



Hydraulic Analysis of Pivot Side Weirs with Sill

Hooman Kheybar¹ | Seyed Mohsen Sajjadi² | Javad Ahadiyan³ | Mehdi Ghomeshi⁴

1. Department of Hydraulic structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran. E-mail: hoomankheibar@yahoo.com
2. Corresponding Author, Department of Hydraulic structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran. E-mail: m.sajjadi@scu.ac.ir
3. Department of Hydraulic structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran. E-mail: j.ahadiyan@scu.ac.ir
4. Department of Hydraulic structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran. E-mail: ghomeshi@scu.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Sep. 15, 2024

Revised: Nov. 19, 2024

Accepted: Nov. 23, 2024

Published online: March. 2025

Keywords:

*Weir sill, efficiency,
Side Weirs,
Pivot Weirs,
Discharge Coefficient*

ABSTRACT

The side weir is a widely used structure for the diversion of flow in channels and waterways. In this study, a new type of side weir, referred to as the pivot side weir (a type of inclined sharp-crested weir) with a sill, was introduced to investigate its discharge coefficient and efficiency. The experiments were conducted in the hydraulic laboratory of the Faculty of Water Engineering at Shahid Chamran University of Ahvaz. The performance of the models PSW (pivot side weir with a sill and open overflow sides), PSW-C (pivot side weir with closed overflow sides), and PSW-HC (pivot side weir with an open upstream side and closed downstream end) was evaluated against the control model R (rectangular sharp-crested side weir) in relation to the upstream Froude number ranging from 0.3 to 0.54, under a constant ratio of upstream depth to weir height and at opening angles of 30, 45, and 60 degrees towards the main channel. The results indicated that the models introduced in this study were more efficient than the control model, exhibiting higher discharge coefficients and efficiencies. Calculations showed that in the primary models, the discharge coefficient increased by up to 80% and efficiency by up to 70% compared to the control model. Furthermore, when comparing the primary models with each other, it was observed that the average discharge coefficient and efficiency of the PSW-HC model increased by approximately 7% and 5%, respectively, compared to the PSW model, and by 22% and 8% compared to the PSW-C model.

Cite this article: Kheybar, H., Sajjadi, S. M., Ahadiyan, J., Ghomeshi, M., (2025) Hydraulic Analysis of Pivot Side Weirs with Sill, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (1),229-246. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.382426.669790>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.382426.669790>





EXTENDED ABSTRACT

Objective

This study investigates the discharge coefficient and efficiency of a pivot side weir model with a flow sill, examining various opening angles relative to the main channel. The weir model developed in this study consists of a fixed right-angle sill and an inclined hinge section that allows for angle adjustments.

Methods

The models were installed and tested in the hydraulic laboratory at the Faculty of Water and Environmental Sciences, Shahid Chamran University, Ahvaz. A total of 60 experiments were conducted to achieve the objectives of this study. Based on dimensional analysis using the Buckingham method, the key variables identified are: flow Froude number (Fr), opening angle of the pivot weir in relation to the main channel (α), upstream flow depth relative to the height of the weir (y_u/P), and the ratio of the length of the overflow crown to the length of the catchment section (L_w/b). Tests were conducted across a total flow range of 25 to 45 L/s (Froude numbers from 0.3 to 0.54) with opening angles of 30, 45, and 60 degrees, while maintaining a constant upstream depth ($Y_u = 16.5$ cm) and a consistent ratio of upstream depth to overflow height (Y_u/P) for each model.

Results

Following the tests, we evaluated the applicability of Di Marchi's hypothesis for calculating the overflow flow coefficient. The specific energy difference percentage values obtained indicate that comparisons of discharge coefficients based on Di Marchi's hypothesis are acceptable for deriving study results, albeit with caution. Calculations revealed that the discharge coefficient and efficiency of various models increased by an average of 80% and 70%, respectively, compared to the control model. Additionally, results indicate that within the investigated range of Froude numbers, the flow rate coefficient increased up to Froude numbers of 0.4 to 0.45; beyond this range, as the upstream Froude number increased, the flow coefficient decreased for all models. It was also observed that for all upstream Froude numbers, increasing the opening angle enhanced efficiency compared to the control sample conditions. Notably, under the highest opening angle, model efficiency—particularly in the Froude number range of 0.3 to 0.4—was significantly higher than in other scenarios. Conversely, for Froude numbers of 0.4 and above, efficiency values decreased across all models.

Conclusions

The findings indicate that for all three models across various opening angles (α), increasing the angle of the model facing the main channel—thereby extending the length of the side overflow crown—leads to improvements in both discharge coefficient and efficiency, positively impacting the performance of the pivot side weir. Furthermore, closing off the sides of the pivot side weir model at angle α negatively affects its performance, resulting in decreased efficiency compared to when the sides are open. However, if only the entrance of the model is open while the end is closed, weir efficiency increases and surpasses that of other configurations.

Author Contributions

Conceptualization, S.M.S.; methodology, J.A.; software, H.K. and S.M.S; validation, H.K., S.M.S, J.A and M.G.; formal analysis, H.K.; investigation, H.K., S.M.S, J.A and M.G.; resources, S.M.S.; data curation, H.K.; writing—original draft preparation, H.K.; writing—review and editing, H.K., S.M.S, J.A and M.G.; visualization, H.K., S.M.S, J.A and M.G.; supervision, S.M.S.; project administration, S.M.S.; funding acquisition, S.M.S.

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Data is available on reasonable request from the authors.

Acknowledgments

The authors would like to thank Shahid Chamran University of Ahvaz for providing all the needed facilities.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interests.

بررسی هیدرولیک سرریزهای جانبی لولایی با آستانه

هومن خیبر^۱ | سیدمحسن سجادی^۲ | جواد احدیان^۳ | مهدی قمشی^۴^۱. گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران. رایانامه: hoomankheibar@yahoo.com^۲. نویسنده مسئول، گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران. رایانامه:m.sadjadi@scu.ac.ir^۳. گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران. رایانامه: j.ahadiyan@scu.ac.ir^۴. گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران. رایانامه: ghomeshi@scu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

سرریز جانبی یک سازه پرکاربرد است که از آن برای روگذری جریان در مسیل‌ها و کانال‌ها استفاده می‌گردد. در این تحقیق با معرفی نوع جدیدی از سرریزهای جانبی تحت عنوان سرریز جانبی لولایی (گونه‌ای از سرریزهای لبه تیز مایل) با آستانه، به بررسی ضریب دبی و راندمان آن پرداخته شد. آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز صورت گرفت. عملکرد مدل‌های (PSW سرریز جانبی لولایی با آستانه جریان و کناره‌های سرریز باز)، (PSW-C مدل سرریز جانبی لولایی با آستانه و کناره‌های سرریز بسته) و (PSW-HC مدل سرریز جانبی لولایی با کناره ابتدایی باز و انتهای بسته) نسبت به مدل شاهد (R سرریز جانبی لبه تیز قائم مستطیلی) در مقابل عدد فرود انتهای بالادست جریان در محدوده ۰/۳ تا ۰/۵۴ به ازای یک نسبت عمق بالادست به ارتفاع سرریز ثابت و تحت زوایای بازشدگی ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه رو به کانال اصلی بررسی گردید. نتایج نشان داد که مدل‌های معرفی شده در این تحقیق نسبت به مدل شاهد بهینه‌تر بوده و ضریب دبی و راندمان بیشتری خواهند داشت. محاسبات نشان داد که در مدل‌های اصلی، ضریب دبی تا ۸۰ و راندمان تا ۷۰ درصد نسبت به مدل شاهد افزایش خواهد یافت. همچنین در مقایسه مدل‌های اصلی با یکدیگر مشاهده گردید که مقدار ضریب دبی و راندمان مدل PSW-HC به طور میانگین در حدود ۷ و ۵ درصد نسبت به مدل PSW و ۲۲ و ۸ درصد نسبت به مدل PSW-C افزایش یافته است.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۶/۲۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۸/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۹/۳

تاریخ انتشار: فروردین ۱۴۰۴

واژه‌های کلیدی:

آستانه سرریز،

راندمان،

سرریزهای جانبی،

سرریزهای لولایی،

ضریب دبی.

استناد: خیبر، هومن، سجادی، سیدمحسن، احدیان، جواد، قمشی، مهدی، (۱۴۰۳) بررسی هیدرولیک سرریزهای جانبی لولایی با آستانه، مجله تحقیقات آب و خاک ایران،

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.382426.669790>. ۲۴۶-۲۲۹. (۱) ۵۶

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.382426.669790>

مقدمه

سرریز در یک تعریف عمومی به هر مانعی گفته می‌شود که بر سر راه عبور جریان قرار گرفته و باعث می‌شود تا آب در پشت آن بالا آمده و بر سرعت آن افزوده گردد. سرریزها خود بر اساس شکل و کاربری انواع مختلف داشته و در مهندسی عمران از جمله سدسازی، شبکه های آبیاری و زهکشی و کانال‌های انتقال آب و فاضلاب مورد استفاده گسترده قرار می‌گیرند.

از جمله مدل‌های کارآمدی که طی سالیان اخیر مورد توجه قرار گرفته اند، می‌توان به سرریزهای لولایی اشاره نمود. سرریز لولایی، مدلی نسبتاً جدید از سرریزها می‌باشد که تاکنون عمدتاً به عنوان سازه سرریز در کانال اصلی مورد آزمایش و استفاده قرار گرفته است. طبق تعریف، سرریز لولایی سازه ای است که می‌توان آنرا در کف یک کانال یا مجرا لولا نموده و زاویه آن نسبت به کف نیز قابلیت تغییر و تنظیم را دارا می‌باشد. به کمک اهرم یا کابل‌هایی در دو طرف سرریز تعبیه می‌شوند، می‌توان زاویه سرریز را تغییر داده و آنرا بالا یا پایین آورد. سرریزهای لولایی از گروه سرریزهای لبه تیز مایل بوده و در بهره‌برداری‌ها می‌توان آن را در زوایای مختلف نسبت به کف کانال تنظیم نمود. از جمله مزایای این سازه، امکان استفاده از سازه هم به عنوان آبگیر و هم به صورت آب بند، امکان تخلیه رسوبات، نیاز به انرژی کم و مکانیزم ساده تنظیم سازه، طراحی روگذر و سهولت اتوماسیون می‌باشد.

گاهی اوقات در مقاطعی از رودخانه‌ها، کانال‌های آبیاری و زهکشی و یا کانال‌های انتقال فاضلاب ممکن است میزان جریان عبوری از مجرا بیشتر از ظرفیت دبی آن باشد. در چنین مواردی قرارگیری سرریز به صورت عمود بر جریان در مسیر اصلی انتقال آب (حالت استاندارد) امکان‌پذیر نبوده و جهت انحراف جریان و کنترل و حفاظت کانال یا رودخانه باید استفاده از سرریزهای جانبی مورد توجه قرار گیرد.

سرریز جانبی یک سازه پرکاربرد است که از آن برای روگذری جریان در مسیل‌ها و کانال‌ها استفاده می‌گردد. در این گونه سرریزها، محور کانال جانبی شامل یک سرریز مستقیم است که محور آن موازی تاج سرریز می‌باشد. در حالی که محور کانال پایین دست سرریز استاندارد به صورت عمود بر تاج سرریز تعبیه می‌گردد. از این سرریز به ویژه در سدهای خاکی یا محل‌هایی در کناره سدها که موقعیت مناسب‌تری را با حوضچه آرامش برقرار می‌سازد و به طور کلی هر جا که کاربرد سرریز مستقیم عملی نمی‌باشد، استفاده می‌شود.

با توجه به اینکه که همواره نیاز به استقرار یک سازه سرریز مناسب با راندمان بالا جهت هدایت و کنترل جریان احساس می‌شود، در این پژوهش با استفاده از یک سرریز لولایی و استقرار آن به موازات دیواره فلوم آزمایشگاهی، به بررسی ضریب دبی جریان و راندمان سرریز در حالتی که سرریز لولایی به عنوان یک سرریز جانبی مورد استفاده قرار گیرد، پرداخته خواهد شد.

به عنوان یک نوآوری، مدل سرریز جانبی لولایی ساخته شده در این پژوهش از یک بخش آستانه با زاویه قائم ثابت و یک بخش لولایی مایل با قابلیت تغییر زاویه رو به کانال جانبی تشکیل شده است و تحت عنوان سرریز جانبی لولایی با آستانه معرفی می‌گردد. با این تفاسیر، مهم‌ترین اهداف پژوهش حاضر را می‌توان در این موارد خلاصه نمود: الف) بررسی ضریب دبی سرریز جانبی لولایی با آستانه. ب) بررسی تاثیر زاویه بازشدگی سرریز رو به کانال اصلی بر عملکرد سرریز. ج) بررسی راندمان سرریز جانبی لولایی با آستانه.

پیشینه پژوهش

پیشینه نظری

جریان گذرنده از روی سرریزهای جانبی از نوع جریان متغیر مکانی^۱ با کاهش دبی است. مشخصه اصلی چنین جریانی این است که مقدار دبی آن در طول کانال اصلی کاهش یافته و با کاهش دبی، شدت جریان نیز کم می‌شود. در نتیجه با توجه به نوع جریان در بالادست سرریز جانبی که می‌تواند از نوع زیربحرانی یا فوق بحرانی باشد، نیم رخ سطح آب روی تاج سرریز و مقطع کنترل تغییر می‌کند. محققین و پژوهشگران با توجه به مطالعات گسترده ای که برای بررسی تغییرات انرژی مخصوص در طول جریان منشعب شده از سرریز صورت گرفته، عموماً مقدار انرژی را در طول مسیر ثابت در نظر می‌گیرند.

DeMarchi (1934) در مطالعات خود، فرض را بر ثابت بودن انرژی جریان در طول سرریز جانبی در کانال اصلی گرفت. دیمارچی

نشان داد که ضریب دبی سرریز جانبی (C_m) می‌تواند تابعی از متغیرهای مختلف باشد که با استفاده از آنها می‌توان میزان دبی خروجی

1 Weir

2 Side Weir

3 Spatially varied flow

جریان را تخمین زد. افزایش طول عبور جریان در سرریزها اعم از مستقیم یا جانبی، باعث افزایش دبی عبوری از سرریز به ازای یک عمق مشخص آب روی سرریز می‌شود. از سوی دیگر در سرریزهای خطی، فرضیه اصلی، مساوی بودن انرژی ویژه جریان در طول سرریز و انتهای بالادست و پایین دست آن است.

شرط کاربرد فرضیات دی مارچی به منظور تعیین ضریب دبی مدل سرریز جانبی لولایی، اثبات حد برابری مقدار انرژی ویژه در انتهای بالادست و پایین دست مدل سرریز جانبی می‌باشد. بدین منظور در تحقیق حاضر با استفاده از داده‌های اندازه گیری شده در آزمایشگاه، مقادیر انرژی ویژه در انتهای بالادست (E_1) و پایین دست (E_2) مدل سرریز در در انتهای بالادست و پایین دست آن (X_1, X_6) و مجاورت تاج سرریز (Z_4) برای تمامی مدل‌ها محاسبه شده و مورد بررسی واقع گردید. به طور کلی انرژی ویژه جریان به کمک رابطه ۱ محاسبه می‌گردد:

$$E = y + \frac{q^2}{2gy^2} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این رابطه q دبی در واحد عرض، y عمق جریان، V سرعت جریان و g شتاب جاذبه می‌باشد. در ادامه درصد اختلاف انرژی ویژه جریان بین دو نقطه انتهای بالادست و پایین دست مدل سرریز به کمک رابطه ۲ به دست آمده و سپس، میانگین این مقادیر محاسبه و به عنوان معیار ارزیابی فرضیه دی مارچی در نظر گرفته خواهد شد:

$$\frac{\Delta E}{E_1} (\%) = \frac{|E_2 - E_1|}{E_1} \times 100 \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این پژوهش، انرژی ویژه جریان در طول و انتهای بالادست و پایین دست سرریز برابر فرض شده است. فرضیه‌های دیگر شامل تغییر ضریب دبی جریان با تغییر مشخصات هندسی و هیدرولیکی و نیز کاهش ضریب دبی با افزایش عدد فرود در انتهای بالادست سرریز است. رابطه پیوستگی در جریان متغیر مکانی به صورت ۳ می‌باشد. طبق این معادله از تفاضل دبی جریان در بالادست و پایین دست سرریز جانبی، دبی عبوری از خود سرریز جانبی محاسبه می‌شود:

$$\frac{Q_0 - Q_i}{L} = -\frac{dQ}{dx} = q_s \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این معادله Q_0 دبی جریان در انتهای پایین دست سرریز جانبی، Q_i دبی جریان در انتهای بالادست سرریز جانبی و q_s دبی عبوری از سرریز جانبی می‌باشند. اگر رابطه عمومی سرریزها، برای سرریز جانبی مفروض گردد، با در نظر گرفتن یک عمق به عنوان عمق مبنا (Y_{index})، دبی عبوری از سرریز جانبی به کمک معادله ۴ محاسبه خواهد شد:

$$q_s = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_M (Y_{index} - P)^{1.5} \quad \text{رابطه (۴)}$$

در این رابطه P ارتفاع سرریز، g شتاب گرانشی و C_M ضریب دبی سرریز خواهند بود. در یک سرریز جانبی، ضریب دبی تابعی از مشخصات هیدرولیکی جریان در بالادست و پایین دست سرریز و نیز مقطع هندسی سرریز می‌باشد. مطابق با نظریات دی مارچی، با فرض ثابت بودن انرژی مخصوص جریان و مستقل بودن ضریب دبی در طول سرریز، اگر از معادله فوق انتگرال گرفته شود، در نهایت معادله ۵ برای محاسبه ضریب دبی (C_M) سرریز جانبی حاصل می‌گردد:

$$C_M = \frac{3B}{2L} [\Delta\phi] \quad \text{رابطه (۵)}$$

در این معادله ϕ تابع متغیر جریان دی مارچی، B عرض کانال اصلی، L طول سرریز، Y عمق جریان و E انرژی ویژه می‌باشند. تابع ϕ با توجه به مشخص بودن پارامترهای هیدرولیکی جریان در ابتدا و انتهای سرریز، از معادله ۶ قابل محاسبه خواهد بود:

$$\phi(Y, E, P) = \frac{2E - 3P}{E - P} \sqrt{\frac{E - Y}{Y - P}} - 3 \sin^{-1} \sqrt{\frac{E - Y}{E - P}} \quad \text{رابطه (۶)}$$

در مقایسه عملکرد سرریزهای جانبی، بررسی پارامتر راندمان سرریز نیز نقشی مهم و اساسی دارد. راندمان یک سرریز جانبی مطابق با معادله ۷ عبارت است از نسبت دبی عبوری از سرریز جانبی به دبی ورودی به کانال اصلی:

$$\varepsilon = \frac{Q_s}{Q_i} \quad \text{رابطه (۷)}$$

پیشینه تجربی

سرریزهای جانبی به سبب کاربرد زیادی که دارند، مورد مطالعات گسترده پژوهشگران و محققین بسیاری قرار گرفته اند. هدف اصلی اکثر

این پژوهش‌ها، برآورد ضریب دبی و آنالیز آن تحت شرایط گوناگون بوده است.

Schoder and Turner (1929) به بررسی مطالعات انجام شده توسط بازن دانشمند فرانسوی در حد فاصل سالهای ۱۸۸۶-۱۸۸۷ بر روی سرریزهای لولایی پرداختند. بازن آزمایشات خود را برای دو مدل سرریز لولایی با فشردگی و بدون فشردگی جانبی در کانالی به مشخصات ۲۱۳ متر طول و ۲ متر عرض انجام داد. اما نتایج وی با نتایج سایر محققان تفاوت چشمگیر داشت. اسکادر و ترنر با تحلیل نتایج بازن به این نتیجه رسیدند که دلیل مغایرت نتایج وی، مشخص نبودن لبه تیز بودن یا نبودن سرریزهای مورد استفاده بوده است. در نهایت، خطای برآورد دبی در حالت جریان آزاد با استفاده از داده‌های ایشان ۳/۴ درصد بوده است.

Kindsvater and Carter (1957) رابطه ای را جهت محاسبه دبی برای سرریزهای لبه تیز در شرایط جریان آزاد ارائه دادند که در آن C_e ضریب دبی، b_c عرض سرریز برحسب متر و h_1 ارتفاع آب روی سرریز (بر حسب متر) خواهد بود. آنها نشان دادند که ضریب دبی با نسبت‌های $\frac{h_1}{p}$ و $\frac{b_c}{B_1}$ رابطه خطی دارد.

Hulsing (1967) رابطه دبی-اشل سرریزهای مستطیلی لبه تیز هم عرض کانال را با نسبت شیب‌های ۳:۳، ۳:۳ و ۱:۳ به سمت پایین دست تعیین نموده و با سرریز مستطیلی لبه تیز قائم مقایسه نمود.

Brater and King (1976) یک رابطه تصحیح شده برای ضریب دبی با توجه به معادله مرسوم سرریزهای قائم ارائه نمودند.

Wahlin and Replogle (1994) در یک پروژه متعلق به سازمان USBR، آزمایشاتی را بر روی یک کانال مستطیلی با ۱۵ متر طول، ۱/۲۲ متر عرض با دو سرریز لولایی به عرض‌های ۱/۱۴ و ۱/۲ متر و طول تیغه‌های ۰/۶۱ و ۰/۴۶ انجام دادند. آنها دریافتند که معادله استاندارد دبی که برای سرریزهای معمولی مستطیلی به دست می‌آید، برای سرریزهای لولایی نیز قابل استفاده و اجرا می‌باشد. بنابراین، یک ضریب تصحیح برای زاویه سرریز لولایی در نظر گرفته شد.

E.M.I.N. Emiroglu et al., (2010) بر روی سرریزهای جانبی زیگزاگی مطالعاتی صورت دادند. در مجموع ۲۹۰۰ آزمایش در شرایط جریان زیر بحرانی انجام گرفت و در آنها پروفیل سطح آب روی سرریز و نیز سرعت جریان در طول و در عمق مدل مورد بررسی واقع شد. نتایج نشان داد که ضریب دبی سرریز زیگزاگی در حدود ۱،۵ تا ۴ برابر بیش از سرریزهای جانبی خطی خواهد بود و معادلاتی نیز برای محاسبه ضریب دبی پیشنهاد گردید.

حسین زاده و همکاران (۱۳۸۹) بر اساس مطالعات آزمایشگاهی و کاربرد معادله مرسوم سرریزهای قائم، روابطی برای محاسبه ضریب دبی سرریز لولایی بدون فشردگی برای جریان آزاد و مستغرق به دست آوردند. پروژه ایشان در فلولم به عرض ۰/۳ متر، ارتفاع ۰/۴۵ متر، طول ۱ متر و دبی‌های بسیار کم (۵/۵-۱/۴ لیتر در ثانیه) انجام گرفت. شیخ رضازاده نیکو و همکاران (۲۰۱۳) اثر تبدیلهای ناگهانی و تدریجی بر روی ضریب دبی سرریزهای لولایی در شرایط جریان آزاد را مورد بررسی قرار دادند. با توجه به نتایج، مشخص گردید که به طور کلی در حالت وجود تبدیل اعم از ناگهانی یا تدریجی، مقدار ضریب دبی در حدود ۱۰-۱۵ درصد بیشتر از مقدار آن در حالت عدم وجود تبدیل می‌باشد. زیرا تبدیل‌ها مانند یک دیوار هدایتی برای جریان عمل نموده و از فشردگی جریان در محل ورودی به سرریز می‌کاهند و این امر به افزایش ضریب دبی منجر می‌شود. در مقایسه دو حالت تبدیل ناگهانی و تدریجی نیز مشاهده شد که ضریب دبی سرریز تحت تبدیل تدریجی به مراتب بیشتر از حالت تبدیل ناگهانی است. در نهایت نیز روابط دبی-اشل برای هر سری از آزمایش‌ها ارائه شد.

Kaya et al., (2011) یک مدل جدید از سرریز جانبی مثلثی با بستر شیبدار را مورد مطالعه قرار داده و خصوصیات دبی آن را بررسی نمودند. در مجموع ۱۵۹ آزمایش تجربی با استفاده از طرح‌های هندسی مختلف و متغیرهای هیدرولیکی انجام شد. داده‌های تجربی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و نتایج برای ایجاد یک معادله غیر خطی برای ضریب دبی سرریز جانبی معرفی شده مورد ارزیابی قرار گرفت. تجزیه و تحلیل خطا برای معادله دقت نسبتاً قابل قبولی را نشان داده و نتایج در محدوده خطای ۷٪ از مقادیر اندازه گیری شده قرار گرفتند. نتایج نهایی بهبود قابل توجهی در راندمان سرریز تا ۷۸٪ و ۳۹٪ را برای ضریب تخلیه طرح پیشنهادی در مقایسه با سرریزهای جانبی مستطیلی معمولی و سرریزهای جانبی مثلثی بستر متعامد نشان می‌دهد.

Abbaspour et al., (2014) به شبیه سازی عددی جریان روی سرریز لبه پهن مستطیلی با وجوه شیب‌دار بالادست و پایین دست با مدل فلونتت پرداختند. در این تحقیق جریان روی دو نوع سرریز لبه پهن ARB و BRA با وجوه‌های شیب‌دار پایین دست و بالادست با استفاده از مدل k-ε استاندارد و بکارگیری نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی FLUENT به صورت دو بعدی شبیه سازی شد و سطح آزاد جریان با روش جزء حجم سیال VOF تعیین گردید. نتایج مدل عددی برای پارامترهای هیدرولیکی ضریب دبی، سرعت جریان و توسعه لایه مرزی با نتایج آزمایشگاهی و روابط موجود مقایسه شد. نتایج بدست آمده نشان داد که مدل آشفتگی k-ε استاندارد و روش جزء

حجم سیال VOF برای پیش‌بینی پروفیل سطح آب روی سرریزهای لبه‌پهن، برآورد ضریب دبی (C_d) و پروفیل‌های سرعت در فواصل مختلف روی تاج مناسب می‌باشد. حداکثر خطای نسبی برای بار هیدرولیکی و ضریب دبی به ترتیب برابر $4/06$ و $6/54$ درصد است که قابل قبول می‌باشد.

Arvanghi et al., (2014) به مطالعه آزمایشگاهی و عددی جریان عبوری از سرریزهای لولایی در شرایط جریان آزاد پرداختند. معادله دبی-اشل سرریز لولایی را برای هر یک از زوایای صفر، 15° و 30° و 45° درجه در یک مدل آزمایشگاهی کوچک که شامل کانال مستطیلی به عرض $0/25$ متر و عمق $0/7$ متر و ارتفاع سرریز $0/2$ متر بوده، تعیین کردند.

Michelazzo (2015) با استفاده از مدل‌های فیزیکی رویکردی جدید در حل معادله دیمارچی برای سرریزهای کناری با ارتفاع صفر در مجاری روباز ارائه داد. برای حل این مدل شرایط جریان را زیر بحرانی و بستر را ثابت در نظر گرفته شد. روش حل ایشان بدون استفاده از روش‌های عددی امکان برآورد دبی خروجی از سرریز را با توجه به شرایط هیدرولیکی بالادست و پایین دست بوجود می‌آورد. روش آنها با توجه به نسبت اعداد فرود در بالادست و پایین دست سرریز نسبت‌های عمق دبی و طول تعریف شده است و قابلیت نمایش در گراف‌هایی را دارند. نکته قابل تامل در این روش این است که نسبت طولی تعریف شده تابعی از C_d انتخاب شده است و لذا مدل آنها بستگی به C_d انتخاب شده دارد. خطای رابطه آنها در نسبت طول که بستگی به C_d انتخاب شده دارد، حدود 20 درصد گزارش شده است. خطای نسبت دبی و نسبت عمق جریان نیز 10 درصد برآورد شده اند.

شیخ رضازاده نیکو و همکاران (۱۳۹۴) در تحقیق دیگری به بررسی اثر فشردگی‌های جانبی مختلف بر روی ضریب دبی سرریزهای لولایی در شرایط جریان مستغرق پرداختند. با توجه به نتایج آزمایشگاهی ملاحظه شد که با کاهش عرض سرریز لولایی نسبت به عرض کانال، به دلیل تأثیر فشردگی جریان و گردابه‌های تشکیل شده در نزدیکی کناره بالادست سرریز، گرادیان سرعت تبدیل به گرادیان فشار گردیده که سبب افزایش بارآبی شد و پدیده برگشت آب رخ نمود. با ایجاد فشردگی جانبی، عرض مؤثر مجرای عبور جریان، کاهش یافته و ضریب دبی کاهش می‌یابد. با افزایش نسبت عرض سرریز به عرض کانال و لذا کاهش اثرات فشردگی جریان، ضریب دبی برای یک شاخص استغراق معین، افزایش می‌یابد. در نهایت نیز یک معادله به منظور محاسبه دبی در سرریز لولایی تحت شرایط جریان مستغرق به دست آورده شد.

شیخ رضازاده نیکو و همکاران (۱۳۹۵) در ادامه تحقیقات پیشین خود، رابطه دبی-اشل را برای سرریزهای لولایی با فشردگی‌های $0/4$ ، $0/6$ و $0/8$ ارائه نمودند.

وایقان و همکاران (۱۳۹۵) با ساخت مدل فیزیکی سرریز نعل‌اسبی در ابعاد آزمایشگاهی به بررسی مشخصات هیدرولیکی سرریزهای نعل‌اسبی مدرن از جمله ضریب دبی، پروفیل جریان و دبی عبوری از سرریز بیرونی و داخلی پرداخت
Roushangar et al., (2016) به پیش‌بینی ضریب دبی سرریزهای جانبی دوزنقه‌ای و مستطیلی با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین پرداختند. در این مطالعه، پتانسیل دو روش مختلف یادگیری ماشین، یعنی ماشین‌های برداری پشتیبان همراه با الگوریتم ژنتیک (SVM-GA) و برنامه‌ریزی بیانگر ژنی (GEP) برای پیش‌بینی ضریب تخلیه سرریزهای جانبی با تاج تیز دوزنقه‌ای و مستطیلی مورد ارزیابی قرار گرفت. برای ارزیابی عملکرد مدل از ضریب همبستگی (R)، میانگین خطای نرمال سازی (MNE) و شاخص نش ساتکلیف (NS) استفاده گردید. نتایج نشان داد که مدل SVM-GA با $R = 0.97$ ، $NS = 0.94$ و $MNE = 13\%$ برای سرریز جانبی دوزنقه ای و $R = 0.97$ ، $NS = 0.91$ و $MNE = 18\%$ برای سرریز جانبی مستطیلی دقیق‌تر از GEP خواهد بود.

Azimfar et al., (2017) با انجام آزمایش‌هایی، به ارائه روابطی جهت محاسبه ضریب دبی سرریز لولایی هم عرض کانال در شرایط آزاد و مستغرق پرداختند. ایشان برای برآورد دبی سرریز و ضریب دبی از یک رویکرد نظری مبتنی بر معادلات برنولی و مونتوم استفاده نمودند. معادلات ضریب دبی با استفاده از سایر داده‌های تجربی و شرایط صحرائی اعتبار سنجی شد و نتایج با معادلات پیشنهادی واهلین و ریوگله (۱۹۹۴) مقایسه گردید. بررسی‌ها نشان داد که معادلات پیشنهادی در این تحقیق ساده‌تر از روش پیشنهادی واهلین و ریوگله (۱۹۹۴) برای تعیین ضریب تخلیه سرریز لولایی بوده و دقت بالاتری نیز دارند.

Maranzoni et al., (2017) به ارائه تحلیل‌هایی روی سرریز جانبی در یک کانال مستطیلی همگرا به دو صورت عددی و آزمایشگاهی (در شرایط جریان ماندگار و زیر بحرانی) پرداختند. نتایج نشان داد که در یک کانال مستطیلی همگرا دو پارامتر عدد فرود پایین دست جریان و ارتفاع بدون بعد سرریز، بیشترین اثرگذاری را بر دبی عبوری از آن سرریز خواهند داشت. علاوه بر این با توجه به نتایج مشخص گردید که مقدار این دبی از دبی عبوری از یک سرریز معمولی در یک کانال با سطح مقطع ثابت بیشتر خواهد بود.

Bijankhan and Ferro (2018) به بررسی آزمایشگاهی و عددی تأثیر زاویه شیب بر عملکرد سرریز لولایی پرداختند. آزمایش‌ها با استفاده از زوایای شیب ۳۰ درجه تا ۹۰ درجه انجام گرفت. نتایج نشان داد که تغییرات زاویه شیب سرریز به طور جزئی بر رابطه دبی تأثیر می‌گذارد. در ادامه نیز روابطی برای محاسبه دبی ارائه شد.

نورانی و همکاران (۱۴۰۰) به بررسی رابطه دبی - اشل و ضریب دبی جریان در سرریزهای لبه تیز پلان مثلی پرداختند. هدف از این تحقیق ارائه یک رابطه برای تعیین ضریب دبی جریان این نوع از سرریزها می‌باشد که در نهایت یک رابطه رگرسیونی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی بر اساس پارامترهای هندسی h/P و α ارائه شد. نتایج حاصل از این رابطه با نتایج مدل عددی انسیس فلونت در تخمین مقدار دبی جریان عبوری از این سرریزها مورد مقایسه قرار گرفت که حاکی از دقت بالای رابطه مذکور بود. شبیه‌سازی به صورت سه بعدی انجام گرفت. علاوه بر این به عملکرد مدل‌های رگرسیونی MR-Linear و MR-nonlinear در کاربرد رابطه دبی - اشل سرریزهای لبه تیز پلان مثلی پرداخته شد و مشاهده گردید که این روابط تطابق بسیار مشابهی با نتایج مشاهداتی را دارا می‌باشند. همچنین نتایج نشان داد که در سرریزهای پلان مثلی بسته به زاویه قرارگیری، میزان ضریب دبی جریان ۱ الی ۸ درصد نسبت به سرریزهای هم‌عرض کانال افزایش می‌یابد. محدوده ضریب دبی جریان با استفاده از رابطه پیشنهادی ۵۹/۰ تا ۸۱/۰ بدست آمد.

Parvaneh et al., (2022) به بررسی شرایط هیدرولیکی دبی در یک مدل جدید سرریز جانبی مثلی با بستر شیب‌دار در جریان زیر بحرانی پرداختند. هدف اصلی مطالعه آنها، بررسی دقیق‌تر عملکرد هیدرولیکی مدل پیشنهادی سرریزهای جانبی (بستر شیب‌دار) با ایجاد یک معادله جهت پیش‌بینی ضریب دبی آنها و مقایسه عملکرد هیدرولیکی آنها با مدل مشابه مستطیلی بود. در مجموع ۱۵۹ آزمایش تجربی با استفاده از طرح‌های هندسی مختلف و متغیرهای هیدرولیکی انجام شد. به طور کلی با توجه به نتایج مشخص گردید که در شرایط جریان یکسان و هندسه‌های مشابه، راندمان سرریز جانبی مثلی دارای بستر شیب‌دار بیشتر از سرریزهای جانبی مثلی بستر ثابت و سرریزهای جانبی مستطیلی معمولی به ترتیب به میزان ۳۹ و ۷۸ درصد بود. سرریزهای جانبی مثلی با بستر شیب‌دار بهترین عملکرد خود را با ارتفاع سرریز بیشتر نشان دادند، جایی که بالاترین ضرایب دبی و کمترین آسیب‌پذیری را نسبت به افزایش عمق جریان داشتند.

Roushangar and Mehrizad (2024) با استفاده از مدل‌های مختلف مبتنی بر هسته برای پیش‌بینی ضریب دبی (Cd) برای دو نوع مجزا از سرریزهای استوانه‌ای که دارای پشتیبانی عمودی و یک رمپ بالادست ۳۰ درجه هستند، به پیش‌بینی ضریب دبی در سرریزهای استوانه‌ای عمودی پرداختند. نتایج نشان داد که مدل GPR، با معیارهای آماری $R = 0.967$ ، بازده نش ساتکلیف $(NSE) = 0.935$ ، و ریشه میانگین مربع خطا $(RMSE) = 0.027$ ، دقت بیشتری را در مدل‌سازی نشان می‌دهند.

درمورد اثر آستانه بر عملکرد سازه‌های هیدرولیکی نیز تاکنون مطالعات مختلفی صورت گرفته است.

Daneshfaraz et al., (2022a) به مطالعه نظری و آزمایشگاهی اثر کاربرد آستانه با عرض‌های مختلف بر مقدار ضرایب دبی دریاچه‌ها پرداختند. در این تحقیق تأثیر باز شدن دریاچه، قرارگیری آستانه با عرض‌های مختلف در زیر دریاچه و موقعیت آستانه از زیر دریاچه بر روی ضریب دبی به صورت تجربی بررسی شد. آستانه‌ها در موقعیت‌های زیر، مماس و بالادست دریاچه در فواصل ۷٫۵ و ۱۷٫۵ سانتی متری دریاچه قرار می‌گیرند. نتایج مطالعات نشان داد که ضریب دبی با افزایش عرض آستانه و کاهش سطح کل جریان عبوری از دریاچه افزایش می‌یابد. ضریب دبی با نصب آستانه در فواصل معین در فاصله فزاینده نسبت به بالادست دریاچه افزایش می‌یابد و نسبت به حالت بدون آستانه مقدار کمتری دارد.

Daneshfaraz et al., (2022b) در پژوهش دیگری به بررسی تأثیر آستانه بر روی هیدرولیک جریان در دریاچه‌های کشویی پرداختند. این مطالعه به بررسی تجربی و عددی تأثیر آستانه‌ها با مشخصات هندسی مختلف و در موقعیت‌های مختلف بر ویژگی‌های هیدرولیکی جریان از دریاچه‌های کشویی می‌پردازد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که شاخص‌های آماری مدل آشفستگی RNG در مقایسه با مدل‌های آشفستگی $k-\epsilon$ ، $k-\omega$ و LES دقت بالایی دارند. ضریب تخلیه (Cd) با باز شدن دریاچه رابطه معکوس دارد. در شرایط وجود آستانه، ضریب دبی بیشتر از حالت بدون آستانه است. اما افزایش طول آستانه منجر به افزایش تنش برشی جریان و در نتیجه کاهش Cd می‌شود. Cd دریاچه‌هایی با ضخامت‌های مختلف آستانه همیشه بیشتر از حالت بدون آستانه است، اما به دلیل ثابت بودن نسبت عمق سیال بالای آستانه به دهانه دریاچه، Cd تا حدودی افزایش می‌یابد و سپس با افزایش ضخامت آستانه کاهش می‌یابد.

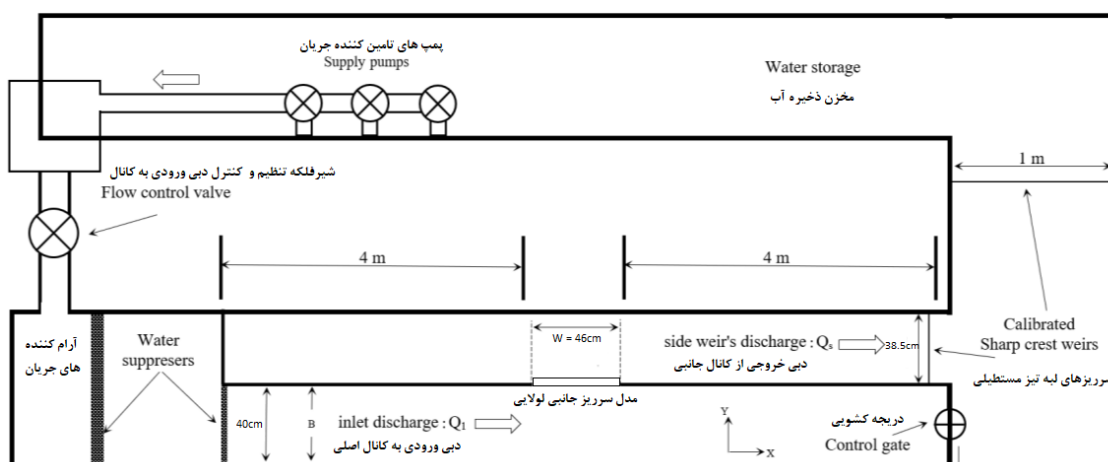
با توجه به پژوهش‌های صورت گرفته تاکنون، مشخص است که با وجود آن که مدل‌های سرریز جانبی مختلفی با هندسه و عملکرد هیدرولیکی منحصر به فرد تاکنون ارائه شده‌اند، اما عملکرد سرریزهای لولایی به عنوان یک سازه سرریز جانبی مورد مطالعه جامع واقع نشده و تحقیقات انجام شده نیز (در صورت وجود) گستره بسیار محدودی داشته‌اند. همچنین تاکنون برای سرریزهای لولایی، آستانه جریان

در نظر گرفته نشده است. لذا با توجه به اینکه افزایش راندمان و بهره‌وری سرریزهای جانبی و ارائه مدل‌های کارآمد در شبکه‌های آبیاری و زهکشی همواره یکی از دغدغه‌ها و موضوعات مورد توجه محقق بوده است، در پژوهش حاضر یک مدل جدید تحت عنوان سرریز جانبی لولایی با آستانه معرفی شده و مورد مطالعه قرار گرفته است و ضریب دبی و راندمان این مدل از سرریز در حالتی که بخش لولایی آن رو به کانال اصلی باز شود، مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

مدل مفهومی

آزمایش‌های پژوهش حاضر، در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده علوم آب و محیط‌زیست دانشگاه شهید چمران اهواز صورت گرفته است. فلوم مورد نظر برای انجام آزمایش‌ها، ۱۲ متر طول، ۸۰ سانتی متر عرض و ۸۰ سانتی متر ارتفاع دارد. جنس دیواره فلوم از نوع پلاستیکی گلس و کف آن از جنس آهن ضد زنگ به ضخامت ۱۰ میلی متر می‌باشد. جهت ایجاد شرایط مناسب برای مدلسازی جریان متغیر مکانی عبوری از سرریز جانبی و انجام آزمایش‌ها، با قرار دادن صفحه‌ای از جنس ورق PVC با ضخامت ۱۶ میلی متر به موازات دیواره فلوم در میانه آن، فلوم به دو قسمت کانال اصلی و جانبی تقسیم شده است. عرض کانال اصلی و کانال جانبی تحت این شرایط به ترتیب برابر ۴۰ و ۳۸٫۵ سانتی متر خواهد بود. علاوه بر این به منظور ایجاد استغراق در سرریز جانبی، کف کانال اصلی به صورت پیش فرض در حدود ۱۵ سانتی متر بالاتر نسبت به کف کانال جانبی (جمع‌کننده) قرار داده شده و سپس کف آن به وسیله ورق‌های PVC با ضخامت ۱۶ میلی متر با شیب کف ۰٫۰۰۰۲ پوشانده شده است.

میزان بازشدگی محلی که جهت نصب و قرارگیری مدل سرریز جانبی در دیواره جدا کننده تعبیه شده است (محل آبیگری)، برابر با ۴۶ سانتی متر می‌باشد. محل نصب مدل در فاصله ۴ متری از شروع انتهای بالادست کانال، جایی که کانال به دو کانال اصلی و جمع‌کننده تقسیم می‌شود، واقع شده است. شکل (۱) شماتیک فلوم آزمایشگاهی را نمایش می‌دهد.



شکل ۱. شماتیک فلوم آزمایشگاهی و تجهیزات مرتبط

در پژوهش حاضر به منظور دست‌یابی به اهداف ذکر شده، تعدادی مدل فیزیکی طراحی و ساخته شد. این مدل‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک واقع در دانشکده علوم آب و محیط‌زیست دانشگاه شهید چمران اهواز، نصب و مورد آزمایش قرار گرفتند. جهت ساخت مدل‌ها، از ورق PVC به دلیل خاصیت ضدآب بودن و دوام و مقاومت بالا استفاده گردید.

مدل شاهد در این پژوهش یک سرریز لبه تیز قائم مستطیلی به ارتفاع ثابت ۱۴ سانتی متر می‌باشد (تحت عنوان مدل R). در ادامه جهت تفکیک بخش آستانه و لولایی سرریز جانبی، لازم است که مدل‌ها با نسبت‌های خاصی به دو قطعه مجزا (بخش آستانه و بخش لولایی) برش داده شده و تقسیم بندی گردند. ارتفاع بخش آستانه و بخش لولایی سرریز برش داده شده به ترتیب برابر با ۶ و ۸ سانتی متر می‌باشد. این دو قطعه توسط تعدادی پیچ و لولا به یکدیگر متصل می‌شوند تا امکان باز و بسته شدن بخش لولایی سرریز جانبی و در نتیجه آن باز شدن سرریز تحت زاویه دلخواه رو به کانال اصلی فراهم گردد (تحت عنوان مدل PSW).

به منظور اینکه میزان تاثیر بازشدگی کناره‌های سرریز لولایی از تاثیرات ناشی از طول آبیگری متمایز گردد، تعدادی از آزمایشات نیز تحت شرایط بسته بودن کناره‌های مدل سرریز لولایی انجام خواهد گرفت. در این شرایط کناره‌های بالادست و پایین دست سرریز کاملا

بسته بوده و عبور جریان فقط از روی تاج سرریز امکان پذیر خواهد بود (تحت عنوان مدل PSW-C). همچنین به منظور دستیابی به یک مدل بهینه، یک حالت نیمه بسته در شرایطی که کناره ابتدایی مدل باز و انتهای آن بسته باشد نیز در نظر گرفته می شود (تحت عنوان مدل PSW-HC). به منظور جلوگیری از نفوذ آب، روی هر کدام از مدل ها توسط برچسب ضد آب مخصوص کاملاً پوشانده می شود. در ادامه به کمک دستگاه عمق سنج سوزنی، عمق جریان در انتهای بالادست، انتهای پایین دست و روی تاج سرریز و به فواصل معینی در طول و عرض فلوم برداشت خواهد شد. در پایان داده های برداشت شده حاصل از آزمایش ها مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته و ضرایب دبی و اندمان مدل ها استخراج خواهد شد.

روش شناسی پژوهش

برای رسیدن به اهداف این تحقیق در مجموع تعداد ۵۰ آزمایش در نظر گرفته شده است (۴۵ آزمایش اصلی و ۵ آزمایش شاهد). در ابتدا لازم است که تمامی پارامترهای مهم و تاثیرگذار بر ضریب دبی سرریز جانبی لولایی با آستانه شناسایی گردند:

$$f(Q, L_w, b, P, Y_u, \mu, \rho, \sigma, g, \alpha) \quad \text{رابطه (۸)}$$

پارامترهای رابطه (۸) عبارتند از: دبی جریان (Q)، زاویه سرریز لولایی در جهت کانال اصلی (α)، ارتفاع سرریز (P)، طول تاج سرریز (L_w)، جرم مخصوص سیال (ρ)، لزجت دینامیکی سیال (μ)، شتاب ثقل (g)، کشش سطحی (σ)، عرض مقطع آبگیر (b)، عمق جریان در بالادست سرریز (Y_u).

در ادامه با استفاده از تکنیک های خاص آنالیز ابعادی، این پارامترها باید با یکدیگر ترکیب شوند تا به صورت پارامترهای بدون بعد درآیند و نیز از نظر فیزیکی معنی دار و معرف ویژگی ها و شرایط مخصوص آن پدیده باشند. مهم ترین و شناخته شده ترین روش برای آنالیز ابعادی، روش باکینگهام می باشد. به کمک این روش در نهایت به پارامترهای بدون بعد زیر که در برآورد ضریب دبی جریان تاثیرگذار هستند، خواهیم رسید (رابطه ۹):

$$C_m = f\left(\frac{L_w}{b}, \frac{Y_u}{P}, Fr, \alpha, Re, We\right) \quad \text{رابطه (۹)}$$

در این رابطه، Fr عدد فرود جریان، پارامتر $\frac{L_w}{b}$ نسبت طول تاج سرریز به عرض مقطع آبگیر بوده و معرف شرایط باز یا بسته بودن کناره های مدل می باشد. $\frac{Y_u}{P}$ نشان دهنده نسبت عمق بالادست جریان به ارتفاع سرریز می باشد که در این تحقیق تمامی آزمایش ها در یک عمق بالادست یکسان ($Y_u = 16.5 \text{ cm}$) انجام شده و پارامتر ارتفاع سرریز (P) در هر یک از مدل ها برابر با ارتفاع قائم سرریز (بدون زاویه بازشدگی) در نظر گرفته شده است. لذا با توجه به یکسان بودن ارتفاع قائم مدل ها و ثابت فرض نمودن عمق بالادست جریان، پارامتر $\frac{Y_u}{P}$ برای مدل های مختلف ثابت فرض می گردد. α نیز زاویه بازشدگی سرریز لولایی در جهت کانال اصلی می باشد.

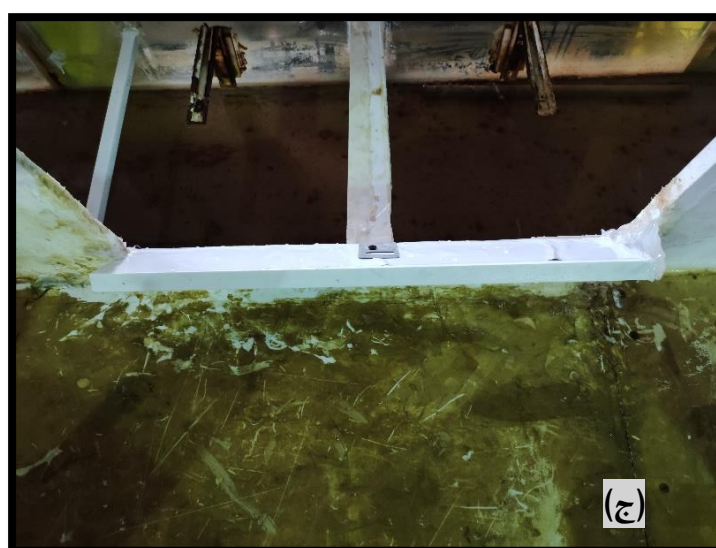
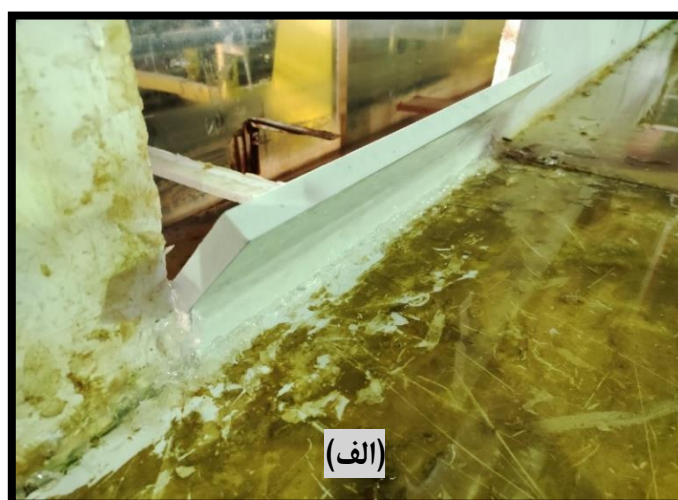
در شرایطی که عمق جریان روی سرریز زیاد باشد، معمولاً می توان از اثرات کشش سطحی صرف نظر کرد. این موضوع به دلیل این است که در عمق های زیاد، نیروی گرانشی که بر روی حجم آب عمل می کند، به مراتب بیشتر از نیروهای ناشی از کشش سطحی است. به همین دلیل، در محاسبات هیدرولیکی مربوط به سرریزها و جریان های عمیق، معمولاً می توان کشش سطحی را نادیده گرفت. با این حال، در برخی شرایط خاص (مانند جریان های بسیار آرام یا در مقیاس های میکروسکوپی) ممکن است همچنان کشش سطحی تأثیرگذار باشد، اما در بیشتر موارد با عمق های بزرگ، این تأثیر به حداقل می رسد. در این تحقیق به دلیل ایجاد شرایط عمق بیشتر از ۳ سانتی متر بر روی سرریز جانبی، اثرات کشش سطحی و عدد وبر (We) قابل چشم پوشی خواهند بود (نوروزی و همکاران - ۲۰۱۹ و دانش فراز و همکاران - ۲۰۲۳). همچنین از آنجایی که عدد رینولدز (Re) در این تحقیق در محدوده ۶۲۸۶۵ تا ۱۱۳۳۵۵ برآورد گردید، واضح است که جریان متلاطم بوده و میتوان از اثرات این پارامتر صرف نظر نمود. لذا در نهایت خواهیم داشت:

$$C_m = f\left(\frac{L_w}{b}, Fr, \alpha\right) \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

آزمایش ها برای ۵ دبی کل ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰ و ۴۵ لیتر بر ثانیه (اعداد فرود بالادست ۰،۳ تا ۰،۵۴)، زوایای بازشدگی ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه در یک عمق بالادست یکسان ($Y_u = 16.5 \text{ cm}$) و نسبت عمق بالادست به ارتفاع سرریز ($\frac{Y_u}{P}$) ثابت برای هر کدام از مدل ها انجام خواهند گرفت. مقدار نسبت $\frac{L_w}{b}$ برای مدل R (شاهد) و مدل PSW برابر با یک بوده، برای مدل PSW-C تحت زوایای بازشدگی ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه به ترتیب برابر با ۱،۱۷، ۱،۲۳ و ۱،۳ و برای مدل PSW-HC نیز مقادیر نسبت فوق تحت زوایای مختلف برابر ۰،۸، ۱،۱۲ و ۱،۱۵

می باشد.

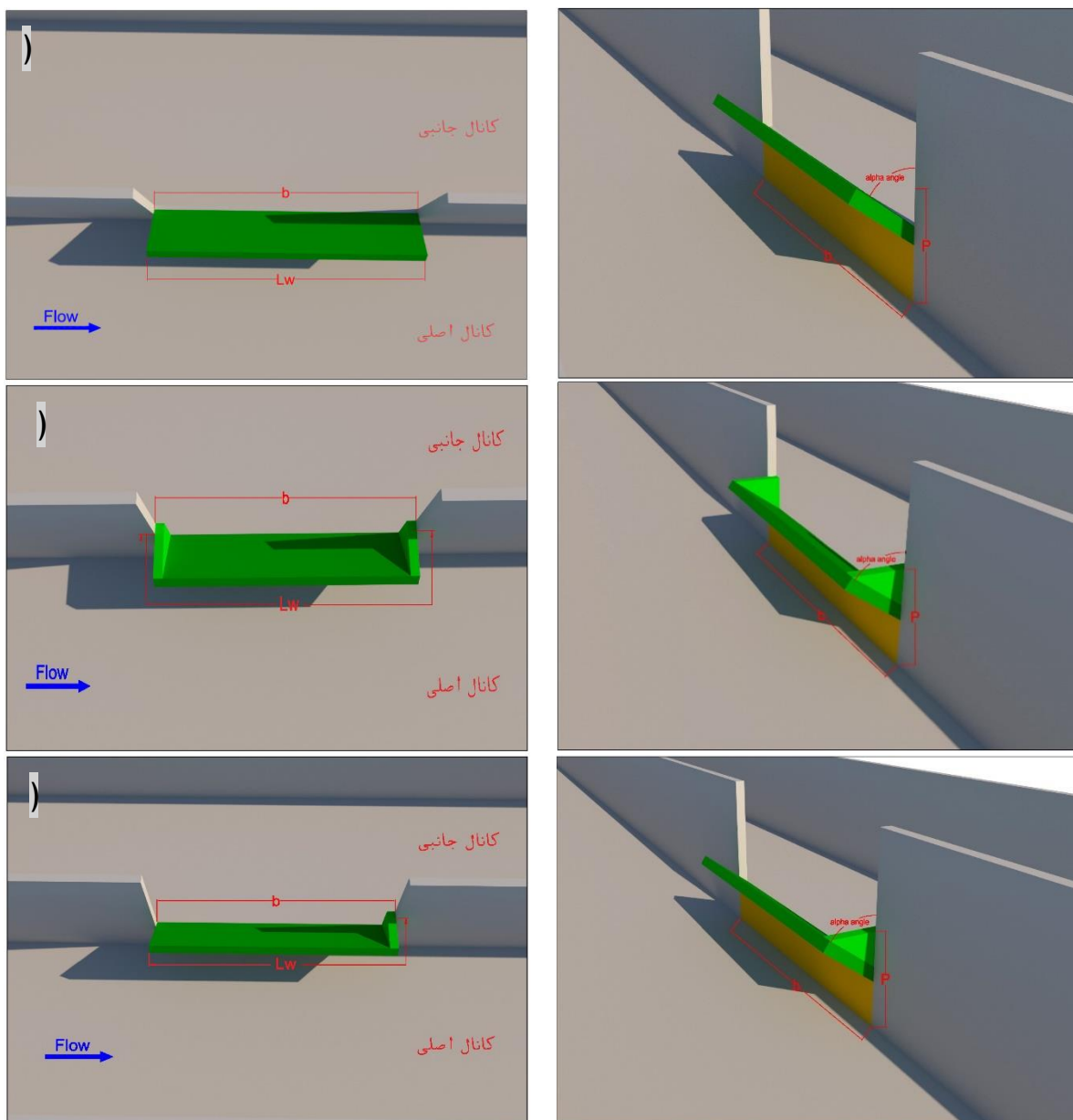
شکل (۲) نمایی از مدل های مختلف این آزمایش را نمایش می دهد. جدول (۱) محدوده تغییرات پارامترهای مختلف در این پژوهش را نمایش می دهد. در شکل (۳) پارامترهای مورد اشاره به صورت شماتیک در یک شکل سه بعدی ارائه شده اند.



شکل ۲. نمایی از یک مدل نصب شده در فلوم تحت زاویه بازشدگی معین رو به کانال اصلی با الف) کناره های باز (PSW)، ب) کناره های بسته (PSW-C) و ج) انتهای بسته و ابتدای باز (PSW-HC)

جدول ۱. محدوده تغییرات پارامترهای مختلف در پژوهش حاضر

زاویه α (درجه)	$\frac{L_w}{b}$	y_u (cm)	عدد فرود بالادست جریان (Fr)	دبی کل جریان (لیتر بر ثانیه)	تعداد آزمایش‌ها	نام مدل
-	۱	۱۶/۵	۰/۳ - ۰/۵۴	۲۵-۴۵	۱۵	R
۳۰-۴۵-۶۰	۱				۱۵	PSW
۳۰-۴۵-۶۰	۱/۱۷ - ۱/۳۳ - ۱/۳				۱۵	PSW-C
۳۰-۴۵-۶۰	۱/۰۸ - ۱/۱۲ - ۱/۱۵				۱۵	PSW-HC

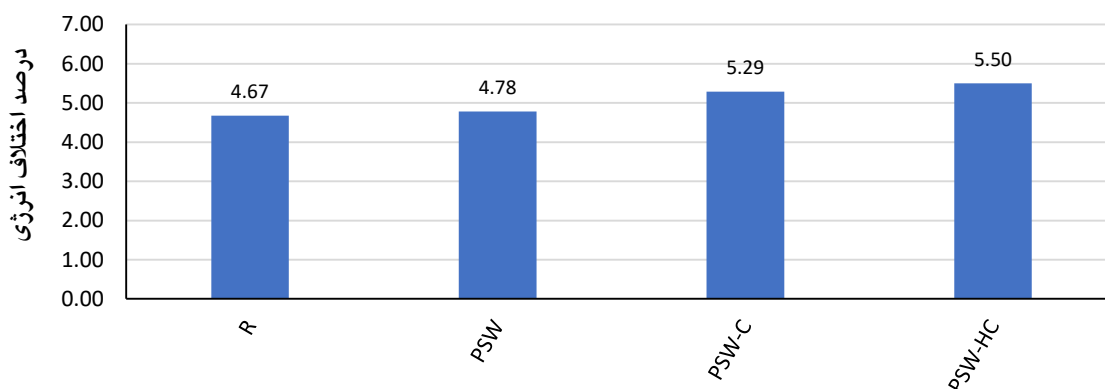


شکل ۳. شماتیک پارامترهای موثر در تحقیق حاضر برای مدل الف) PSW، ب) PSW-C، ج) PSW-HC.

یافته‌های پژوهش

با توجه به توضیحات گفته شده در بخش‌های قبلی، پس از انجام آزمایش‌ها و بررسی نتایج، در شکل (۴)، مقادیر میانگین درصد اختلاف انرژی ویژه برای تمام مدل‌های مورد استفاده در این پژوهش مشاهده می‌شود. در مقایسه مدل‌های مختلف مشاهده می‌شود که مقادیر به

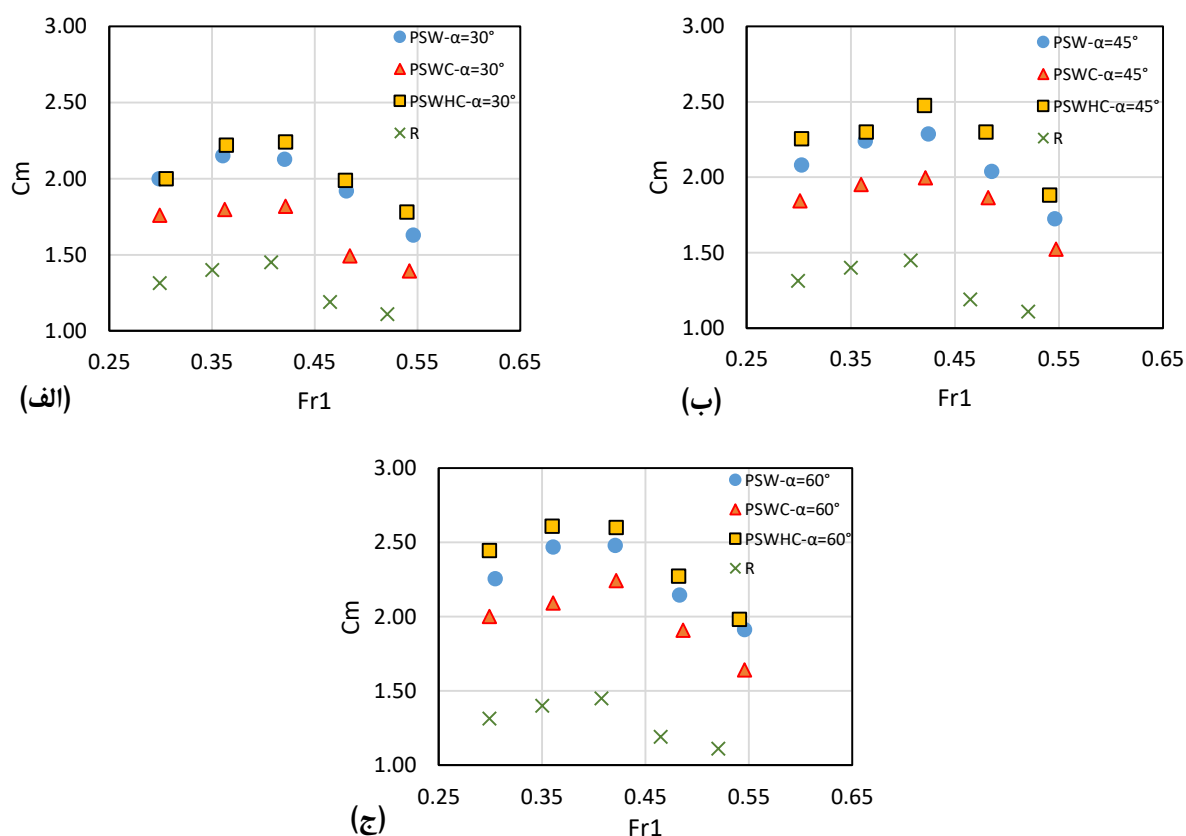
دست آمده برای $\frac{\Delta E}{E_1}$ نزدیک به هم بوده و لذا خطای احتمالی ناشی از عدم یکسان بودن انرژی ویژه در انتهای بالادست و پایین دست سرریز به یک نسبت بین مدلها تقسیم می گردد. در نتیجه با توجه به مقادیر درصد اختلاف انرژی مخصوص به دست آمده در پژوهش حاضر، مقایسه ضرایب دبی بر اساس فرضیه دیمارچی برای استخراج نتایج تحقیق با احتیاط قابل قبول می باشد. در ادامه ضریب دبی و راندمان مدل های مختلف آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه خواهند شد.



شکل ۴. درصد اختلاف انرژی ویژه در مدل های آزمایشگاهی

نتایج و بحث

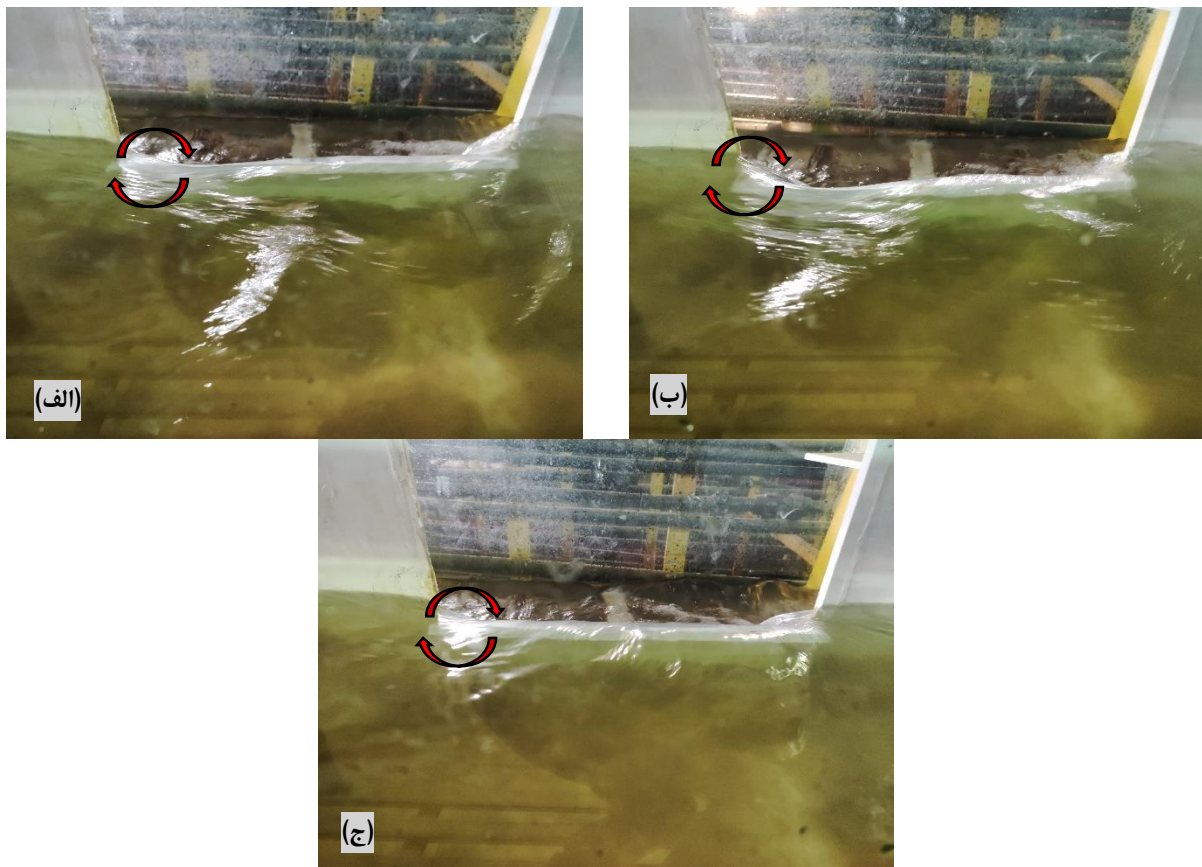
شکل (۵) ضریب دبی مدل های PSW، PSW-C و PSW-HC را نسبت به مدل شاهد R در مقابل عدد فرود انتهای بالادست جریان (Fr_u) به ازای یک نسبت $\frac{Y_u}{P}$ ثابت نمایش می دهد.



شکل ۵. مقایسه مقدار ضریب دبی در مقابل عدد فرود بالادست برای مدل های PSW، PSW-C، PSW-HC تحت زوایای (الف) ۳۰ درجه (ب) ۴۵ درجه و (ج) ۶۰ درجه نسبت به مدل R

با توجه به شکل (۵) مشاهده می‌شود که در مجموع بازشدگی مدل رو به کانال اصلی منجر به بهبود عملکرد و افزایش ضریب دبی سرریز نسبت به حالت شاهد خواهد شد. دلیل این پدیده ناشی از افزایش طول تاج سرریز نسبت به حالت شاهد و ورود جریان از کناره‌ی ابتدایی سرریز جانبی می‌باشد و همچنین مشاهدات آزمایشگاهی حاکی از کاهش محدوده گردابه‌های افقی می‌باشد. لذا در بیشترین بازشدگی (زاویه ۶۰ درجه) مقدار ضریب دبی بیشینه خواهد بود و تا ۸۰٪ بیشتر از حالت شاهد خواهد بود.

همچنین نتایج آزمایشگاهی نشان داد که بستن هردو کناره سرریز جانبی (مدل PSW-C) بر عملکرد سرریز تاثیر منفی داشته و نسبت به حالتی که کناره‌های مدل باز است (PSW)، ضریب دبی کمتری را ثبت نموده است. شکل (۶) تصویر گردابه (Vortex) های ایجاد شده در ورودی مدل‌های مورد بحث را برای نسبت ثابت $\frac{Y_{in}}{p}$ و عدد فرود بالادست برابر ۰,۴۲ (دبی کل برابر با ۳۵ لیتر بر ثانیه) تحت زاویه بازشدگی ۶۰ درجه نمایش می‌دهد.



شکل ۶. مقایسه گردابه‌های ایجاد شده در ورودی مدل‌های (الف) PSW، (ب) PSW-C و (ج) PSW-HC برای عدد فرود بالادست ۰,۴۲ و تحت زاویه ۶۰ درجه

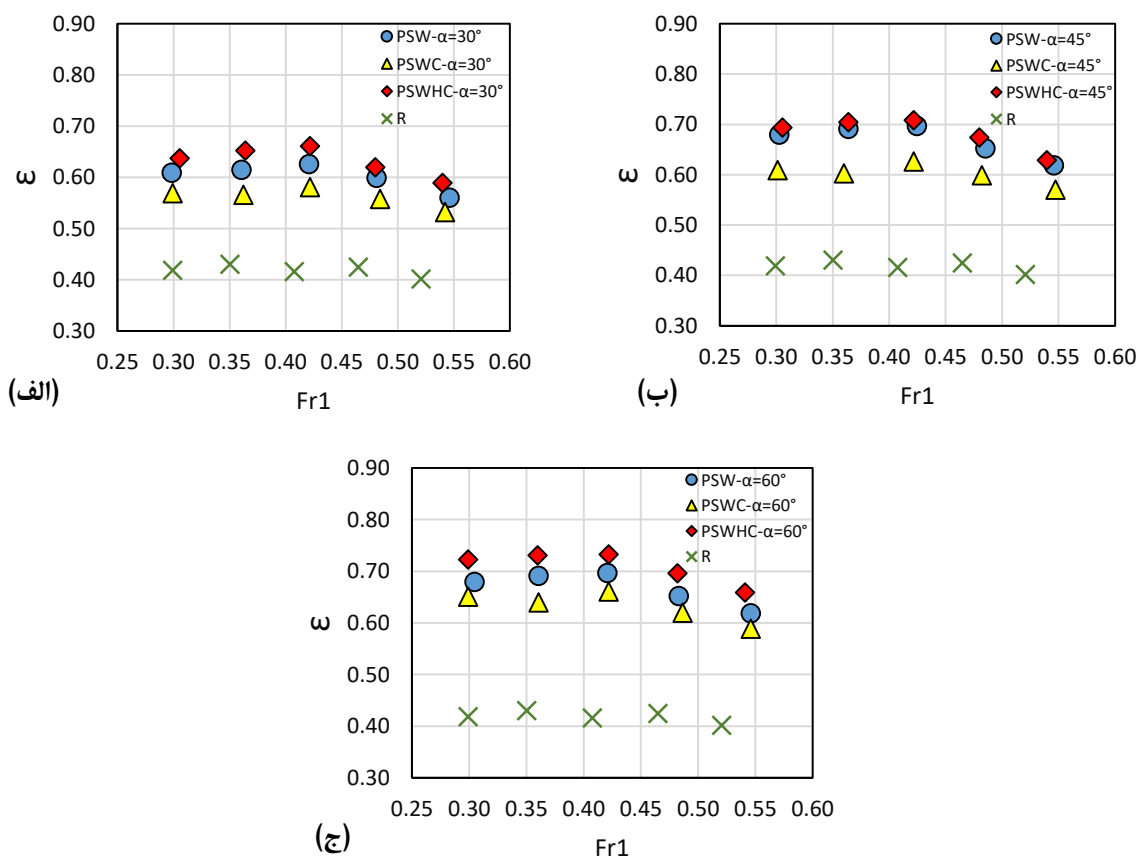
با توجه به شکل مشاهده می‌شود که نسبت به مدل PSW، در دهانه ورودی مدل PSW-C شدت گردابه‌های جریان تقویت خواهد شد. در شرایط قرارگیری مدل PSW-HC، مشاهده می‌شود که نسبت به حالت قبل از مساحت ناحیه گردابی جریان کاسته شده و شدت گردابه‌ها در دهانه ورودی کاهش خواهد یافت.

بستن کناره ابتدایی مدل آزمایشگاهی در کانال اصلی، مانند یک مانع و عامل انسداد در مسیر جریان عمل نموده و افزایش قدرت گردابه‌ها را در دهانه ورودی سرریز به دنبال خواهد داشت و در نتیجه موجب کاهش میزان دبی ورودی به سرریز خواهد شد. لذا مشاهده می‌شود که با اصلاح ساختار مدل و باز نمودن کناره ورودی و کارگذاری مدل PSW-HC (حالتی که ابتدای مدل باز و انتهای آن بسته شود)، از شدت جریان گردابی کاسته شده و آب به راحتی وارد سرریز خواهد شد و با توجه به انسداد انتهای سرریز، عمق پروفیل جریان در این ناحیه افزایشی خواهد بود و منجر به افزایش ضریب دبی و مقدار دبی عبوری از روی سرریز می‌گردد. علاوه بر این نتایج نشان داد که در محدوده اعداد فرود مورد بررسی قرار گرفته، تا اعداد فرود ۰,۴ الی ۰,۴۵، مقدار ضریب دبی افزایش یافته و پس از آن با افزایش عدد

فرود بالادست جریان، ضریب دبی برای تمامی مدلها روند کاهشی داشته است. روند کاهشی مقدار ضریب دبی با افزایش عدد فرود (و در نتیجه کاهش حجم جریان عبوری از سرریز) را می‌توان به گردابه‌های قوی‌تری که با افزایش عدد فرود بالادست جریان ایجاد می‌گردند مرتبط دانست. افزایش اعداد فرود بالادست منجر به تشکیل گردابه‌های قوی‌تری شده که این پدیده قدرت جریان‌های برگشتی ایجاد شده را افزایش داده و باعث کاهش حجم جریان عبوری از روی تاج سرریز جانبی خواهد شد.

طبق محاسبات انجام گرفته مشخص گردید که ضریب دبی مدل PSW برای زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه به ترتیب در حدود ۵۰، ۶۵ و ۸۰ درصد نسبت به مدل شاهد (R) افزایش خواهد یافت. همچنین نتایج نشان می‌دهد که مقدار ضریب دبی مدل آزمایشگاهی PSW-HC تحت زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه به ترتیب به میزان ۵، ۹ و ۷ درصد نسبت به مدل PSW و ۲۴، ۲۲ و ۲۰ درصد نسبت به مدل PSW-C افزایش یافته است.

شکل (۷) راندمان (ϵ) مدل‌های PSW، PSW-C و PSW-HC را نسبت به مدل شاهد R در مقابل عدد فرود انتهای بالادست جریان (Fr_u) نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که در تمامی مدل‌ها، برای تمام اعداد فرود بالادست، با افزایش زاویه بازشدگی، راندمان نسبت به مدل شاهد افزایش یافته و تحت بیشترین زاویه بازشدگی، راندمان مدل‌ها خصوصا در محدود اعداد فرود ۰٫۳ تا ۰٫۴، نسبت به سایر حالات بیشتر خواهد بود. همچنین مشاهده می‌شود که برای اعداد فرود ۰٫۴ به بالا، مقدار راندمان برای تمامی مدل‌ها روند کاهشی خواهد داشت.



شکل ۷. مقایسه مقدار راندمان (ϵ) در مقابل عدد فرود بالادست برای مدل‌های PSW، PSW-C و PSW-HC تحت زوایای (الف) ۳۰ درجه (ب) ۴۵ درجه و (ج) ۶۰ درجه نسبت به مدل R

با افزایش دبی ورودی (و افزایش عدد فرود)، سرعت جریان ورودی افزایش یافته و لذا دبی کمتری از بالادست سرریز عبور می‌نماید و در نتیجه آن راندمان سرریز با افزایش عدد فرود بالادست کمتر می‌شود. محاسبات نشان داد که راندمان مدل PSW تحت زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه به طور میانگین در حدود ۴۴، ۵۲ و ۶۰ درصد نسبت به مدل شاهد (R) افزایش یافته است. همچنین مشاهده گردید که بستن کناره‌های مدل سرریز جانبی تحت زاویه α بر عملکرد مدل اثر منفی داشته و منجر به کاهش مقدار راندمان نسبت به زمانی می‌شود که کناره‌های مدل باز باشد. از سوی دیگر در صورتی که ابتدای مدل باز بوده و صرفاً انتهای آن بسته شود، راندمان سرریز افزایش یافته و



نسبت به حالات دیگر بیشتر خواهد بود. در نتیجه مدل PSW-HC تحت تمام زوایای بازشدگی رو به کانال اصلی، بهینه‌ترین عملکرد را دارا می‌باشد و طبق محاسبات صورت گرفته، راندمان مدل PSW-HC برای زوایای بازشدگی (رو به کانال اصلی) ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه به طور متوسط به ترتیب در حدود ۵، ۵ و ۶ درصد بیش از مدل PSW و ۷، ۸ و ۱۰ درصد بیش از مدل PSW-C تحت زوایای مشابه خواهد بود.

نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی ضریب دبی جریان و راندمان سرریز در حالتی که سرریز لولایی به عنوان یک سرریز جانبی مورد استفاده قرار گیرد، پرداخته شد. به منظور بررسی تاثیر زاویه بازشدگی رو به کانال اصلی (α) بر ضریب دبی و راندمان سرریز جانبی، عملکرد مدل‌های PSW (مدل سرریز جانبی لولایی با آستانه و کناره‌های سرریز باز)، PSW-C (مدل سرریز جانبی لولایی با آستانه و کناره‌های سرریز بسته) و PSW-HC (حالتی که ابتدای مدل باز و انتهای آن بسته شود)، نسبت به مدل شاهد R (سرریز جانبی لبه تیز قائم مستطیلی) در مقابل عدد فرود انتهای بالادست جریان (F_{ru}) به ازای یک نسبت $\frac{Y_u}{P}$ ثابت با توجه به زاویه بازشدگی برای هر مدل مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت.

با توجه به نتایج مشخص گردید که در مجموع بازشدگی مدل رو به کانال اصلی منجر به بهبود عملکرد و افزایش ضریب دبی سرریز نسبت به حالت شاهد خواهد شد. در بیشترین بازشدگی (زاویه ۶۰ درجه) مقدار ضریب دبی بیشینه خواهد بود و جریان بیشتری از روی تاج سرریز عبور خواهد کرد. محاسبات نشان داد که ضریب دبی مدل PSW برای زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه به ترتیب در حدود ۵۰، ۶۵ و ۸۰ درصد نسبت به مدل شاهد (R) افزایش خواهد یافت. همچنین نتایج نشان می‌دهد که مقدار ضریب دبی مدل آزمایشگاهی PSW-HC تحت زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه به ترتیب به میزان ۵، ۹ و ۷ درصد نسبت به مدل PSW و ۲۲، ۲۴ و ۲۰ درصد نسبت به مدل PSW-C افزایش یافته است.

همچنین در تمامی مدل‌ها، برای تمام اعداد فرود بالادست، با افزایش زاویه بازشدگی، راندمان نسبت به مدل شاهد افزایش یافته و تحت بیشترین زاویه بازشدگی، راندمان مدل‌ها خصوصا در محدود اعداد فرود ۰٫۳ تا ۰٫۴ نسبت به سایر حالات بیشتر خواهد بود. محاسبات نشان داد که راندمان مدل PSW تحت زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه به طور میانگین در حدود ۴۴، ۵۲ و ۶۰ درصد نسبت به مدل شاهد (R) افزایش یافته است.

همچنین نتایج نشان داد که بستن کناره‌های مدل سرریز جانبی تحت زاویه α بر عملکرد مدل اثر منفی داشته و منجر به کاهش مقدار راندمان نسبت به زمانی می‌شود که کناره‌های مدل باز باشد. از سوی دیگر در صورتی که ابتدای مدل باز بوده و صرفا انتهای آن بسته شود، راندمان سرریز افزایش یافته و نسبت به حالات دیگر بیشتر خواهد بود. در نتیجه مدل PSW-HC تحت تمام زوایای بازشدگی رو به کانال اصلی، بهینه‌ترین عملکرد را دارا می‌باشد و طبق محاسبات صورت گرفته، راندمان مدل PSW-HC برای زوایای بازشدگی (رو به کانال اصلی) ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه به طور متوسط به ترتیب در حدود ۵، ۵ و ۶ درصد بیش از مدل PSW و ۷، ۸ و ۱۰ درصد بیش از مدل PSW-C تحت زوایای مشابه خواهد بود.

با توجه به نتایج حاصل شده، مشخص می‌گردد که به کارگیری مدل سرریز جانبی لولایی با آستانه جریان تحت بازشدگی رو به کانال اصلی بهره‌وری مناسبی نسبت به مدل قائم لبه تیز مستطیلی (نمونه شاهد) داشته و همچنین افزایش زاویه بازشدگی این مدل از سرریز، منجر به افزایش ضریب دبی و راندمان آن شده و بر عملکرد سرریز جانبی لولایی با آستانه تاثیر مثبت خواهد داشت. در ادامه با توجه به موضوعات ارائه شده در این تحقیق و به منظور کمک به ارتقا، توسعه و یا تکمیل تحقیقات آینده، پیشنهاداتی به شرح موارد زیر در راستای ادامه پژوهش حاضر ارائه می‌گردد:

مدلسازی عددی با استفاده از نرم افزارهایی مانند Fluent و Flow3D و مقایسه نتایج حاصل از پژوهش‌های عددی با نتایج آزمایشگاهی پژوهش حاضر.

بررسی اثر کاهش عرض و تنگ شدگی مقطع آبگیر (b) و نسبت عرض مقطع آبگیر به عرض کانال اصلی (b/B) بر عملکرد مدل سرریز جانبی لولایی با آستانه.

بررسی اثر وجود رسوبات یا پوشش گیاهی در کانال اصلی بر عملکرد مدل سرریز جانبی لولایی با آستانه و تاثیر آن بر پروفیل جریان. بررسی اثر شیب‌دار نمودن کف کانال اصلی در جهت یکنواخت کردن عمق آب بر روی تاج سرریز و تاثیر آن بر عملکرد سرریز جانبی لولایی با آستانه.

ایجاد شرایط جریان غیر ماندگار (ناپایدار) و فوق بحرانی، بررسی اثر این موارد بر عملکرد سرریز جانبی لولایی با آستانه و مقایسه با شرایط جریان ماندگار (پایدار) و زیر بحرانی.

منابع

- حسن زاده وایقان، وحید؛ محمدی، میر علی؛ سلماسی، فرزین؛ حسین زاده دلیر، علی و مناف پور، محمد. (۱۳۹۵). بررسی آزمایشگاهی پارامترهای هیدرولیکی سرریز نعل‌اسبی مدرن. مهندسی عمران مدرس. ۱۶ (۴): ۸۳-۹۳.
- حسین زاده، زینب؛ منعم، محمدجواد و کوچک زاده، صلاح. (۱۳۸۹). تعیین آزمایشگاهی ضریب دبی سرریز لولایی خودکار. سومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی.
- شیخ رضازاده نیکو، ندا؛ منعم، محمدجواد و صفوی، خداداد. (۱۳۹۴). استخراج معادله دبی جریان مستغرق و تعیین ضریب دبی در سرریز لولایی با فشردگی‌های جانبی مختلف. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، شماره ۵، جلد ۹، آذر - دی ۱۳۹۴، ص. ۷۰۰-۶۹۱.
- شیخ رضازاده نیکو، ندا؛ قبادی، ساناز و منعم، محمدجواد. (۱۳۹۵). تعیین معادله دبی-اشل برای سرریزهای لولایی. کنگره ملی آبیاری و زهکشی ایران.
- نورانی، بهرام؛ نوروزی، رضا؛ رضایی، فائزه و سلماسی، فرزین. (۱۴۰۰). بررسی رابطه دبی-اشل و ضریب دبی جریان در سرریزهای لبه تیز پلان، مثلثی! نشریه مهندسی عمران امیرکبیر ۲۰۱۷.۱۱.۰۱۰. 53(5), pp. 1689-1704. doi: 10.22060/ceej.2019.16931.6399

REFERENCES

- Abbaspour, A., Abdolahpour, M., & Salmasi, F. (2014). "Numerical Simulation of Flow over Rectangular Broad-crested Weir with Upstream and Downstream Side Slopes Using Fluent Model", *Water and Soil Science*, 23(4), pp. 265-276.
- Arvanaghi, H., Naderi, V., Azimi, V., & Salmasi, F. (2014). "Determination of discharge coefficient in inclined rectangular sharp-crested weirs using experimental and numerical simulation." *J. Curr. Res. Sci.*, 2(3), 401-406.
- Azimfar, S. M., Hosseini, S. A., & Khosrojerrdi, A. (2017). "Derivation of Discharge Coefficient of a Pivot Weir under Free and Submergence Flow Conditions"., *Flow Measurement and Instrumentation*, <https://doi.org/10.1016/j.flowneasinst.2017.11.010>
- Bijankhan, M., & Ferro, V. (2018). "Experimental Study and Numerical Simulation of Inclined Rectangular Weirs." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 144. 10.1061/(asce)ir.1943-4774.0001325.
- Brater, E.F., & King, H.W. (1976). "Handbook of Hydraulics." 6th ed. McGraw-Hill, New York. 584 pp.
- Chow. V.T. (1959) *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill, New York.
- Daneshfaraz, R., Norouzi, R., Abbaszadeh, H.R. & Azamathulla. H.M. (2022a). "Theoretical and experimental analysis of applicability of sill with different widths on the gate discharge coefficients". *Water Supply*; 22 (10): 7767-7781. doi: <https://doi.org/10.2166/ws.2022.354>
- Daneshfaraz, R., Norouzi, R., Abbaszadeh, H., Kuriqi, A. & Di Francesco, S. (2022b). "Influence of Sill on the Hydraulic Regime in Sluice Gates". An Experimental and Numerical Analysis. *Fluids*, 7, 244. <https://doi.org/10.3390/fluids707244>.
- Daneshfaraz, R., Norouzi, R., Patrick Abraham, J., Ebadzadeh, P., Akhondi, B., & Abar, M. (2023). Determination of flow characteristics over sharp-crested triangular plan form weirs using numerical simulation. *Water Science*, 37(1), 211-224.
- De Marchi, G. (1934). Essay on the performance of pivot weirs. *L Energia Electrica Milano, Italy*, 11: 11. 849-860.
- E.M.I.N. Emiroglu, M. Kisi, & O. Bilhan. (2010). "Predicting discharge capacity of triangular labyrinth side weir located on a straight channel by using an adaptive neuro-fuzzy technique", *Adv. Eng. Software* 41-154-160.
- Hasanzadeh Vayghan. V., Mohammadi. M., Salmasi. F., Hosseinzadeh Dalir. A. & Manafpour. M. "Experimental Investigation of Hydraulic Parameters in Modern Horseshoe Spillway". *MCEJ* 2016; 16 (4) :83-93. (inPersian)
- Hosseinzadeh, Z., Manem, J. & Kochzadeh, p. (2010). "Laboratory determination of flow coefficient of automatic pivot side weir". The third national conference on management of irrigation and drainage networks. (inPersian)
- Hulsing H. (1967). "Measurement of peak discharge at dams by indirect methods". U.S. Geol. Survey Techniques Water-Resources Inv., book 3, chap. A5, pp. 29.



- Kaya, N., E.M.I.N. Emiroglu, & H. Agaccioglu, (2011). "Discharge coefficient of a semi-elliptical side weir in subcritical flow", *Flow Measurement and Instrumentation*, Volume 22, Issue 1, Pages 25-32.
- Kindsvater, C. E., & Carter, R. W. (1957). "Discharge characteristics of rectangular thin plate weirs". *Journal Hydraulic. Division*. 83(6), 1-36.
- 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
- Michelazzo, G. (2015). "New analytical formulation of De Marchis model for a zero-height side weir." *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(12), 04015030.
- Norouzi, R., Daneshfaraz, R., & Ghaderi, A. (2019). Investigation of discharge coefficient of trapezoidal labyrinth weirs using artificial neural networks and support vector machines. *Applied Water Science*, 9(7), 1-10. [۱۰.۱۰۰۷/s13201-019-1026-5](https://doi.org/10.1007/s13201-019-1026-5)
- Nourani, B., Norouzi, R., Rezaei, F., & Salmasi, F. (2021). "Investigation of the Stage-Discharge Relation and Discharge Coefficient in Sharp-Crested Weirs with Triangular Shape in Plan", *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(5), pp. 1689-1704. doi: 10.22060/ceej.2019.16931.6399. (*inPersian*)
- Parvaneh, A., Parvaneh, M., Rakhshandehroo, G., Jalili Ghazizadeh, M. R. & Sadeghian, H. (2022). Discharge Characteristics of a Novel Inclined-Bed Triangular Side Weir in Subcritical Flow. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 148. 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001651.
- Roushangar, K., Khoshkanar, R. & Shiri, J. (2016). "Predicting trapezoidal and rectangular side weirs discharge coefficient using machine learning methods". *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 22, issue 3, pp. 254-261. 10.1080/09715010.2016.1177740.
- Roushangar, K. & Mehrizad, A. (2024). "Kernel-based framework for improved prediction of discharge coefficient in vertically supported cylindrical weirs". *Journal of Hydroinformatics*. 26 (8): 1883-1905. doi: <https://doi.org/10.2166/hydro.2024.039>.
- Schoder, E.W. & Turner, K.B. (1929). "Precise Weir Measurements." *Trans. ASCE*, 93, 999-1110.
- Sheikh Rezazadeh Niko, N., Manem, J. & Safavi, Kh. (2015). "Extracting the flow equation of submerged flow and determining the flow coefficient in a pivot side weir with different pivot compressions". *Iranian Irrigation and Drainage Magazine*, No. 5, Volume 9, December - December 2014, p. 691-700. (*inPersian*)
- Sheikh Rezazade Niko, N., Qobadi, S. & Manem, J. (2016). "Determining the Debye-Eschel equation for pivot weirs". *National Irrigation and Drainage Congress of Iran*. (*inPersian*)
- USBR. (1948). "Studies of Crests for Overfall Dams." *Bulletin 3*. Boulder Canyon Project, Final Report. United States Bureau of Reclamation, Denver.
- Wahlin B.T., & Replogle J.A. (1994). "Flow Measurement Using an Overshot Gate". United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, under Cooperative Agreement NO.1425-2-FC-81-19060 entitled Water Conservation Innovative Technology Study for Agriculture and Urban Irrigation Water.
- White. F. M. (2011) "Fluid Mechanics," 7th Edition, McGraw- Hill, New York.