۶۲٪ محاسبه می‌شود. الگوی سرعت جریان برای این شبیه‌سازی در شکل ۴ نمایش داده شده است.

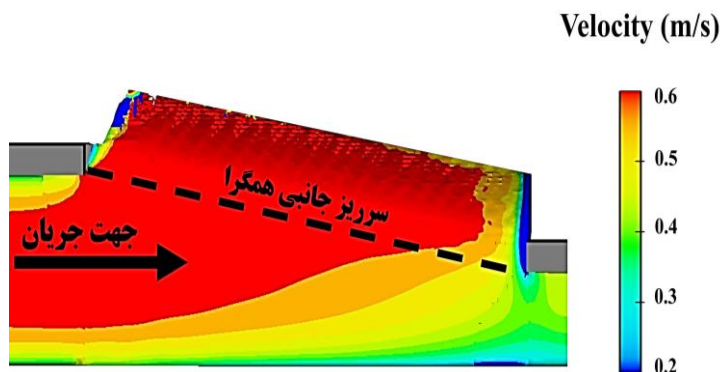
از آنجا که کارگذاری صفحه جانبی در موقعیت‌های مختلف رفتارهای هیدرولیکی متفاوتی از خود نشان داد، در ادامه شرایط عملکرد هر موقعیت به صورت مجزا و تفکیک شده برای مقاطع X_1 ، X_2 و X_3 ، در زوایا و طول‌های مختلف بررسی شد.

نتایج نصب صفحه جانبی در موقعیت X_1

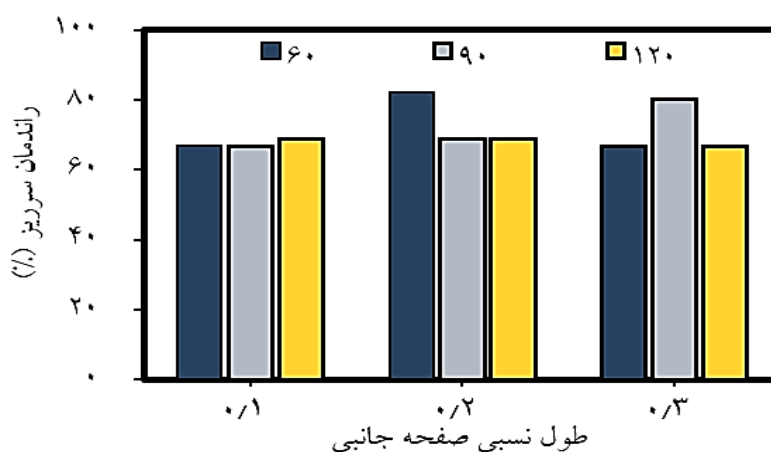
در شکل ۵ راندمان سرریز برای موقعیت X_1 در زوایای ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ و طول‌های نسبی ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد در شرایط کارگذاری صفحه در این موقعیت، در همه حالات دبی انحرافی افزایش یافته است؛ اما

جدول ۲. نتایج آزمون استقلال مش

درصد خطا	تعداد مش (میلیون)
۸/۲	۰/۵
۳/۷	۱
۲/۵۶	۱/۵



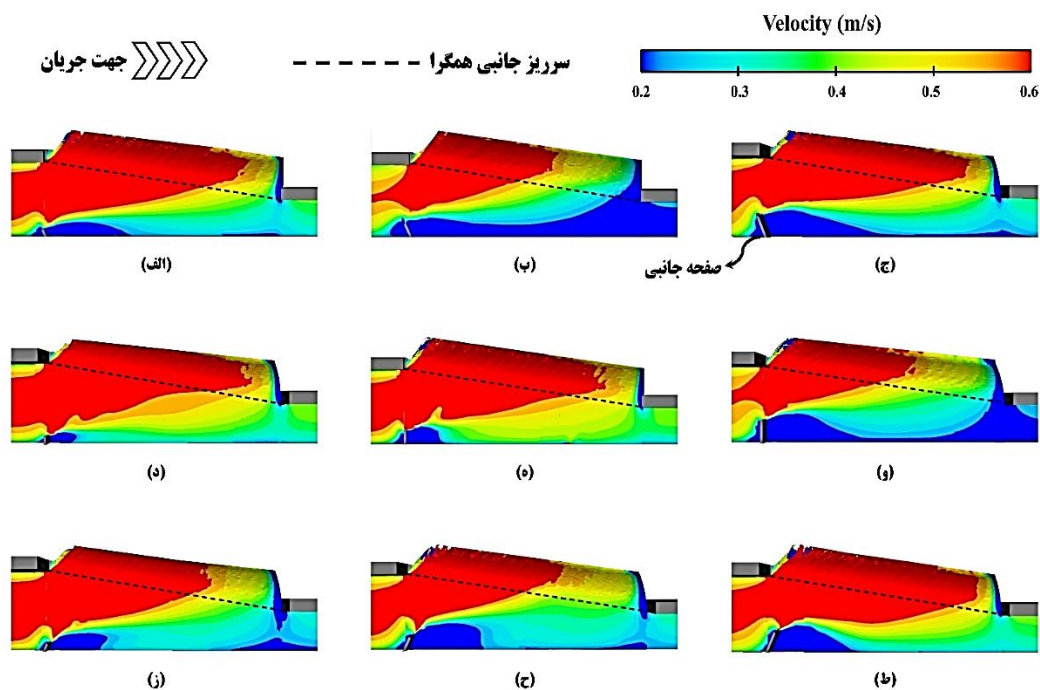
شکل ۴. الگوی سرعت جریان در حالت شاهد (دید از بالا)

شکل ۵. تغییرات راندمان سوریز در حضور صفحه جانبی در موقعیت X_1

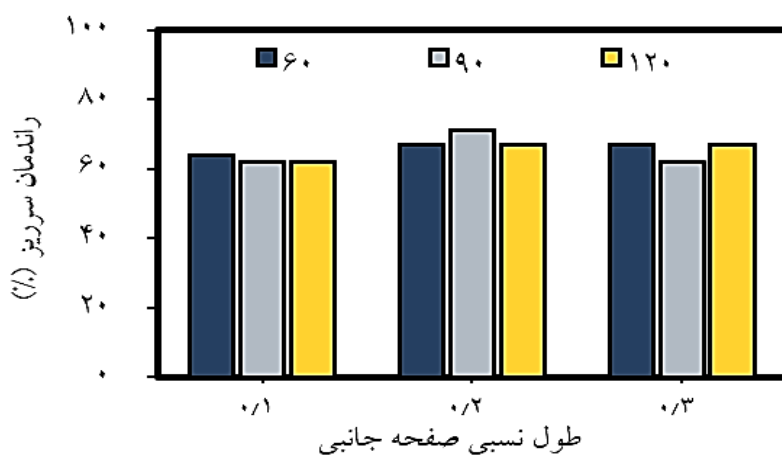
نتایج نصب صفحه جانبی در موقعیت X_2

در شکل ۷ بررسی راندمان‌های موقعیت X_2 نشان می‌دهد که عملکرد صفحات جانبی در این موقعیت نسبت به موقعیت X_1 به مراتب یکنواخت‌تر و کم‌تأثیرتر بوده است. درحالی‌که در X_1 تغییرات هندسه منجر به تفاوت‌های قابل توجهی در راندمان (از حدود ۶۷٪ تا ۸۲٪) شد، در موقعیت X_2 بیشتر حالت‌ها راندمانی بین ۶۲٪ تا ۷۱٪ داشته‌اند. تنها شبیه‌سازی شماره ۱۴، ترکیب طول نسبی ۰/۲ با زاویه ۹۰ درجه بوده که به راندمان

۷۱٪ رسیده است؛ اما سایر حالت‌ها عملکردی نزدیک به حالت شاهد (۶۲٪) داشته‌اند یا صرفاً با اختلافی جزئی بهبود یافته‌اند. به طور خاص، برای طول نسبی ۰/۳، تغییر زاویه عملاً تأثیری بر راندمان نداشته و مقدار آن در هر سه زاویه ثابت باقی مانده است که نشان‌دهنده کاهش حساسیت عملکرد سازه به هندسه در این موقعیت است. این روند کلی حاکی از آن است که محل نصب صفحه هدایت‌کننده در موقعیت X_2 در ناحیه‌ای قرار گرفته که الگوی غالب جریان امکان تشکیل ناحیه مؤثر جدایش



شکل ۶. الگوی سرعت جریان در حضور صفحه جانبی، (الف) تا (ط): شبیه‌سازی شماره ۱ تا ۹ (دید از بالا)



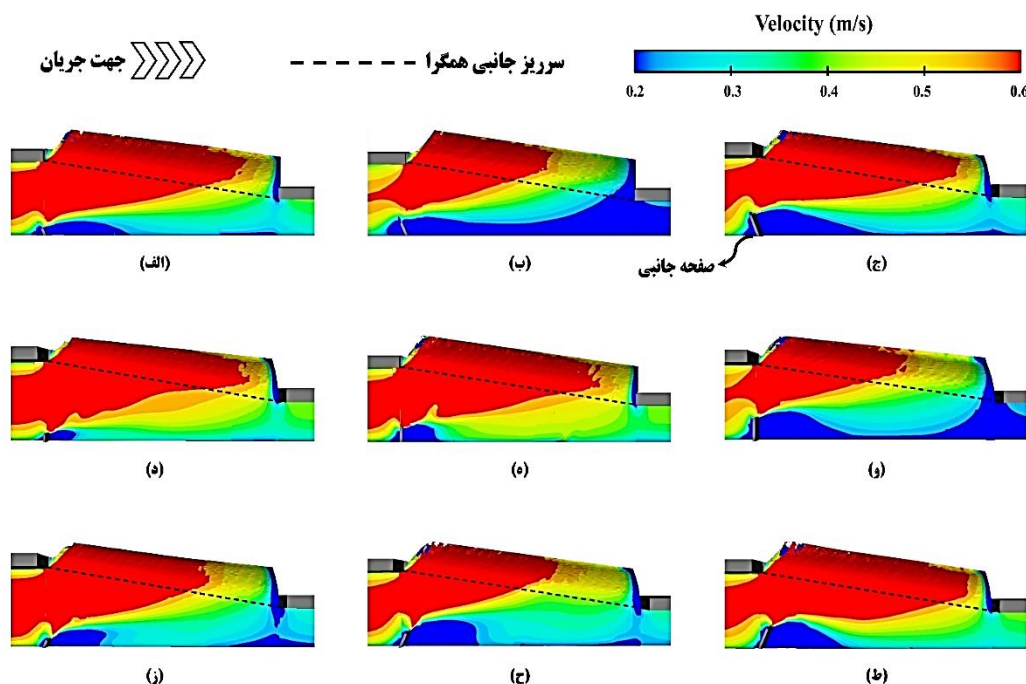
شکل ۷. تغییرات راندمان سرریز در حضور صفحه جانبی در موقعیت X_2

در این طول نسبی تأثیر قابل توجهی بر راندمان سرریز دیده نمی‌شود.

به طور کلی می‌توان گفت در این موقعیت به دلیل خروج بخشی از جریان بالادست صفحه از سرریز، سرعت جریان کم شده و در نتیجه اندرکنش صفحه و جریان کمتر می‌شود. به همین علت زاویه ۹۰ درجه که سطح مؤثر بیشتر با جریان دارد، تأثیر بیشتری بر الگوی سرعت داشته است (شکل ۸).

یا گردابه‌های انحرافی را ندارد یا دست‌کم این ساختارها نتوانسته‌اند به خوبی درگیر جریان اصلی شوند.

در شکل ۸، الگوی سرعت در موقعیت X_2 برای ترکیب‌های مختلف طول و زاویه نصب صفحات جانبی را نشان می‌دهد. در طول‌های نسبی ۰/۱، ناحیه کم‌سرعت قابل توجهی در پایین‌دست صفحه دیده نمی‌شود یا اگر وجود دارد، به صورت محدود و ناپایدار است. به همین علت هم در این موقعیت و



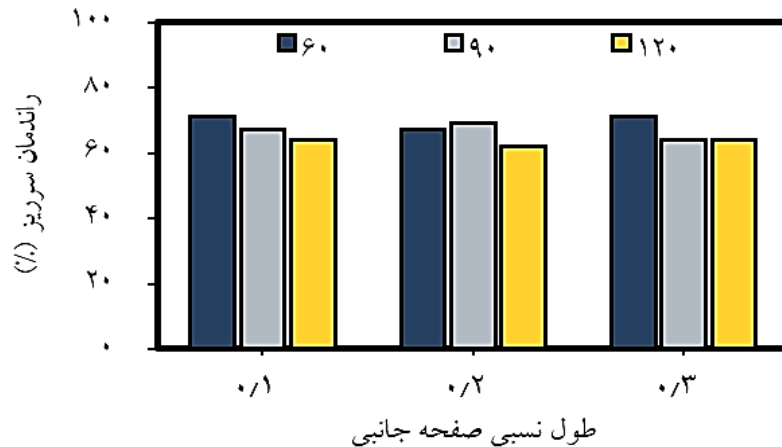
شکل ۸. الگوی سرعت جریان در حضور صفحه جانبی، (الف) تا (ط): شبیه سازی شماره ۱۰ تا ۱۸ (دید از بالا)

شکل ۱۰، الگوی سرعت جریان در شرایط نصب صفحه جانبی در موقعیت X_3 را نشان می دهد. در موقعیت X_3 ، صفحه جانبی در پایین دست سرریز و در باریک ترین بخش کانال جانبی همگرا نصب شده است. برخلاف X_1 و X_2 که ناحیه کم سرعت ایجاد شده پایین دست صفحه به طور مستقیم جریان را به سمت سرریز هدایت می کرد، در X_3 ناحیه یاد شده اگرچه شکل می گیرد، اما اثر اصلی آن بر مسیر جریان در پایین دست کانال است.

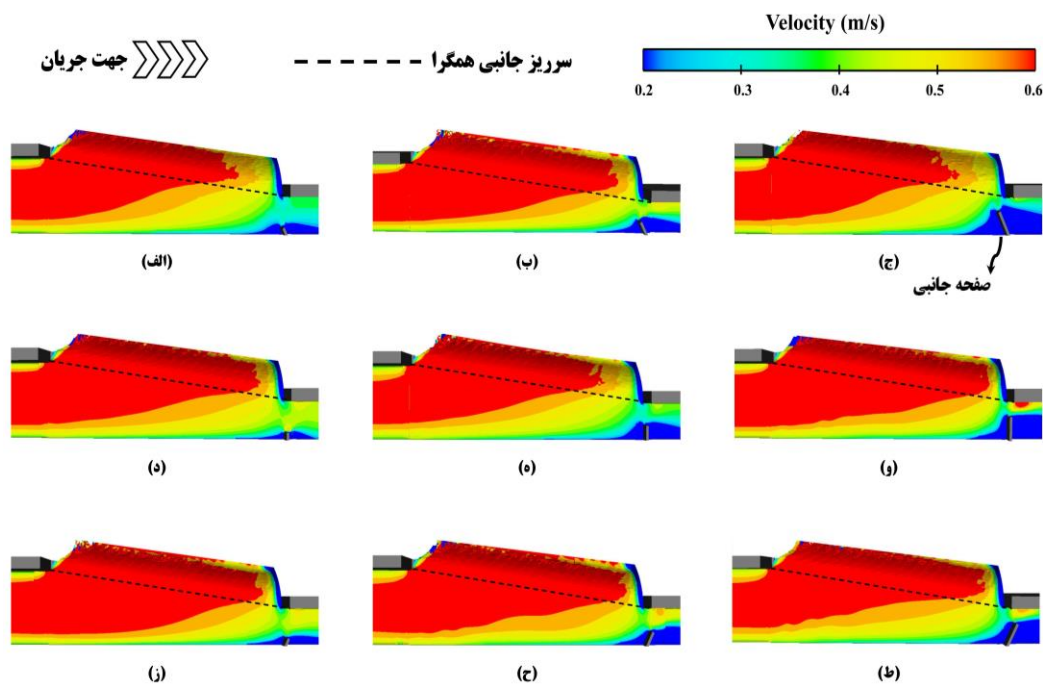
در این موقعیت سازه با وجود ایجاد تغییرات موضعی در الگوی جریان، تأثیر قابل توجهی در بهبود راندمان کل سیستم نداشته است. در مجموع بررسی سه موقعیت نصب صفحه جانبی در کانال جانبی همگرا نشان می دهد که اگرچه طول و زاویه نصب سازه نقش مهمی در بهبود الگوی جریان به سمت سرریز دارد، اما مکان نصب آن تعیین کننده نهایی میزان اثربخشی آن است. نتایج نشان می دهد که در یک طول نسبی ثابت، تغییر زاویه صفحات هدایت در سه موقعیت X_1 ، X_2 و X_3 روند ثابتی را دنبال نمی کند. در X_1 ، زاویه های کوچک تر (60°) به طور معمول باعث بهبود هدایت جریان به سمت تاج

نتایج نصب صفحه جانبی در موقعیت X_3

در شرایط نصب صفحه در موقعیت X_3 هم، مشابه موقعیت X_2 ، عملکرد صفحات جانبی از نظر افزایش راندمان سرریز نسبت به موقعیت X_1 ضعیف تر است (شکل ۹). در این موقعیت، بیشینه راندمان به مقدار ۷۱٪ در دو حالت مختلف دیده شده است: یکی مربوط به طول نسبی ۰/۳ و زاویه ۶۰ درجه، و دیگری در طول نسبی ۰/۱ با همان زاویه. در حالی که در هر دو موقعیت قبلی طول نسبی ۰/۲ بهترین عملکرد را داشت، اما در این موقعیت تأثیر قابل توجهی بر افزایش راندمان سرریز نداشت. از طرفی زاویه مایل ۶۰ درجه در موقعیت X_3 نقش مؤثرتری نسبت به سایر زوایا داشته است. در مقابل، زاویه ۱۲۰ درجه در هر سه طول نسبی (۰/۱، ۰/۲، ۰/۳) کمترین راندمان را ایجاد کرده و در برخی موارد برابر با حالت شاهد باقی مانده است که نشان دهنده عملکرد بسیار ضعیف این زاویه نصب در موقعیت مد نظر است. همچنین در ترکیب زاویه ۹۰ درجه، صرف نظر از طول نسبی، تفاوت در راندمان سرریز بسیار ناچیز بوده و بیشتر بین ۶۴٪ تا ۶۹٪ باقی مانده است.



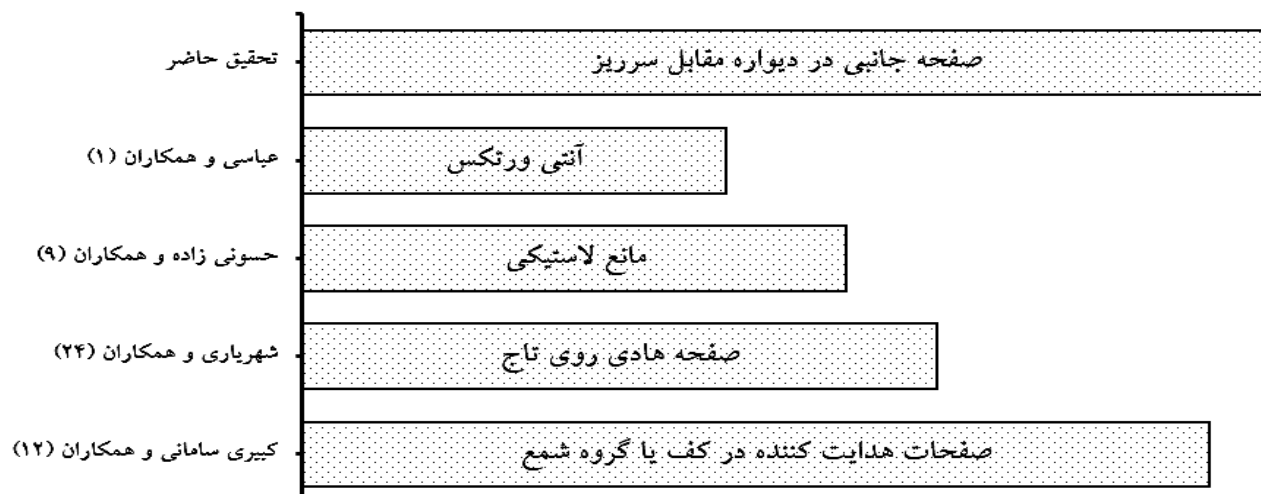
شکل ۹. تغییرات راندمان سرریز در حضور صفحه جانبی در موقعیت X_3



شکل ۱۰. الگوی سرعت جریان در حضور صفحه جانبی، (الف) تا (ط): شبیه‌سازی شماره ۱۹ تا ۲۷ (دید از بالا)

نوسانات محدودی دارد. این امر ناشی از آن است که الگوی جدایش جریان و تشکیل ناحیه کم‌سرعت در مجاورت صفحه، پس از یک حد مشخص به حالت پایدار می‌رسد و افزایش یا کاهش جزئی زاویه دیگر تغییر چشمگیری ایجاد نمی‌کند. با این حال، در طول نسبی ۰/۲ به دلیل وجود تعادل بین سطح مؤثر صفحه برای انحراف جریان و محدود نبودن شدید مقطع جریان، زاویه قرارگیری نقش مهم‌تری پیدا می‌کند. در این

سرریز شده‌اند؛ درحالی‌که در X_2 اثر زاویه تعدیل شده و تغییرات کمتری دیده می‌شود. در X_3 نیز به دلیل تأثیر همگرایی و شکل‌گیری نواحی بازچرخش، افزایش زاویه می‌تواند باعث کاهش راندمان شود. مقایسه بهترین سناریوهای نصب در هر موقعیت بیانگر آن است که راندمان سرریز با استفاده از صفحه جانبی به طور میانگین حدود ۲۱٪ افزایش یافته است. در بیشتر سناریوها، تغییر راندمان سرریز در حضور صفحه جانبی



شکل ۱۱. مقایسه نتایج استفاده از سازه جهت افزایش دبی انحرافی سرریز جانبی در سایر پژوهش‌ها (۱، ۹، ۱۲ و ۲۴)

در هندسه کانال است. موانع لاستیکی و مهارگرهای گرداب ساده‌تر نصب می‌شوند؛ ولی کارایی محدودتری دارند. پره‌های هادی روی تاج نیز کارآمد هستند؛ اما مداخله مستقیم در سازه سرریز را می‌طلبند. در مقایسه، روش پیشنهادی این پژوهش با افزایش قابل قبول راندمان، هم‌زمان از مزیت طراحی ساده و قابلیت اجرا در سرریزهای همگرا برخوردار است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر هندسه و محل نصب صفحات جانبی بر عملکرد سرریز جانبی همگرا با استفاده از شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفت. به‌طور کلی نتایج نشان داد:

- صفحات هدایت‌کننده چنانچه با شرایط مناسب نصب شوند، می‌توانند منجر به بهبود تخلیه سرریزهای جانبی شوند. مقایسه بهترین سناریوهای نصب در هر موقعیت نشان می‌دهد راندمان سرریز به‌طور میانگین با نصب صفحه جانبی ۲۱٪ ارتقا می‌یابد.
- مشخص شد که الزاماً طول بیشتر یا زاویه تندتر به معنای عملکرد بهتر نیست و رفتار جریان در اطراف صفحه باید بر اساس شرایط موضعی تحلیل شود؛ اما زوایای جاذب (۱۲۰ درجه) در تمام موقعیت‌ها عملکرد مطلوبی نداشتند.

شرایط، زاویه ۶۰ درجه موجب جدایش ملایم و هدایت مناسب جریان می‌شود؛ درحالی‌که زوایای بزرگ‌تر (۹۰ و ۱۲۰) به علت افزایش مقاومت و ایجاد گردابه، کارایی کمتری دارند؛ بنابراین دیده می‌شود که طول نسبی ۰/۲ در ترکیب با زاویه بهینه، شرایط هیدرولیکی متعادلی ایجاد کرده و باعث افزایش محسوس راندمان شده است. در میان تمامی حالت‌های بررسی‌شده، تنها یک سناریو توانست به‌طور مشخص عملکردی متمایز از سایر ترکیب‌ها ارائه دهد: موقعیت X_1 با زاویه ۶۰ درجه و طول نسبی ۰/۲ (شبیه‌سازی شماره ۲).

مقایسه با سایر پژوهشگران

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که نصب صفحه هدایت‌کننده در سرریز جانبی همگرا می‌تواند دبی انحرافی را تا ۳۲٪ افزایش دهد. این مقدار با بیشترین بهبودهایی که در پژوهش‌های پیشین گزارش شده، هم‌تراز است (شکل ۱۱). گفتنی است که بخش عمده پژوهش‌های یادشده روی سرریزهای جانبی مستطیلی یا چندوجهی انجام شده‌اند؛ درحالی‌که پژوهش حاضر به‌طور مشخص بر سرریز جانبی همگرا متمرکز بوده است.

از دیدگاه اجرایی، هر یک از این روش‌ها مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند. به‌کارگیری صفحات یا گروه شمع راندمان زیادی ایجاد کرده؛ اما مستلزم تغییرات بیشتر

در نهایت، انجام مطالعات آزمایشگاهی و گسترش پژوهش در زمینه هندسه‌های متنوع صفحات هدایت‌کننده همچون صفحات مثلی می‌تواند به درک عمیق‌تر و بهبود کارایی این سازه‌ها در افزایش دبی انحرافی از سرریزهای جانبی منجر شود.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه (GN: SCU.WH1402.31370) در انجام این پژوهش قدردانی می‌شود.

• در حضور صفحه جانبی یک محدوده کم‌سرعت در پایین‌دست صفحه جانبی شکل می‌گیرد که تأثیر مثبتی بر الگوی جریان در محدوده سرریز می‌گذارد. به طور کلی این کاهش سرعت اصلی‌ترین اثر صفحه جانبی بر هیدرولیک جریان در محدوده سرریز است. کاهش سرعت جریان در محدوده سرریز به وسیله صفحه جانبی، باعث می‌شود زمان بیشتری برای تخلیه جریان وجود داشته باشد.

• مؤثرترین پیکربندی دیده‌شده، نصب صفحه با زاویه ۶۰ درجه (دافع) و طول نسبی ۰/۲ در موقعیت X_1 بود. در این حالت، سازه در ناحیه‌ای با انرژی زیاد جریان نصب شده و توانست با ایجاد یک جداشدگی پایدار، مسیر جریان را به‌خوبی به سمت سرریز هدایت کند.

منابع مورد استفاده

- Abbasi, S., S. Fatemi, A. Ghaderi and S. Di Francesco. 2021. The Effect of Geometric Parameters of the Antivortex on a Triangular Labyrinth Side Weir. *Water* 13(1): 14.
- Abdollahi, A., A. Kabiri-Samani, K. Asghari, H. Atoof and S. Bagheri. 2017. Numerical modeling of flow field around the labyrinth side-weirs in the presence of guide vanes. *ISH Journal of Hydraulic Engineering* 23(1): 71-79.
- Alfatlawi, T. J. and R. D. Mohammed Alkafaji. 2023. Effect of anti-vortex structures installed on stepped labyrinth side weirs on discharge capacity. *Flow Measurement and Instrumentation* 89: 102307.
- Azimi, H., S. Shabanlou and S. Kardar. 2018. Turbulent Flow in the Vicinity of Side Weirs in Subcritical Conditions. *Mathematical Models and Computer Simulations* 10(6): 784-797.
- Daneshfaraz R., E. Aminvash, R. Omidvar, V. Süme, HO. Marangoz and E. Yılmaz. 2025. Investigating the Effect of Grooves on the Hydraulic Parameters of a Sharp-crested Trapezoidal Side Weir. *Journal of Applied Fluid Mechanics* 18(10):2465-75.
- Daneshfaraz, R., M. Majedi Asl and T. OmidPour Alavian. 2025. Investigating the Hydraulic Efficiency of the Labyrinth Weir Using the Flow3D Numerical Method. *Journal of Water and Soil Science* 29(1): 111-129 (in Farsi).
- Daryae, M., S. M. Sharifi, A. Shahriari, S. Kashefipour and M. Zayeri. 2025. Numerical Modeling of the Effect of Orifices in Stepped Spillways on Flow Energy Dissipation Using the FLOW-3D Model. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 56(3): 589-606 (in Farsi).
- Ghorbannia, D. and A. Eghbalzadeh. 2018. Numerical study of the effect of length change on the flow pattern around a side weir in a converging channel. *Acta Mechanica* 229(10): 4101-4111.
- Hasounizadeh, M., S. M. Sajadi and M. Shafai Bajestan. 2023. Investigating the effect of the height and thickness of the flexible rubber roughness in the main channel on the drainage efficiency of the side weir of the rectangular sharp edge. *Irrigation Sciences and Engineering* (in Farsi).
- Heydari, M. and S. Shabanlou. 2020. A Proposed Novel Hybrid Intelligent Model Based on ANFIS Integrated with Firefly Algorithm for Forecasting Discharge Coefficient of Side Weirs on Converging Canals. *Irrigation and Drainage* 69(4): 865-879.
- Hu, H., Z. Qian, W. Yang, D. Hou and L. Du. 2018. Numerical study of characteristics and discharge capacity of piano key weirs. *Flow Measurement and Instrumentation* 62: 27-32.
- Kabiri-Samani, A., H. Esmaili and M. Heidarpour. 2011. Improving Performance of Side Weirs Using Groups of Vane Plates or Piles. *Journal of Water and Wastewater* 22(1): 101-113 (in Farsi).
- Kalateh, F. and E. Aminvash. 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 (in Farsi).

14. Kheybar, H., S. M. Sajjadi, J. Ahadiyan and M. Ghomeshi. 2025. Investigating the Discharge Coefficient and Efficiency of the Pivot Side Weirs with Threshold. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment* 3(2): 72-88 (in Farsi).
15. Maranzoni, A. and M. Tomirotti. 2021. 3D CFD analysis of the performance of oblique and composite side weirs in converging channels. *Journal of Hydraulic Research* 59(4): 586-604.
16. Maranzoni, A., M. Pilotti and M. Tomirotti. 2017. Experimental and Numerical Analysis of Side Weir Flows in a Converging Channel. *Journal of Hydraulic Engineering* 143(7): 04017009.
17. Namaee, M. R. and R. Shadpoorian. 2016. Numerical Modeling of Flow Over Two Side Weirs. *Arabian Journal for Science and Engineering* 41(4): 1495-1510.
18. Neisi, M., M. Sajadi, M. Shafai Bejestan and J. Ahadiyan. 2024. Experimental Study of Flow over the Triangular Side Weir with Inclined Crest in Subcritical Flow. *Journal of Water and Soil Science* 28(3): 117-129 (in Farsi).
19. Parsi, E., K. Allahdadi, A. Bahrebar and R. Farhadi. 2021. Effect of downstream contraction on side weirs discharge. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 15(2): 455-466 (in Farsi).
20. Rasaei, M. and A. Salemian. 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 (in Farsi).
21. Saffar, S., A. Safaei, F. Aghaee Daneshvar and M. Solimani Babarsad. 2023. Flow-3D Numerical Modeling of Converged Side Weir. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering* 48(1): 431-440.
22. Saffar, S., M. Solimani Babarsad, M. Mahmoodian Shooshtari, M. H. Poormohammadi and R. Riazi. 2022. Experimental study of flow converging section side weir hydraulics. *Journal of Marine Science and Technology* 21(3): 23-32 (in Farsi).
23. Samiee, S., M. Heidarpour and S. Okhravi. 2015. Effect of guide vanes on discharge coefficient of rectangular sharp-crested side weirs. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources* 19(73): 263-272.
24. Shahriari, A., M. Daryaei, S. Kashefipour and M. Zayeri. 2024. Numerical Simulation of the Effect of Single Guide Vane Installation on the Hydraulic Performance of Side Weirs in Converging Channels. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering* 49: 5195-5205.
25. Shahriari, A., M. Daryaei, S. Kashefipour and M. Zayeri. 2025. Investigation of Specific Energy Stability in Converging Side Weirs with Guiding Structures. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research* 26(Spring): 18-1 (in Farsi).
26. Taghavi, M. and H. Ghodousi. 2016. A comparison on discharge coefficients of side and normal weirs with suspended flow load using Flow3D. *Indian Journal of Science and Technology* 9: 1-11.
27. Wan W, G. Shen, S. Li, A. Parsaie, Y. Wang and Y. Zhou. 2023. Analysis of discharge characteristics of a symmetrical stepped labyrinth side weir based on global sensitivity. *Hydroinformatics* 26(1):337-49.
28. Zarei, S., F. Yosefvand and S. Shabanlou. 2020. Discharge coefficient of side weirs on converging channels using extreme learning machine modeling method. *Measurement* 152: 107321.