

Research Article

Investigation of Specific Energy Stability in Converging Side Weirs with Guiding Structures

Amirreza Shahriari ¹ | Mehdi Daryaei ² | Seyed Mahmood Kashefipour ³ |
Mohammadreza Zayeri ⁴

1,2,3,4- Department of Water Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

(✉) Corresponding Author: M.Daryaei@scu.ac.ir

Received: 15 March 2025

Revised: 16 April 2025

Accepted: 17 April 2025

Available Online: 26 April 2025

How to cite this article:

Daryaei, M., Kashefipour, M., Shahriari, A., & Zayeri, M. (2025). Investigation of Specific Energy Stability in Converging Side Weirs with Guiding Structures. (In Persian with English abstract). *Journal of Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*. V.26, No.95, P:1-18.

<https://doi.org/10.22092/idsr.2025.368890.1610>

Introduction

Side weirs are widely used hydraulic structures in irrigation, drainage, and flood control systems. These structures allow excess water to be diverted from the main channel, helping to manage flow capacity effectively. In converging channels, the presence of guiding structures, such as flow deflectors, can influence the hydraulic performance of side weirs. Recent studies have highlighted the potential of guiding structures to enhance discharge capacity. However, uncertainties persist regarding the impact of convergence and added structures on specific energy variations in the main channel. The classical assumption of spatially varied flow with lateral outflow suggests that specific energy remains constant along the weir. This study aims to evaluate the validity of this assumption in converging channels with guiding structures by investigating specific energy variations using numerical simulations.

Methodology

A three-dimensional numerical model was developed using FLOW-3D to simulate flow over a converging side weir. The experimental setup by Maranzoni *et al.*, (2017) was used as a reference for model validation. The numerical domain consisted of a converging channel with a side weir, and guiding structures were placed on the weir crest at three different longitudinal positions (upstream, middle, and downstream) with installation angles of 60°, 90°, and 120° relative to the horizontal.

The Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) equations were solved using the RNG k- ϵ turbulence model. Boundary conditions included a specified flow rate at the inlet, a pressure outlet at the downstream boundary, and wall conditions for the channel boundaries. Grid independence was ensured by testing different mesh resolutions, with the final model consisting of approximately 1.5 million cells. The numerical model was validated against experimental data, with a maximum simulation error of less than 4%.

Results and Discussion

The numerical results showed that guiding structures influenced specific energy variations along the weir. The middle position of the weir exhibited the least change in specific energy (0.8%), making it the optimal location for installing guiding structures. In contrast, upstream and downstream placements resulted in greater energy variations, with mean differences of 1.17% and 1.37%, respectively.

The effect of installation angle on specific energy variations was negligible. Across different angles, the mean variation ranged from 1.03% to 1.22%, indicating that the angle of installation had little impact on energy conservation. The influence of the inflow Froude number was also examined. For Froude numbers below

0.3, specific energy variations remained under 0.5%. As the Froude number increased to 0.45, energy variations reached 1.6%, which is still within an acceptable range. These findings suggest that specific energy variations are more sensitive to the location of guiding structures than their installation angle.

The results confirm that the classical assumption of constant specific energy in spatially varied flow with lateral outflow holds even in converging channels with guiding structures. Although minor deviations were observed, they were within acceptable limits for practical applications.

Conclusions

In this study, by comparing the simulation results with experimental data, it was found that the model used for simulating flow over side weirs possesses high accuracy and reliably predicts the actual performance of these structures. One of the key aspects of this research is the accurate simulation of side weirs in converging channels. Despite numerous studies in this area, especially in recent years, certain aspects of the design and hydraulic behavior of these types of weirs still require more detailed investigation and numerical modeling.

The findings of this study demonstrated that the classical concept of specific energy stability in gradually varied flow with decreasing discharge remains valid even under converging conditions and in the presence of guiding structures. The average difference in specific energy between the upstream and downstream of the weir in all simulations was 1.24%. Additionally, the influence of the Froude number on the increase in specific energy variations was clearly observed. However, within the range of Froude numbers less than 0.5, which is typically dominant in irrigation and drainage channels, specific energy variations did not exceed 3%.

Finally, for future research, it is recommended to investigate the effects of factors such as the crest height of the side weir, the presence of orifices within the weir structure, and the influence of supercritical flow regimes on specific energy variations along side weirs, in order to develop a more comprehensive understanding of their hydraulic behavior.

Acknowledgement

We are grateful to the Research Council of Shahid Chamran University of Ahvaz for financial support (GN: SCU.WH1402.31370).

Keywords: CFD, De Marchi, Spatially varied flow, Water structures



© 2023, The Author(s). Published by [Agricultural Engineering Research Institute](#). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

<https://doi.org/10.22092/ajser.2025.368890.1610>

نوع مقاله: پژوهشی

بررسی پایداری انرژی ویژه در سرریزهای جانبی همگرا در حضور سازه های هدایت کننده

امیررضا شهریار^۱ | مهدی دریانی^۲ | سید محمود کاشفی پور^۳ | محمدرضا زایری^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۸

چکیده

این پژوهش به بررسی تغییرات انرژی ویژه در سرریزهای جانبی واقع در کانالهای همگرا در حضور سازه های هدایت کننده پرداخته است. با استفاده از نرم افزار FLOW-3D، جریان در سرریز جانبی همگرا شبیه سازی شد. سازه های هدایت کننده در سه موقعیت مختلف طولی و با زاویه های ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه نسبت به افق روی تاج سرریز قرار گرفتند. صحت سنجی مدل عددی با داده های آزمایشگاهی نشان داد که خطای شبیه سازی ها کمتر از ۴ درصد است. نتایج به دست آمده نشان داد موقعیت میانی سرریز با کمترین تغییرات انرژی ویژه (۰/۸ درصد)، بهترین محل برای نصب سازه های هدایت کننده است. تأثیر زاویه نصب بر تغییرات انرژی ویژه ناچیز بود و میانگین تغییرات برای زاویه های مختلف بین ۱/۰۳ تا ۱/۲۲ درصد متغیر بود. بررسی تأثیر عدد فرود جریان ورودی نشان داد که در محدوده اعداد فرود کمتر از ۰/۳، تغییرات انرژی ویژه کمتر از ۰/۵ درصد است. با افزایش عدد فرود تا ۰/۴۵، این تغییرات به ۱/۶ درصد می رسد که همچنان در محدوده قابل قبول است. نتایج این تحقیق نشان داد که فرض کلاسیک جریان های متغیر مکانی با خروجی جانبی مبنی بر ثابت بودن انرژی ویژه در طول سرریز، حتی در شرایط همگرایی کانال و حضور سازه های هدایت کننده، همچنان معتبر است.

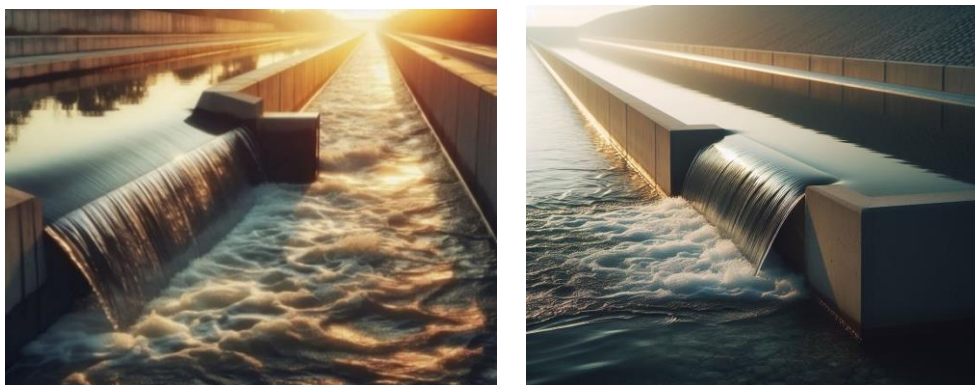
واژه های کلیدی: جریان متغیر مکانی، دی مارچی، دینامیک سیالات محاسباتی، سازه های آبی

مقدمه

سرریزهای جانبی یکی از انواع سازه های هیدرولیکی معمول در کانال های انتقال آب هستند. این سازه در یک سمت کانال اصلی ساخته می شود و تراز تاج آن از تراز برم کانال پایین تر است. هنگامی که تراز آب در کانال اصلی به تراز تاج سرریز جانبی برسد، آب از روی آن عبور می کند و بخشی از جریان کانال اصلی از آن طریق منحرف می شود. این سازه همچنین در شبکه های فاضلاب، تأسیسات نیروگاهی سدها و سیستم های کنترل و پخش سیلاب نیز کاربرد دارد (شکل ۱).

۱ و ۳ و ۴- گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. (*نویسنده مسئول: Email: M.Daryae@scu.ac.ir)

<https://doi.org/10.22092/idsr.2025.368890.1610>



شکل ۱- نمایی از سرریز جانبی (تصاویر با استفاده از ابزار Bing AI Image Creator تولید شده‌اند)

Fig. 1 – View of the side weir (Images generated using Bing AI Image Creator)

می‌دانند و معتقدند که با وجود ساده‌سازی‌های موجود، از دقت کافی برای کاربردهای عملی برخوردار است (Maranzoni *et al.*, 2017; Paris *et al.*, 2012; Subramanya & Awasthy, 1972). از سوی دیگر، برخی دیگر از محققان این فرض را غیرقابل قبول می‌دانند و بر این باورند که تغییرات انرژی ویژه در طول سرریز نباید نادیده گرفته شود، زیرا می‌تواند به نتایج نادرست در تحلیل‌های هیدرولیکی منجر شود (El-Khashab & Smith, 1976; Venutelli, 2008). سیتیرینی (Citrini, 1942) به بررسی جریان‌های کانال جانبی با افزایش عرض کانال در امتداد سرریز جانبی پرداخت. در این مطالعه، یک ترم وابسته به افزایش عرض و عدد فرود به معادله پروفیل سطح آزاد افزوده شده است. نتیجه این پژوهش نشان می‌دهد که افزایش عرض کانال ناحیه تخلیه سرریز اثرهای نامطلوبی بر مشخصات جریان دارد.

در مقابل، بهره‌برداری از سرریز جانبی در کانال همگرا دارای مزایای قابل توجهی است که تعدادی از آن‌ها در اینجا بیان می‌شود. کانال همگرا با هدایت جریان به سمت سرریز باعث افزایش عمق آب و در نتیجه افزایش ظرفیت عبوری سرریز جانبی می‌شود (Maranzoni *et al.*, 2017). با استفاده از سرریز همگرا، برای دستیابی به ظرفیت تخلیه مشخص، نیازی به سرریز طولانی نیست. این امر باعث صرفه‌جویی در فضا و هزینه می‌شود همچنین با کاهش ابعاد و عرض کانال

جریان عبوری از روی این سازه به دلیل آنکه دبی پیوسته در حال تغییر است و همچنین باتوجه به کاهش دبی کانال اصلی در طول سرریز جانبی، در دسته‌بندی جریان متغیر مکانی با کاهش دبی قرار می‌گیرد. این طیف جریان در دسته‌بندی ماندگار ($\frac{dQ}{dt} = 0$) و غیریکنواخت ($\frac{dQ}{dx} \neq 0$) تعریف می‌گردد. دی مارچی (De Marchi, 1934) با در نظر گرفتن فرضیات ساده‌سازی شده، اولین محقق بود که معادله پویای حاکم بر جریان‌های متغیر مکانی با کاهش دبی را برای سرریزهای جانبی حل کرد (معادله ۱). در این معادله φ_m تابع جریان متغیر دی‌مارچی، x فاصله از ابتدای سرریز در جهت جریان، K ثابت انتگرال، C_s ضریب دبی تخلیه شده توسط سرریز، B عرض کانال، W ارتفاع تاج سرریز از کف کانال است.

$$\frac{x C_s}{B} = \varphi_m + K \quad (1\text{-الف})$$

$$\varphi_m = \frac{2E - 3W}{E - W} \sqrt{\frac{E - y}{y - W}} - 3 \sin^{-1} \sqrt{\frac{E - y}{E - W}} \quad (1\text{-ب})$$

مهم‌ترین فرض این معادله ثابت بودن انرژی ویژه (E) در طول جریان در کانال اصلی است. رابطه انرژی (Bernoulli, 1738) به‌عنوان رابطه مبنا به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$E = y + \frac{\alpha Q^2}{2gA^2} \quad (2)$$

با این حال، نظر محققان در مورد فرض دی مارچی متفاوت است. برخی از محققان این فرض را قابل قبول

استفاده از صفحات و سازه‌های هدایت کننده، که یکی از روش‌های کارآمد است، موجب افزایش راندمان تخلیه در سرریزهای جانبی می‌شود (Abbasi et al., 2021; Abdollahi et al., 2017). مطالعات اخیر نشان داده است که نصب سازه‌های هدایت کننده در تراز تاج سرریزهای جانبی می‌تواند به شکلی چشمگیر ظرفیت تخلیه جریان را افزایش دهد (Neysi et al., 2025; Shahriari et al., 2024). استفاده از مدل‌های عددی برای شبیه‌سازی جریان در سرریزهای جانبی در پژوهش‌های متعددی مورد توجه قرار گرفته است (Bagheri Seyyed Shekari et al., 2018; Ghaderi et al., 2019; Kalateh & Aminvash, 2023).

با توجه به این یافته‌ها، هدف اصلی این پژوهش بررسی رفتار انرژی ویژه در طول سرریزهای جانبی همگرا با در نظر گرفتن تأثیر سازه‌های هدایت کننده است. اهمیت این موضوع در آن است که ارزیابی دقیق فرضیه دی‌مارچی، مبنی بر ثابت ماندن انرژی ویژه تحت شرایط هندسی مشخص، می‌تواند نقش مهمی در ارتقای دقت طراحی و بهبود فهم هیدرولیکی سرریزهای جانبی داشته باشد. از این رو، با بهره‌گیری از نرم‌افزار FLOW-3D پارامترهای هیدرولیکی جریان شامل سرعت و عمق در نقاط مختلف محدوده سرریز تحلیل گردید که به کمک آن می‌توان انرژی ویژه را محاسبه کرد. در بخش پایانی مقاله، دیدگاه‌ها و نتایج تحقیقات مختلف در باره فرضیه کلاسیک پایداری انرژی در سرریزهای جانبی مرور و جمع‌بندی شده است.

مواد و روش‌ها

نرم‌افزار FLOW-3D یکی از پیشرفته‌ترین ابزارهای شبیه‌سازی دینامیک سیالات (CFD)¹ است که برای تحلیل جریان سیالات استفاده می‌شود. مدل FLOW-3D از روش حجم محدود² برای شبیه‌سازی جریان استفاده می‌کند. روش حجم محدود (VOF) روشی است عددی که برای تعیین موقعیت سطح جداکننده بین دو مایع مختلف (مانند

در پایین دست سرریز می‌توان در هزینه‌های ساخت کانال به میزان قابل توجهی صرفه‌جویی کرد (Ghorbannia & Eghbalzadeh, 2018). در مواردی که کف کانال جانبی بالاتر از کف کانال اصلی است، همگرایی کانال اصلی موجب پس‌زدگی آب می‌شود. سطح آب روی تاج بالا می‌آید و منجر به سهولت ورود جریان به کانال جانبی می‌شود (Saffar et al., 2022). تنگ‌شدگی در پایین دست به عنوان مانع عمل می‌کند و منجر به افزایش عمق آب روی تاج سرریز و در نتیجه افزایش دبی عبوری از روی آن می‌شود (Alahdadi & Shafai-Bajestan, 2020). مزایای ذکر شده در مورد بهره‌برداری از سرریز جانبی در کانال همگرا، نتیجه مطالعات گسترده و تحقیقات آزمایشگاهی و عددی متعددی است که محققان دیگر نیز بررسی و بیان کرده‌اند (Borghei & Parvaneh, 2011; Maranzoni & Tomirotti, 2021; Parsi et al., 2021; Saffar et al., 2023). یکی از مزایای عملی استفاده از سرریزهای جانبی در کانال‌های همگرا این است که با کاهش عرض کانال، در یک دبی تخلیه ثابت، سرعت جریان آب در پایین دست سرریز افزایش می‌یابد. این افزایش سرعت می‌تواند جابه‌جایی ذرات رسوبی را تسهیل و از تجمع رسوبات در پایین دست کانال اصلی جلوگیری کند. به این ترتیب، ظرفیت انتقال رسوب کانال اصلی تا حد مطلوبی حفظ می‌شود که این امر نیاز به لایروبی مکرر را کاهش می‌دهد و به صرفه‌جویی در هزینه‌ها و زمان می‌انجامد. با تأکید بر مزایای این سازه‌ها، شبیه‌سازی عددی آنها نقش کلیدی در تسهیل طراحی و اجرای آنها برای مهندسان دارد. همان‌طور که مطرح شد، استفاده از سرریزهای جانبی با هندسه‌ای که به همگرایی میل می‌کند، دارای توجیه اقتصادی و هیدرولیکی است. با توجه به تغییرات اقلیمی و افزایش دبی سیلاب‌ها، ضروری است ساختار سرریزها تغییر یابند تا تخلیه منظم و ایمن تضمین شود (Idrees & Al-, 2023).

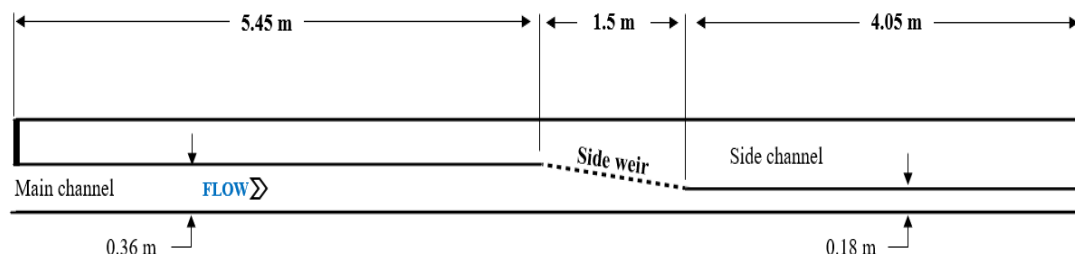
² Volume of Fluid - VOF

¹ Computational fluid dynamics

متر و ارتفاع ۰/۴ متر اجرا گردید. این فلوم با یک دیوار میانی به دو قسمت کانال اصلی و جانبی تقسیم شد. یک محدوده همگرا در فاصله ۵/۴۵ متر از ورودی ایجاد شد. عرض کانال اصلی در بالادست و پایین دست آن به ترتیب معادل ۳۶ و ۱۸ سانتی متر در نظر گرفته شد. طول قسمت همگرا ۱/۵ متر و یک سرریز جانبی با ارتفاع ۱۸/۳ سانتی متر در این محدوده نصب شد (شکل ۲). ضخامت تاج معادل ۵/۵ سانتی متر بود.

آب و هوا) به کار می رود (Hirt & Nichols, 1981). این نرم افزار حرکت جریان را با حل معادلات RANS (میانگین رینولدز ناویر استوکس) توصیف می کند که در مقالات متعددی این معادلات تشریح شده اند (Daryaei et al., 2025; Ahadiyan et al., 2016).

در این پژوهش، داده های آزمایشگاهی ارائه شده توسط مارانزونی و همکاران (Maranzoni et al., 2017) به منظور ارزیابی و اعتبارسنجی مدل عددی استفاده شد. در مطالعه مذکور، آزمایش ها در یک فلوم با طول ۱۱ متر، عرض ۰/۷



شکل ۲- پلان کلی فلوم آزمایشگاهی (Maranzoni et al., 2017)

Fig. 2 – General plan of the experimental flume by Maranzoni et al. (2017)

حل مدل آشفتگی RNG به صورت زیر هستند:

در مقاله حاضر مدل تلاطم RNG به منظور کالیبراسیون و صحت سنجی مدل عددی بررسی شد. معادله حاکم برای

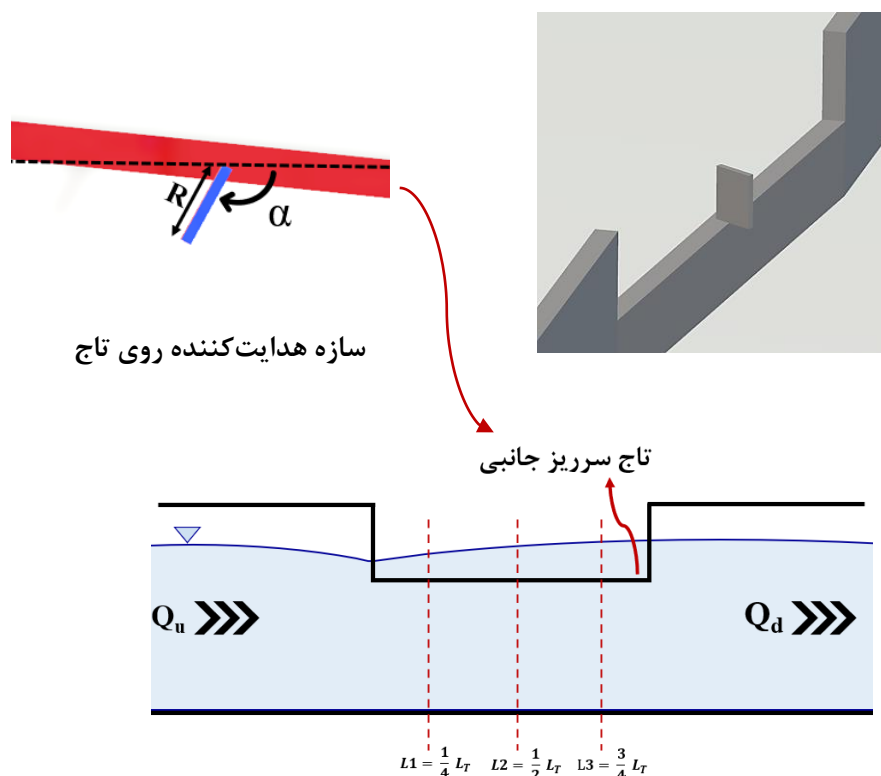
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho K) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho K U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_K} \right) \frac{\partial K}{\partial x_j} \right] + P_K - \rho \varepsilon \quad (3-الف)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{K} P_K - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{K} \quad (3-ب)$$

در این پژوهش، با استفاده از مدل عددی FLOW-3D، تأثیر سازه های هدایت کننده بر ثبات انرژی ویژه در تاج سرریزهای جانبی همگرا بررسی شده است. هندسه سرریزهای مورد استفاده کاملاً مطابق با هندسه ارائه شده در مطالعات مارانزونی و همکاران (Maranzoni et al., 2017) تعریف شده است. در این شبیه سازی ها، یک سازه هدایت کننده روی تاج سرریز در سه موقعیت مختلف L1، L2 و L3 قرار داده شد (شکل ۳). هریک از این موقعیت ها نسبتی از طول کل سرریز ($L_T=1.51$ m) است.

در معادلات فوق انرژی جنبشی تلاطمی (TKE)، ε شدت اتلاف انرژی، ρ دانسیته، t زمان، X_i مختصات در راستای محور i ، μ ویسکوزیته دینامیکی، μ_t ویسکوزیته دینامیکی متلاطم، و P_K معادله انتقال انرژی جنبشی تلاطمی است. پارامترهای $C_{1\varepsilon}$ ، $C_{2\varepsilon}$ ، σ_K ، σ_ε مقادیری ثابت و به ترتیب برابرند با ۰/۷۱۹۴، ۰/۷۱۹۴، ۱/۶۸ و ۱/۴۲ (Yakhov et al., 1992). پارامتر μ_t بر اساس معادله (۴) تعیین می شود. در این معادله پارامتر C_μ ثابت و معادل ۰/۰۸۴۵ است.

$$\mu_t = C_\mu \frac{K^2}{\varepsilon} \quad (4)$$



شکل ۳- نمای از سرریز جانبی همگرا و سازه هدایت کننده روی تاج و پارامترهای آن

Fig. 3 – View of the converging side weir and the guiding structure on the crest along with its parameters

طول این سازه هدایت کننده (R) برابر با ۲۰ درصد عرض کانال بالادست (۷/۲ سانتی متر) انتخاب شد. طول سازه بی بعد انتخاب شد تا قابل تعمیم برای دیگر پژوهش‌ها باشد. سه زاویه نصب ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه نسبت به افق برای سازه در نظر گرفته شد. ارتفاع سازه هدایت کننده به گونه‌ای تعیین شد که جریان عبوری از روی آن در حالت مستغرق نباشد. هدف از این جانمایی‌ها بررسی تأثیر موقعیت و زاویه نصب سازه هدایت کننده بر تغییرات انرژی ویژه در کانال اصلی بود. برای تمامی شبیه‌سازی‌ها در ابتدا دبی ثابت $Q_u = 45 \text{ Lit/s}$ به کار گرفته شد. برای ارزیابی تأثیر تغییر عدد فروود جریان ورودی (Fr_u)، حالتی که سازه هدایت کننده در زاویه ۱۲۰ درجه و موقعیت L2 قرار دارد، به عنوان حالتی انتخاب شد که بیشترین دبی انحرافی را ایجاد می‌کند. پس

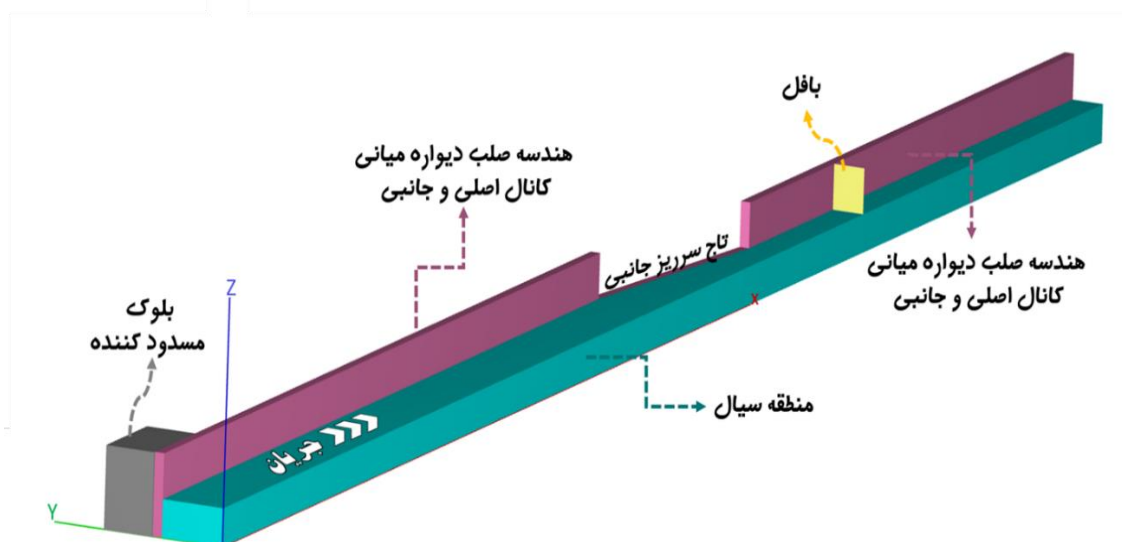
از آن دبی‌های ورودی مختلف ۴۰، ۴۵، ۵۰، ۵۵ و ۶۰ لیتر بر ثانیه نیز بررسی شدند. این سناریوها به منظور درک بهتر نقش سازه‌های هدایت کننده در تغییرات انرژی ویژه در شرایط همگرایی سرریزهای جانبی تعریف شدند. در شبیه‌سازی‌ها، آب به عنوان سیال مورد استفاده با دانسیته 1000 kg/m^3 و ویسکوزیته دینامیکی 0.001 kg/m.s در نظر گرفته شد. این فرضیات معمول برای شبیه‌سازی جریان‌های آبی در شرایط معمولی دما و فشار است و به دقت شبیه‌سازی کمک می‌کند. از آنجا که دانسیته آب در شرایط عادی تقریباً ثابت است، از مدل سیال تراکم‌ناپذیر^۱ در شبیه‌سازی‌ها استفاده شد. تنظیمات مربوط به ردیابی سطح آب به صورت سطح آزاد^۲ در نظر گرفته شد. این تنظیم به نرم‌افزار اجازه می‌دهد تا سطح آزاد بین آب‌وهوا را با دقت

² Free surface or sharp interface

¹ Incompressible

در پایین دست کانال اصلی یک بافل^۲ قرار داده شد تا میزان دبی انحرافی قابل سنجش باشد. این بافل یک متر پس از سرریز جانبی در کانال اصلی قرار داده شد. ارتفاع این بافل برابر با ارتفاع دیواره فلوم در نظر گرفته شد. به منظور جلوگیری از ورود جریان به کانال جانبی قبل از سرریز، از یک بلوک مسدودکننده نیز در ابتدای کانال جانبی استفاده شد. جزئیات ذکر شده به خوبی در شکل (۴) نمایش داده شده اند.

بیشتری مدل سازی و تغییرات سطحی را به درستی تحلیل کند. در فیزیک شبیه سازی نیروی ثقل و مدل آشفته گی اعمال شدند. به منظور کاهش زمان شبیه سازی و بهینه سازی شرایط مدل سازی در کانال اصلی تا ارتفاع تاج سرریز، یک منطقه سیال^۱ با شرایط هیدرواستاتیک تعریف شد. سیال به گونه ای قرار داده شد که تنها در کانال اصلی و پایین تر از تراز تخلیه سرریز قرار گیرد تا در دبی خروجی تأثیری نداشته باشد و در کاهش زمان شبیه سازی مؤثر باشد. علاوه بر این،



شکل ۴- نمایی از هندسه، منطقه سیال و بافل تعریف شده برای مدل عددی

Fig. 4 – View of the geometry, fluid domain, and the defined baffle used in the numerical model

هندسه سازه به دلیل زاویه دار بودن به خوبی شناسایی شود. در مجموع، ۱/۵ میلیون مش برای کل هندسه تولید شد. تعداد نهایی مش بر اساس آزمون استقلال مش تعیین شد (شکل ۵). مفهوم نبود وابستگی به مش یا استقلال مش به حالتی اشاره دارد که نتایج شبیه سازی دیگر به ابعاد و تعداد سلول های شبکه وابسته نباشند. نتایج درصد خطای داده های مدل عددی نسبت به داده های آزمایشگاهی (Maranzoni et al., 2017) نشان می دهد که از مش ۱/۵ میلیون سلولی به بعد، وابستگی نتایج به ابعاد مش ناچیز است و می توان این تعداد مش را به عنوان حالت بهینه برای

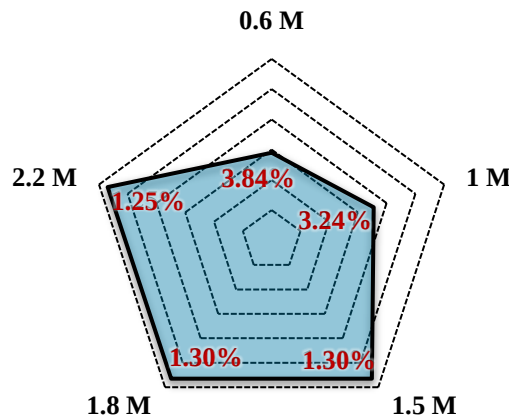
برای شبکه بندی مدل از مش های مربعی استفاده شد. به منظور مش بندی، هندسه مدل به چهار مش بلاک تقسیم شد. با توجه به اهمیت بالای محدوده سرریز جانبی در شبیه سازی، مش بلاک دوم در محدوده سرریز با ۹۵۰ هزار مش تعریف شده است. این تعداد به منظور افزایش دقت محاسباتی و ارائه نتایج دقیق تر در این ناحیه در نظر گرفته شد. مش بلاک اول با ۲۵۰ هزار و مش بلاک سوم با ۲۰۰ هزار مش به ترتیب در بالادست و پایین دست سرریز قرار گرفته اند. مش بلاک چهارم با ۱۰۰ هزار مش، درون مش بلاک دوم و در اطراف سازه هدایت کننده تعریف گردید تا

² Baffle

¹ Fluid region

ادامه شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفت. در این پژوهش، برای مقایسه داده‌های آزمایشگاهی و مدل عددی از شاخص آماری درصد خطا^۱ استفاده شد. در شبیه‌سازی نتایج

$$\%Error = \frac{|D_{EXP} - D_{NUM}|}{D_{EXP}} \times 100 \quad (5)$$



شکل ۵- بررسی وابستگی نتایج به تعداد سلول مش براساس درصد خطای عمق آب در پایین دست سرریز جانبی نسبت به نتایج آزمایشگاهی (Maranzoni et al. 2017)

Fig. 5 – Mesh sensitivity analysis based on the percentage error of downstream water depth compared to the experimental results (Maranzoni et al., 2017)

برای ورودی کانال که در اولین بلوک مدل قرار دارد، دبی ثابت و معینی^۲ در نظر گرفته شد. دیواره‌های جانبی و بستر کانال به عنوان مرزهای صلب^۳ مدلسازی شده‌اند تا تحرک پذیری دیواره‌ها را محدود کنند، درحالی که دیگر مرزهای مدل به صورت متقارن^۴ در نظر گرفته شده‌اند تا اثرهای نامحدود بودن فضا را شبیه‌سازی کنند. سرانجام،

جدول ۱- شرایط مرزی میدان حل

Table 1 – Boundary conditions of the solution domain

Mesh No.	X min	X max	Y min	Y max	Z min	Z max
۱	دبی ورودی	متقارن	دیواره	دیواره	دیواره	متقارن
۲	متقارن	متقارن	دیواره	دیواره	دیواره	متقارن
۳	متقارن	خروجی	دیواره	دیواره	دیواره	متقارن
۴	متقارن	متقارن	متقارن	متقارن	متقارن	متقارن

⁴ Symmetric

⁵ Outflow

¹ Error

² Volume flow rate

³ Wall

نتایج و بحث

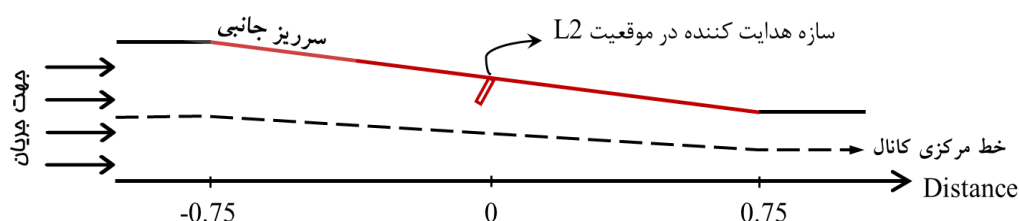
(2017) به عنوان مبنای مقایسه انتخاب شد. پروفیل جریان در

خط مرکزی کانال که در شکل (۶) نمایش داده شده است،

صحت سنجی مدل عددی

به منظور بررسی صحت و دقت مدل عددی مورداستفاده

در این تحقیق، نتایج آزمایشگاهی (Maranzoni et al.,



شکل ۶- نمایش مقطع برداشت پروفیل طولی جریان

Fig. 6 – Illustration of the cross-section used for extracting the longitudinal flow profile

مقادیر عددی و آزمایشگاهی در جدول (۲) ارائه شده اند. در بازه های پایین دست نشان می دهد که مدل عددی با فاصله

مقایسه نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی خطای کمتر از ۴ گرفتن از نقطه شروع جریان، عملکرد باثبات تری در تخمین

درصد را نشان می دهد که این امر نشان دهنده تطابق و دقت عمق جریان از خود نشان می دهد.

بالای شبیه سازی عددی است. علاوه بر این، روند کاهش خطا

جدول ۲- مقایسه عمق آب آزمایشگاهی و مدل عددی در خط مرکزی کانال اصلی

Table 2 – Comparison of experimental and numerical water depths along the centerline of the main channel

Distance	Water Depth (cm)		Error (%)
	Maranzoni et al., (2017)	FLOW-3D Model	
-0.75	21.44	20.73	3.31
-0.60	21.44	20.73	3.31
-0.45	21.44	20.68	3.54
-0.30	21.46	20.75	3.31
-0.15	21.49	20.80	3.21
0.00	21.54	20.82	3.34
0.15	21.56	20.82	3.43
0.30	21.62	20.88	3.42
0.45	21.64	21.08	2.58
0.60	21.61	21.33	1.30
0.75	21.67	21.38	1.34

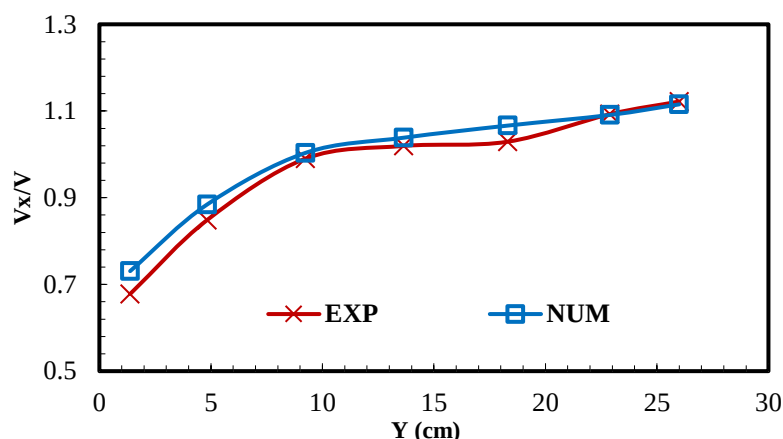
در راستای صحت سنجی مدل عددی و بررسی دقت آن سرریز جانبی در ارتفاع ۲۰ سانتی متری از کف کانال

در شبیه سازی رفتار هیدرولیکی جریان در مجاورت سرریز استخراج گردید و با داده های آزمایشگاهی (Maranzoni et

al., 2017) مقایسه شد (شکل ۷). مطابق شکل، تطابق قابل

قبولی بین نتایج مدل عددی و داده های تجربی مشاهده

سرعت عددی و آزمایشگاهی. به این منظور، نسبت بی بعد سرعت طولی به سرعت متوسط عمقی ($\frac{V_x}{V}$) در مقطع میانی



شکل ۷- مقایسه داده های آزمایشگاهی نسبت بدون بعد سرعت با نتایج شبیه سازی شده توسط مدل عددی
Fig. 7 – Comparison of experimental and numerical model results for the dimensionless velocity ratio

عمق آب روی تاج سرریز جانبی

بر اساس توصیه نوواک و همکاران (Novak *et al.*, 2018)، عمق آب روی تاج سرریز باید بیشتر از ۳ سانتی متر باشد تا بتوان اثر کشش سطحی را نادیده گرفت. کشش سطحی پدیده‌ای ناشی از نیروهای بین مولکولی در سطح مایعات است و باعث ایجاد تنش در سطح سیال می‌شود (Spurk & Aksel, 2019). در پژوهش حاضر، برای حصول اطمینان بیشتر و حذف کامل اثرهای کشش سطحی، شرایط اجرای مدل به نحوی در نظر گرفته شد تا عمق آب روی تاج بیش از ۴ سانتی متر باشد. برای دستیابی به این هدف، مدل با دبی‌های مختلفی از ۲۵ تا ۶۰ لیتر بر ثانیه اجرا و عمق آب روی تاج سرریز برای هر دبی اندازه‌گیری شد. نتایج در شکل (۸) ارائه شده است. مشاهده می‌شود که از دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه به بعد، عمق آب روی تاج سرریز از ۴ سانتی متر بیشتر است.

تغییرات انرژی ویژه در طول سرریز

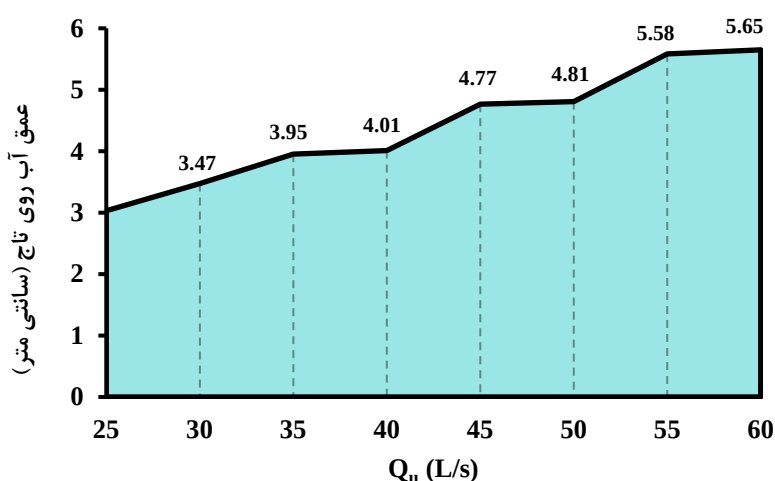
به منظور صحت‌سنجی این فرض، داده‌های مربوط به انرژی ویژه جریان در نقاط مختلف سرریز برای همه آزمایش‌ها جمع‌آوری گردید. میانگین اختلاف انرژی ویژه بین بالادست و پایین‌دست سرریز (ΔE %) مطابق رابطه زیر محاسبه گردید.

$$\% \Delta E = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \times 100 \quad (6)$$

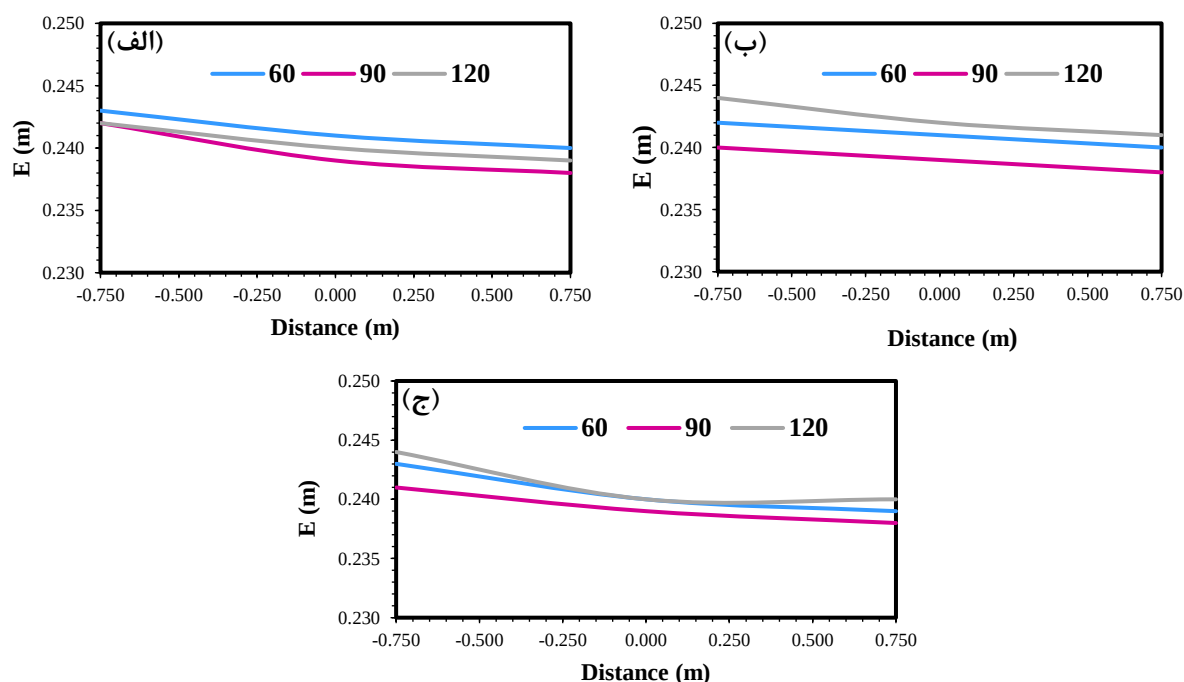
مطابق شکل (۷)، علاوه بر تطابق مناسب در شبیه‌سازی عمق آب، نتایج مدل عددی در بازتولید پروفیل‌های سرعت نیز هماهنگی قابل قبولی با داده‌های تجربی نشان می‌دهد که این امر دقت مدل را در شبیه‌سازی رفتار هیدرولیکی جریان تأیید می‌کند. در این پژوهش، از مدل آشفتگی RNG برای شبیه‌سازی جریان در کانال‌های همگرا با سرریز جانبی استفاده شد. انتخاب این مدل بر اساس بررسی‌ها در مطالعات پیشین بوده است. برای مثال، تحقیقات مشابهی که توسط صفار و همکاران (Saffar *et al.*, 2024) و نیسی و همکاران (Neysi *et al.*, 2025) صورت گرفته نشان داده‌اند که مدل RNG در پیش‌بینی رفتار جریان‌های آشفته در سرریزهای جانبی همگرا عملکرد بسیار مناسبی دارد و نتایجی با دقت بالا ارائه می‌دهد. بر اساس این شواهد، در این مطالعه از بررسی دیگر مدل‌های آشفتگی صرف‌نظر شد و تمرکز روی مدل RNG شد. تحقیقات متعدد دیگر (Azimi *et al.*, 2018; Bagherifar *et al.*, 2019; Hussein & Jalil, 2024) نیز کارایی این مدل را برای شبیه‌سازی سرریزهای جانبی تأیید کرده‌اند. لازم است گفته شود محدود کردن بررسی‌ها به این مدل آشفتگی، به منظور کاهش پیچیدگی‌های محاسباتی است. نتایج حاصل از این پژوهش نیز تأییدکننده عملکرد قابل قبول این مدل در شبیه‌سازی هیدرولیک جریان‌های آشفته است.

در این رابطه: E_1 انرژی ویژه بالادست و E_2 انرژی ویژه پایین دست سرریز در کانال اصلی است. برای همه شبیه سازی های این تحقیق میانگین اختلاف انرژی بین بالادست و پایین دست کمتر از ۱/۵ درصد بوده است.

برای بررسی دقیق تر، شبیه سازی هایی در حضور سازه هدایت کننده در سه موقعیت و سه زاویه نصب به اجرا درآمد. با استفاده از مدل FLOW-3D انرژی ویژه جریان در طول سرریز برداشت شد (شکل ۹). همه این شبیه سازی ها در دبی ورودی ثابت ۴۵ لیتر بر ثانیه بوده است.



شکل ۸- بررسی عمق آب روی تاج سرریز جانبی در دبی های ورودی مختلف
Fig. 8 – Analysis of water depth over the side weir crest at different inlet discharges



شکل ۹- تغییرات انرژی ویژه در طول سرریز جانبی در حضور سازه هدایت کننده در سه زاویه و سه موقعیت: (الف) L1، (ب) L2، (ج) L3
Fig. 9 – Variations of specific energy along the side weir in the presence of the guiding structure at three angles and three positions: (a) L1, (b) L2, (c) L3

نظر گرفته می‌شود اما این موضوع نشان می‌دهد موقعیت L2 (وسط سرریز جانبی)، بهترین موقعیت برای نصب سازه‌های هدایت کننده جریان است از این نظر که کمترین تاثیر را بر انرژی ویژه جریان دارد. در شکل (۱۰)، نمایی از جت خروجی از سرریز جانبی در حضور سازه هدایت کننده در زاویه ۱۲۰ درجه و در وسط سرریز جانبی نشان داده شده است.

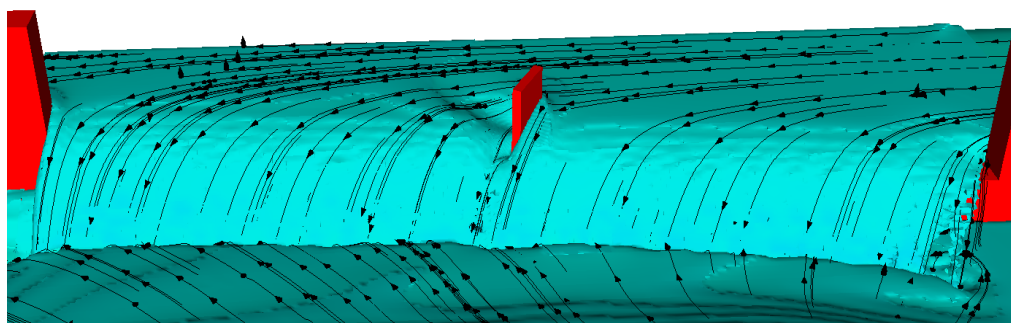
از نظر زاویه نصب سازه هدایت کننده، تاثیر آن بر اختلاط جریان و تغییرات در انرژی ویژه در مقایسه با دیگر عوامل تاثیرگذار بسیار کم است. میانگین تغییرات انرژی ویژه برای زاویه ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ به ترتیب معادل ۱/۰۳، ۱/۰۴ و ۱/۲۲ درصد است. این مقادیر نشان‌دهنده تفاوت‌های اندک در اختلاف انرژی ویژه در طول سرریز جانبی با تغییر زاویه نصب سازه هدایت کننده است.

شبیه‌سازی‌ها در مراحل ابتدایی تحقیق برای بررسی عمق آب روی تاج، از نظر انرژی ویژه در مقابل عدد فرود تحلیل شدند.

($Fr_u = 0.22, 0.26, 0.30, 0.34, 0.36, 0.40, 0.42, 0.45$)

در تمامی حالات، روند تغییرات انرژی ویژه در طول سرریز جانبی کاهشی است. این کاهش عمدتاً ناشی از افت تدریجی دبی در طول سرریز به دلیل انحراف جریان به خارج از کانال اصلی است. با افزایش طول سرریز و کاهش پیوسته دبی عبوری، انرژی ویژه نیز کاهش می‌یابد. این روند با شرایط فیزیکی جریان در سرریزهای جانبی سازگار است و نشان‌دهنده رفتار طبیعی این نوع سازه‌ها در انتقال تدریجی جریان به خارج از کانال اصلی است. تغییر زاویه نصب سازه هدایت کننده منجر به ایجاد افت‌های موضعی در جریان می‌شود، اما تاثیر این تغییر زاویه بر انرژی ویژه در بالادست و پایین‌دست سرریز معنادار نیست.

به‌طور کلی، برای همه حالات نصب سازه هدایت کننده تاثیر تغییر زاویه بر انرژی ویژه ناچیز است. به‌ویژه هنگامی که سازه در موقعیت L2 قرار دارد تغییرات انرژی ویژه در طول سرریز به کمتر از ۰/۸ درصد می‌رسد. اما در موقعیت L1 و L3 تاثیر کمتری بر کاهش انرژی ویژه می‌گذارد. میانگین تغییرات انرژی ویژه برای این موقعیت‌ها به ترتیب ۱/۱۷ و ۱/۳۷ درصد است. هرچند همه این تغییرات قابل قبول در

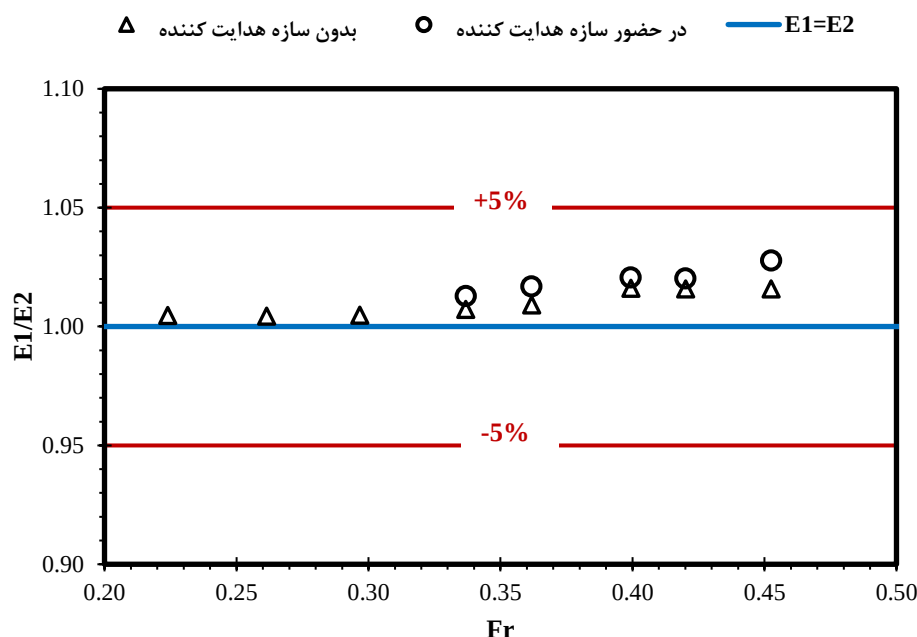


شکل ۱۰- نمایی از جت خروجی سرریز در حضور سازه هدایت کننده در زاویه نصب ۱۲۰ و موقعیت L2

Fig. 10 – View of the side weir outflow jet in the presence of the guiding structure installed at a 120° angle and position L2

شد (شکل ۱۱). لازم است یادآوری شود یکی از دلایل محدود شدن ارزیابی‌ها به این حالت خاص، محدودیت در تعداد شبیه‌سازی‌های قابل اجرا بود، زیرا بررسی تمامی حالات جایگذاری و زاویه‌های نصب سازه هدایت کننده در دبی‌های مختلف نیازمند شبیه‌سازی‌های بسیار زیادی بود.

علاوه بر این، حالتی که سازه هدایت کننده در موقعیت L2 و زاویه ۱۲۰ درجه قرار داشت، که از نظر عملکرد تخلیه بهترین حالت مطابق با پژوهش شهریاری و همکاران (Shahriari et al., 2024) شناخته شده است، در دبی‌های ورودی ۴۰، ۴۵، ۵۰، ۵۵ و ۶۰ لیتر بر ثانیه با عدد فرود معادل به ترتیب ۰/۳۴، ۰/۳۶، ۰/۴۰، ۰/۴۲ و ۰/۴۵ بررسی



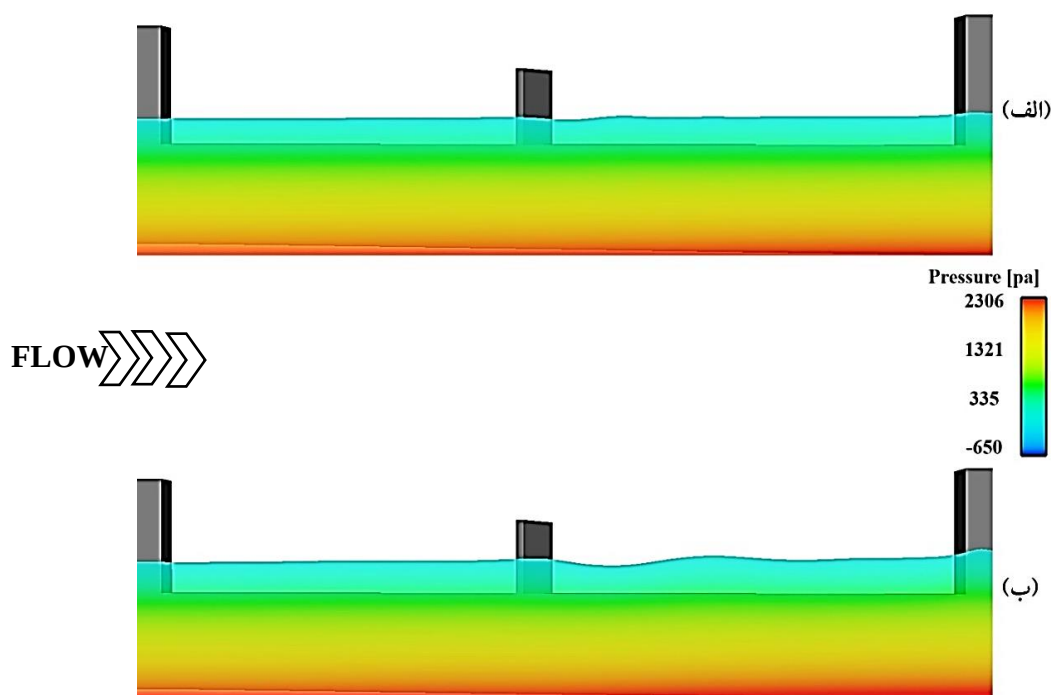
شکل ۱۱- بررسی اثر افزایش عدد فرود بالادست بر تغییرات انرژی ویژه در طول کانال اصلی

Fig. 11 – Analysis of the effect of increasing upstream Froude number on specific energy variations along the main channel

تقریباً بر هم منطبق هستند اما در عدد فرود ۰/۴۵ این تغییر کمی مشهود است. شکل (۱۲)، روند تغییرات سطح آب و توزیع فشار را در خط مرکزی کانال اصلی برای دبی ورودی ۴۰ و ۶۰ لیتر بر ثانیه (عدد فرود های ۰/۳۴ و ۰/۴۵) با حضور سازه هدایت کننده نشان می دهد. پروفیل طولی عمق جریان در عدد فرود کمتر یکنواخت تر و همگن تر است.

در محدوده پس از سازه هدایت کننده در عدد فرود بیشتر، به ویژه، تلاطم و تغییرات سطحی جریان مشهود است. علاوه بر این، در دبی های بالا افت های موضعی ناشی از برخورد جریان با سطوح مختلف سرریز و سازه هدایت کننده افزایش می یابد. از سوی دیگر، توزیع فشار نیز دستخوش تغییر شده است. در حالت با عدد فرود پایین تر (شکل الف)، فشار در ناحیه زیرین جریان یکنواخت تر است و مقادیر بالاتری دارد. در مقابل، در عدد فرود بالاتر (شکل ب)، نوسان های فشار در طول کانال بیشتر و دامنه تغییرات آن نیز گسترده تر است. این موضوع به افزایش سرعت جریان و در نتیجه افزایش گرادیان فشار در کانال مرتبط است.

با توجه به شکل (۱۱)، مقدار تغییرات انرژی ویژه در طول سرریز با افزایش عدد فرود به طور معناداری افزایش می یابد. در شرایط همگرایی کانال در اعداد فرود بالادست کمتر از ۰/۳ تغییرات انرژی ویژه بسیار ناچیز است و مقدار آن از ۰/۵ درصد کمتر است. با افزایش عدد فرود تغییرات انرژی ویژه بیشتر می شود و در فرود ۰/۴۵ به ۱/۶ درصد می رسد. باید گفت به لحاظ اجرایی به ندرت محدوده عدد فرود در کانال های آبیاری و زهکشی از ۰/۵ بیشتر می شود. این موضوع نشان می دهد در بهره برداری از سرریز جانبی در کانال همگرا شرط کلاسیک جریان متغیر مکانی با دبی کاهشی مبنی بر ثبات انرژی در طول سرریز حتی در حضور سازه های هدایت کننده برقرار است. حضور سازه های هدایت کننده منجر به افزایش تغییرات انرژی شده است و افزایش عدد فرود این تاثیر را افزایش می دهد اما در بیشترین عدد فرود بررسی شده هم میزان کاهش انرژی ویژه به ۳ درصد نمی رسد. اختلاف بین تغییرات انرژی در حالت حضور و بدون حضور سازه تا عدد فرود ۰/۴۲ معنی دار نیست و



شکل ۱۲- پروفیل طولی آب در خط مرکزی کانال اصلی برای عدد فرود ورودی: (الف) ۰/۳۴ و (ب) ۰/۴۵

Fig. 12 – Analysis of the effect of increasing upstream Froude number on specific energy variations along the main channel

نتایج پژوهش‌های دیگر محققان

می‌گویند فرض ثابت بودن انرژی، که معمولاً در مدل‌سازی جریان‌های سرریز جانبی به کار گرفته می‌شود، برای جریان‌های سرریز جانبی در کانال‌های همگرا نیز قابل قبول است، به‌ویژه برای مقادیر کمتر عدد فرود ($Fr_0 < 0.35$) میانگین اختلاف نسبی مطلق مشاهده‌شده بین انرژی مخصوص بالادست و پایین‌دست سرریز جانبی ۰/۵ درصد است. قدسیان (Ghodsian, 2004) میانگین اختلاف انرژی ویژه بین بالادست و پایین‌دست سرریز جانبی لبه‌تیز مثلثی را برای زاویه‌های رأس ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه به ترتیب ۰/۵۹، ۰/۵۵، ۰/۷۲ و ۰/۹۴ درصد گزارش کرد. نتایج تحقیقات اخیر نشان می‌دهد فرض پایداری انرژی حتی در شرایط بسترهای غیرصلب و پیکره‌های شیب‌دار نیز دارای اعتبار است و تغییرات انرژی ویژه در شرایط گفته شده کمتر از ۵ درصد اندازه گیری شده است (Bacco & Scorzini, 2020). علاوه بر این، راه حل‌های تحلیلی دیگری بر اساس

محققانی که فرض پایداری انرژی یا به عبارتی ناچیز بودن کاهش انرژی ویژه را رد کردند اغلب برای جریان‌های فوق‌بحرانی آن را غیرقابل قبول در نظر گرفته‌اند. از جمله پژوهش‌هایی که به این مورد اشاره کرده‌اند می‌توان به Venutelli (2008) و Balmforth & Sarginson (1983) اشاره کرد. این محققان و نیز برخی دیگر، برای جریان‌های فوق‌بحرانی یا جریان‌هایی که نمی‌توان فرض پایداری انرژی را درباره آن‌ها پذیرفت، استفاده از رابطه مومنتم را دقیق‌تر می‌دانند (Hager, 1987; Robinson & McGhee, 1993). گرچه برخی محققان، به‌ویژه در جریان‌های فوق‌بحرانی، استفاده از معادله مومنتم را ترجیح داده‌اند، اما شواهد عددی و آزمایشگاهی تحقیقات دیگر نشان می‌دهد که فرض پایداری انرژی تحت شرایط جریان زیربحرانی همچنان معتبر است. مارانزونی و همکاران (Maranzoni et al., 2017)

پژوهش نشان داد که ایده کلاسیک ثبات انرژی ویژه جریان متغیر مکانی با کاهش دبی، حتی در شرایط همگرایی و حضور سازه های هدایت کننده، همچنان قابل قبول است. میانگین اختلاف انرژی ویژه بین سرآب و پایاب سرریز در تمام شبیه سازی ها برابر با ۱/۲۴ درصد بود. نصب سازه هدایت کننده در موقعیت میانی سرریز جانبی، کمترین میزان استهلاک انرژی را به همراه داشت. اثر زاویه نصب سازه ها بر تغییرات انرژی ویژه معنادار نیست.

علاوه بر این، تأثیر عدد فرود بالادست در افزایش تغییرات انرژی ویژه به وضوح مشاهده شد، اما در محدوده عدد فرود کمتر از ۰/۵ که معمولاً در کانال های آبیاری و زهکشی حاکم است، تغییرات انرژی ویژه از ۳ درصد فراتر نرفت. سرانجام، برای تکمیل مطالعات در این زمینه، پیشنهاد می شود در مطالعات آتی تأثیر عواملی مانند ارتفاع تاج سرریز جانبی، وجود روزنه در ساختار سرریز و همچنین محدوده عدد فرود فوق بحرانی بر تغییرات انرژی ویژه در طول سرریز های جانبی بررسی شود تا دیدگاه جامع تری از رفتار هیدرولیکی این نوع سرریزها ارائه شود.

اصل پایداری انرژی برای سرریزهای جانبی در کانال های سهموی، مثلی و دوزنقه ای ارائه شده است (Vatankhah, 2012a, 2012b, 2013) این موضوع از آن رو مهم است که استفاده از کانال های مذکور، به ویژه کانال های دوزنقه ای، در طراحی شبکه های آبیاری و زهکشی بسیار رایج است.

نتیجه گیری

در این تحقیق، با مقایسه نتایج شبیه سازی و داده های آزمایشگاهی، مشخص شد که مدل مورد استفاده در شبیه سازی جریان در سرریزهای جانبی دقت بالایی دارد و عملکرد واقعی این سازه ها را به خوبی پیش بینی می کند. یکی از جنبه های کلیدی این پژوهش، شبیه سازی مطلوب سرریزهای جانبی در کانال های همگرا است. با وجود مطالعات متعدد در این زمینه، به ویژه در سال های اخیر، برخی از جنبه های طراحی و رفتار هیدرولیکی این نوع سرریزها همچنان نیازمند بررسی دقیق تر و مدل سازی عددی است. از این رو، در متن مقاله تلاش شده است فرآیند شبیه سازی با دقت و جزئیات کافی تشریح شود تا درک بهتری از عملکرد این سازه ها ارائه گردد. یافته های این

قدردانی

از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز برای حمایت های مالی شان در قالب پژوهانه (GN: SCU.WH1402.31370) و در به ثمر رسیدن این تحقیق قدردانی می شود.

مراجع

- 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.
- Abdollahi, A., Kabiri-Samani, A., Asghari, K., Atoof, H., & Bagheri, S. (2017). Numerical modeling of flow field around the labyrinth side-weirs in the presence of guide vanes. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 23(1), pp.71-79
- Ahadiyan, J., Pipelzadeh, S., & Omidvarinia, M. (2016). Hydraulic Simulation of Sewage Discharge in an Irrigation and Drainage System by Changing the Vertical Angle of the Bottom Circular Buoyant Jet. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 16(65), pp.1-18 (In Persian)
- Alahdadi, K., & Shafai-Bajestan, M. (2020). The flow discharge over side weirs in rectangular channels with a decreasing width downstream of the weir. *18th Iranian Hydraulics Conference*, University of Tehran. Iran. (In Persian)

- Azimi, H., Shabanlou, S., & Kardar, S. (2018). Turbulent Flow in the Vicinity of Side Weirs in Subcritical Conditions. *Mathematical Models and Computer Simulations*, 10(6), pp.784-797
- Bacco, M. D., & Scorzini, A. R. (2020). Experimental analysis on sediment transport phenomena in channels equipped with inclined side weirs. *8th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures ISHS2020*, Santiago, Chile.
- Bagheri Seyyed Shekari, N., Eghbalzadeh, A., Javan, M. (2018). 'The Effect of Downstream Water Depth on Hydraulic Jump Characteristics Along Side Weir', *Water and Soil Science*, 28(3), pp. 195-208 (In Persian)
- Bagherifar, M., Emdadi, A., Azimi, H., Sanahmadi, B., & Shabanlou, S. (2019). Numerical evaluation of turbulent flow in a circular conduit along a side weir. *Applied Water Science*, 10(1).
- Balmforth, D. J., & Sarginson, E. J. (1983). The effects of curvature in supercritical side weir flow. *Journal of Hydraulic Research*, 21(5), pp.333-343
- Bernoulli, D. (1738). *Hydrodynamica, sive, De viribus et motibus fluidorum commentarii*. Sumptibus Johannis Reinholdi Dulseckeri, typis Joh. Henr. Deckeri, Typographi Basiliensis.
- Borghei, S. M., & Parvaneh, A. (2011). Discharge characteristics of a modified oblique side weir in subcritical flow. *Flow Measurement and Instrumentation*, 22(5), pp.370-376
- Citrini, D. (1942). *Canali rettangolari con portata e larghezza gradualmente variabili*. Società Editrice Riviste Industrie Elettriche.
- Daryaei, M., Sharifi, S. M., Shahriari, A., Kashefipour, S., & Zayeri, M. (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*. (In Persian)
- De Marchi, G. (1934). Saggio di teoria del funzionamento degli stramazzi laterali (Theoretical knowledge on the functioning of sideweirs). *L'Energia Elettrica*, 11(11), pp.849-860
- El-Khashab, A., & Smith, K. V. H. (1976). Experimental Investigation of Flow Over Side Weirs. *Journal of the Hydraulics Division*, 102(9), pp.1255-1268
- Ghaderi, A., Dasineh, M., Abbasi, S., & Abraham, J. (2019). Investigation of trapezoidal sharp-crested side weir discharge coefficients under subcritical flow regimes using CFD. *Applied Water Science*, 10(1).
- Ghodsian, M. (2004). Flow over Triangular Side Weir. *Scientia Iranica*, 11(1).
- Ghorbannia, D., & Eghbalzadeh, A. (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), pp.4101-4111
- Hager, W. H. (1987). Lateral outflow over side weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 113(4), pp.491-504
- Hirt, C. W., & Nichols, B. D. (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39(1), pp.201-225
- Hussein, B. S., & Jalil, S. A. (2024). Hydrodynamic Behavior Simulation of Flow Performance over Labyrinth Side Weir. *Polish Journal of Environmental Studies*, 33(2), pp.1159-1171
- Idrees, A. K., & Al-Ameri, R. (2023). Investigating a new approach to enhance the discharge capacity of labyrinth weirs. *Journal of Hydroinformatics*, 25(2), pp.300-317
- 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), pp. 67-84 (In Persian)
- Maranzoni, A., & Tomirotti, M. (2021). 3D CFD analysis of the performance of oblique and composite side weirs in converging channels. *Journal of Hydraulic Research*, 59(4), pp.586-604
- 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).
- Neyssi, K., Daryaei, M., Kashefipour, S. M., Shahriari, A., & Zayeri, M. (2025). Improving Water Diversion Efficiency in Converging Side Weirs through Side Vane Installation: a numerical simulation. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering*, 47(4), pp.93-104

- Novak, P., Guinot, V., Jeffrey, A., & Reeve, D. E. (2018). *Hydraulic modelling: An introduction: Principles, methods and applications*. CRC Press .
- 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*, 138(7), pp.653-656
- Parsi, E., Allahdadi, K., Bahrebar, A. and Farhadi, R. 2021. Effect of downstream contraction on side weirs discharge. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 15, pp.455-466 (In Persian)
- Robinson, D. I., & McGhee, T. J. (1993). Computer Modeling of Side-Flow Weirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 119(6), pp.989-1005
- Saffar, S. , Solimani Babarsad, M. , Mahmoodian Shooshtari, M. , Poormohammadi, M. H. and Riazi, R. (2022). Experimental study of flow converging section side weir hydraulics. *Journal of Marine Science and Technology*, 21(3), pp.23-32 (In Persian)
- Saffar, S., Safaei, A., Aghaee Daneshvar, F., & Solimani Babarsad, M. (2024). Flow-3D numerical modeling of converged side Weir. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 48(1), pp.431-440
- Shahriari, A., Daryaei, M., Kashefipour, S., & Zayeri, M. (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*, pp.1-11
- Spurk, J. H., & Aksel, N. (2019). *Fluid Mechanics*. Springer International Publishing.
- Subramanya, K., & Awasthy, S. C. (1972). Spatially Varied Flow over Side-Weirs. *Journal of the Hydraulics Division*, 98(1), pp.1-10
- Vatankhah, A. R. (2012a). Analytical solution for water surface profile along a side weir in a triangular channel. *Flow Measurement and Instrumentation*, 23(1), pp.76-79
- Vatankhah, A. R. (2012b). Briefing: Water surface profile over side weir in a trapezoidal channel. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management*, 165(5), pp.247-252
- Vatankhah, A. R. (2013). Water surface profile along a side weir in a parabolic channel. *Flow Measurement and Instrumentation*, 32, pp.90-95
- Venutelli, M. (2008). Method of solution of nonuniform flow with the presence of rectangular side weir. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 134(6), pp.840-846
- Yakhot, V., Orszag, S. A., Thangam, S., Gatski, T., & Speziale, C. (1992). Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 4(7), pp.1510-1520