



## Investigation of Flow Parameters in a Chute Spillway Using FLOW-3D Software

Mahdi Tabrizchi<sup>1</sup> | Yousef Hassanzadeh<sup>2</sup> | Mohammad Taghi Aalami<sup>3</sup> | Hamidreza Abbaszadeh<sup>4</sup>

1. Department of Water Resources Engineering, Center of Excellence in Hydroinformatics, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: [mahdi.tabrizchi@yahoo.com](mailto:mahdi.tabrizchi@yahoo.com)
2. Corresponding Author, Department of Water Resources Engineering, Center of Excellence in Hydroinformatics, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: [yhassanzadeh@tabrizu.ac.ir](mailto:yhassanzadeh@tabrizu.ac.ir), and Farazab Co. (Consulting Engineers), Research and Writing Capacity Enhancement Affairs, Tabriz, Iran
3. Department of Water Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: [mtaalami@tabrizu.ac.ir](mailto:mtaalami@tabrizu.ac.ir)
4. Department of Water Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: [ha.abbaszadeh@tabrizu.ac.ir](mailto:ha.abbaszadeh@tabrizu.ac.ir)

### Article Info

**Article type:** Research Article

**Article history:**

**Received:** Nov. 8, 2024

**Revised:** Dec. 8, 2024

**Accepted:** Dec. 22, 2024

**Published online:** April. 2025

**Keywords:**

Cavitation Index,  
Hydraulic Parameters,  
VOF,  
Weir.

### ABSTRACT

This study investigates the hydraulic characteristics of flow, including flow velocity, pressure, and cavitation index, at various inflow rates using FLOW-3D. The results indicate that as flow passes over the ogee spillway, the flow velocity increases, and this upward trend continues gradually along the chute section. Due to the steep slope of the chute section, the maximum flow velocity occurs here and is eventually dissipated upon entering the stilling basin, where dynamic energy is absorbed. Longitudinal pressure distribution along the spillway reveals a reduction in pressure from upstream to downstream, with the most significant decrease occurring at the downstream end of the chute. The maximum flow velocities at inflow rates of 300 (minimum design discharge), 830 (10,000-year flood discharge), and 2270 m<sup>3</sup>/s (maximum probable flood, P.M.F.) were recorded as 34.25, 41.80, and 44.90 m/s, respectively, at the downstream end of the chute. Additionally, the minimum flow pressures for these discharge rates were 1.23, 1.52, and -5.9 kPa, respectively. Examination of the cavitation index along the channel bed indicated that cavitation occurs in the chute section under all inflow conditions. However, the cavitation index assessment on the sidewalls showed that the ogee, chute, and initial sections of the chute sidewalls remain unaffected by cavitation. Conversely, the cavitation index in the downstream chute sections decreases below the critical threshold, indicating potential cavitation risk in these regions. Therefore, to prevent the occurrence of the destructive cavitation phenomenon, the implement of flow aeration method from the floor and sidewalls of the channel is recommended.

Cite this article: Tabrizchi, M., Hassanzadeh, Y., Alami, M. T., & Abbaszadeh, H. (2025) Investigation of Flow Parameters in a Chute Spillway Using FLOW-3D Software, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (2), 411-431. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.385048.669829>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.



DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.385048.669829>

## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

The present study investigates the hydraulic performance of the Nazlu Dam spillway in West Azerbaijan, Iran, with a focus on key parameters such as flow velocity, pressure distribution, and cavitation index. Due to the high velocities involved and the steep slope of the spillway chute, the structure faces a potential risk of cavitation—a phenomenon that can damage the spillway by causing erosion or pitting on concrete surfaces. Cavitation occurs when water pressures fall below the vapor pressure, leading to vapor bubble formation and subsequent collapse, which can cause severe structural damage over time. Using FLOW-3D, a computational fluid dynamics (CFD) tool, this research aims to simulate the spillway's hydraulic behavior under various flow conditions, assessing potential risk areas for cavitation and proposing solutions for damage mitigation. This research is particularly relevant given the dam's importance in regional water resource management, serving irrigation, potable water, and industrial needs.

### Materials and Methods

The Nazlu Dam spillway includes an ogee crest, a convergent channel, a steeply sloped chute, and a stilling basin designed for energy dissipation. The study uses FLOW-3D software to simulate the behavior of water flow over this structure. The Volume of Fluid (VOF) method is applied to capture the free surface dynamics of water flow, while the RNG  $k-\epsilon$  turbulence model is employed to simulate turbulent flow behavior accurately. Simulations are conducted for a range of discharge rates, from the minimum design flow to the maximum probable flood, to evaluate hydraulic performance under different conditions. Boundary conditions are defined based on these flow rates, with inlet and outlet conditions specified for accurate modeling. The spillway geometry is meshed carefully to capture detailed hydraulic characteristics, allowing for precise simulation of flow velocity, pressure, and cavitation indices across the structure.

### Results and Discussion

Simulation results show a notable increase in flow velocity as water progresses from the ogee crest to the chute section, reaching its peak in the steepest portion of the spillway. This peak velocity corresponds to a marked decrease in pressure, particularly toward the downstream end of the chute, as predicted by Bernoulli's principle. The cavitation index—calculated based on velocity and pressure distributions—reveals that the downstream chute and the entrance of the stilling basin are particularly prone to cavitation under high-flow scenarios, especially during maximum flood conditions. The lowest cavitation indices fall below the critical threshold, indicating a high probability of cavitation in these regions.

To address the risk of cavitation damage, aeration is suggested as a preventive measure. Aeration involves introducing air into the flow, which can help maintain higher pressures along the chute, reducing the likelihood of cavitation. This practice is widely recognized in hydraulic engineering as an effective method to mitigate cavitation damage. Introducing air bubbles into the flow acts as a buffer by absorbing energy and keeping pressures above the vaporization threshold, thus protecting the spillway surface.

### Conclusion

The FLOW-3D simulations conducted in this study provide a detailed evaluation of hydraulic parameters along the Nazlu Dam spillway, identifying regions vulnerable to cavitation. The analysis indicates that high velocities and low pressures in certain sections of the chute heighten the risk of cavitation, with potential for structural damage in high-flow conditions. The study recommends aeration techniques, such as air injection, to mitigate cavitation risks, particularly at high discharge rates. Implementing these measures will help preserve the structural integrity of the spillway over the long term, safeguarding the dam's role in critical water resource management for the region.

The insights derived from this study serve as valuable guidelines for spillway design and maintenance, particularly for structures exposed to extreme hydraulic loads. These findings underscore the need for regular monitoring and proactive maintenance to manage cavitation risks effectively and ensure the safety and durability of dam spillways.

### Author Contributions:

Conceptualization, Mahdi Tabrizchi, Yousef Hassanzadeh and Mohammad Taghi Aalami; methodology, Mahdi Tabrizchi, Yousef Hassanzadeh and Mohammad Taghi Aalami; software, Mahdi Tabrizchi; validation, Mahdi Tabrizchi, Yousef Hassanzadeh and Mohammad Taghi Aalami; formal analysis, Mahdi Tabrizchi, Yousef Hassanzadeh, Mohammad Taghi Aalami and Hamidreza Abbaszadeh; investigation, Mahdi Tabrizchi, Yousef Hassanzadeh, Mohammad Taghi Aalami and Hamidreza Abbaszadeh; resources, Mahdi Tabrizchi, Yousef Hassanzadeh, Mohammad Taghi Aalami and Hamidreza Abbaszadeh; data curation, Mahdi Tabrizchi;

writing—original draft preparation, Mahdi Tabrizchi, Yousef Hassanzadeh and Hamidreza Abbaszadeh; writing—review and editing, Mahdi Tabrizchi, Yousef Hassanzadeh and Hamidreza Abbaszadeh; supervision, Yousef Hassanzadeh; project administration, Yousef Hassanzadeh and Mohammad Taghi Aalami; All authors have read and agreed to the published version of the manuscript. All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

**Data Availability Statement:**

Data available on request from the authors.

**Ethical considerations:**

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

**Conflict of interest:**

The author declares no conflict of interest.

## بررسی پارامترهای جریان عبوری در سرریز شوت با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D

مهدی تبریزی<sup>۱</sup> | یوسف حسن‌زاده<sup>۲</sup> | محمدتقی اعلمی<sup>۳</sup> | حمیدرضا عباس‌زاده<sup>۴</sup><sup>۱</sup> گروه مهندسی منابع آب، قطب علمی هیدروانفورماتیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: [mahdi.tabrizchi@yahoo.com](mailto:mahdi.tabrizchi@yahoo.com)<sup>۲</sup> نویسنده مسئول، گروه مهندسی منابع آب، قطب علمی هیدروانفورماتیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه:[yhassanzadeh@tabrizu.ac.ir](mailto:yhassanzadeh@tabrizu.ac.ir) و شرکت فراآب (مهندسی مشاور)، امور ارتقای توانمندی تحقیقات و تألیفات، تبریز، ایران<sup>۳</sup> گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: [mtaalami@tabrizu.ac.ir](mailto:mtaalami@tabrizu.ac.ir)<sup>۴</sup> گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: [ha.abbaszadeh@tabrizu.ac.ir](mailto:ha.abbaszadeh@tabrizu.ac.ir)

## چکیده

## اطلاعات مقاله

در پژوهش حاضر مشخصه‌های هیدرولیکی جریان از جمله سرعت، فشار جریان و اندیس کاویتاسیون در دبی‌های مختلف ورودی با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D بررسی شده است. نتایج نشان داد که با عبور جریان از روی سرریز اوجی سرعت در مسیر جریان افزایش یافته و در قسمت شوت این افزایش با شیب ملایمی به روند خود ادامه می‌دهد. به دلیل شیب تند قسمت تندآب، حداکثر مقدار سرعت جریان در این قسمت رخ داده و نهایتاً با ورود به قسمت حوضچه آرامش انرژی دینامیکی جریان مستهلک و به انرژی پتانسیل تبدیل می‌شود. مقادیر فشار جریان در راستای طولی سرریز نشان داد که مقدار این پارامتر با حرکت از بالادست به پائین دست به دلیل افزایش سرعت جریان، کاهش می‌یابد و بیشترین کاهش در قسمت انتهایی تندآب رخ می‌دهد. بیشترین مقدار سرعت جریان به‌ازای دبی‌های ورودی ۳۰۰ (دبی مینیمم طراحی)، ۸۳۰ (دبی سیلاب ۱۰۰۰۰) و ۲۲۷۰ (حداکثر دبی محتمل) مترمکعب بر ثانیه برابر با ۳۴/۲۵، ۴۱/۸۰ و ۴۴/۹۰ متر بر ثانیه بوده که در قسمت انتهایی تندآب به دست آمد. همچنین کمترین مقدار فشار جریان به‌ازای دبی‌های مذکور به ترتیب برابر ۱/۲۳، ۱/۵۲ و ۵/۹- کیلو پاسکال به دست آمد. بررسی اندیس کاویتاسیون بر روی کف مجرا نشان داد که کف مجرای سرریز به‌ازای تمامی دبی‌های ورودی در قسمت تندآب با وقوع پدیده کاویتاسیون مواجه می‌گردد. بررسی اندیس کاویتاسیون بر روی دیواره‌های جانبی نشان داد که دیواره‌های قسمت‌های سرریز اوجی، سرریز شوت و بخش‌های ابتدایی تندآب از وقوع پدیده کاویتاسیون در امان هستند. این درحالی است که اندیس کاویتاسیون در قسمت‌های انتهایی تندآب به کم‌تر از مقدار بحرانی ۰/۲ کاهش می‌یابد. بنابراین، برای اجتناب از وقوع پدیده مخرب کاویتاسیون در این ناحیه، روش هوادهی از کف و دیواره‌های مجرا توصیه می‌شود.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۸/۱۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۹/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲

تاریخ انتشار: اردیبهشت ۱۴۰۴

## واژه‌های کلیدی:

اندیس کاویتاسیون، پارامترهای هیدرولیکی سرریز، VOF

استناد: تبریزی؛ مهدی، حسن‌زاده؛ یوسف، اعلمی؛ محمدتقی، عباس‌زاده؛ حمیدرضا، (۱۴۰۴) بررسی پارامترهای جریان عبوری در سرریز شوت با استفاده از نرم‌افزار

FLOW-3D. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶ (۲)، ۴۳۱-۴۱۱. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.385048.669829>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.385048.669829>

## مقدمه

یکی از مهم‌ترین مشکلات و چالش‌های هیدرولیکی که سرریز را تهدید می‌کند، پدیده کاویتاسیون می‌باشد که در اثر افزایش سرعت جریان و کاهش مقادیر فشار به پائین‌تر از فشار اتمسفر ایجاد می‌گردد (Süme et al. 2024; Abbaszadeh et al. 2023). در سرریز سدهای بلند، به دلیل افزایش سرعت جریان، هرگونه تغییر در هندسه مجرا، زبری بستر و جداره، انحنا در مسیر جریان، و وجود درزهای اجرایی در جداره، باعث جداشدگی جریان از جداره‌ی مجرا و کاهش موضعی فشار نسبت به فشار بخار آب می‌شود (Jan et al. 2009). در این صورت با بروز پدیده‌ی کاویتاسیون، آب در دمای محیطی خود از حالت مایع به حالت بخار تبدیل شده و حباب‌های کاویتاسیون (حباب‌های بخار آب) تشکیل می‌شوند. کاویتاسیون باعث فرسایش و خوردگی سطح بتن می‌گردد و در صورت تداوم، خسارات هنگفتی را وارد می‌نماید. خسارت‌های شدید در سرریز سد کارون ۱ در ایران در سال ۱۹۷۷، سرریز سد گلن کانیون در ایالات متحده آمریکا در سال ۱۹۸۳، سرریز سد هوور در ایالات متحده آمریکا در سال ۱۹۴۱ و دیوارهای کناری سرریز تونلی سد زیپینگو نمونه‌ای از این خسارت‌ها می‌باشند. برای ارزیابی پتانسیل وقوع کاویتاسیون، از شاخص بدون بعد اندیس کاویتاسیون که توسط Falvey (1990) ارائه گردید استفاده می‌شود. بدین صورت که برای مقادیر کوچک‌تر یا برابر با  $0/2$ ، احتمال وقوع کاویتاسیون در مجرا بیشتر بوده و بالعکس برای مقادیر بزرگ‌تر از  $0/2$ ، مجرا از وقوع پدیده کاویتاسیون در امان می‌باشد.

Chanson (1997) در تحقیق خود به بررسی جریان‌های فوق بحرانی با سرعت بالا در کانال‌های باز پرداختند. آن‌ها با استفاده از داده‌های تجربی جدید در یک کانال به طول ۲۵ متر و شیب ۴ درجه، ویژگی‌های جریان هوا-آب و توزیع سطح تماس بین هوا و آب را مطالعه کردند. نتایج نشان داد که حتی با وجود مقدار کم هوای وارد شده، سطح تماس بین هوا و آب می‌تواند بسیار زیاد باشد. این یافته‌ها بر اهمیت ورود حباب‌های هوا در فرآیند انتقال گاز بین هوا و آب در جریان‌های فوق بحرانی تأکید می‌کند. (Dargahi (2006 به صورت سه‌بعدی و توسط نرم‌افزار Fluent به شبیه‌سازی جریان عبوری از روی سرریز اوجی و تعیین سطح آزاد جریان و پروفیل‌های سرعت در ازای استفاده از مدل‌های توربولانسی و توابع دیواره مختلف، پرداخت. نتایج ایشان نشان داد که پارامترهای اصلی جریان دارای تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی هستند با این حال این تطابق وابستگی فراوانی به انتخاب اندازه شبکه، مدل توربولانسی، تابع دیواره و عدد رینولدز دارد. نتایج این تحقیق ثابت کرد که در سرریزها استفاده از شبکه‌های به نسبت کوچک‌تر در نزدیکی دیواره از اهمیت بیشتری برخوردار است. مدل توربولانسی RNG k-ε نیز نتایج بهتری نسبت به مدل‌های دیگر برای میدان سرعت در نزدیکی دیواره‌ها ارائه می‌دهد با این حال انتخاب تابع دیواره مناسب برای مرزهای صلب از اهمیت بیشتری در مقایسه با نوع مدل توربولانسی برخوردار است. در کل تعیین سطح آزاد آب با اختلاف  $1/5\%$  تا  $2/9\%$  نسبت به داده‌های آزمایشگاهی در هدهای مختلف سرریز به خوبی امکان‌پذیر بود. (Dong et al. (2007 تأثیر هوادهی بر وضعیت جریان و جلوگیری از خرابی ناشی از کاویتاسیون را بررسی نمودند. آزمایش‌ها در یک تونل آب با چهار مقطع متوالی انجام شدند: مقطع هوادهی، مقطع جمع شونده، مقطع مشاهده، و مقطع پخش شونده. ورود هوا به جریان باعث افزایش فشار در ناحیه‌ی کاویتاسیون (مقطع مشاهده) شد. نتایج نشان داد که هوادهی به جریان باعث افزایش قابل توجه فشار در ناحیه کاویتاسیون می‌شود. همچنین، نمودار موج فشاری ناشی از انفجار حباب‌های کاویتاسیون در دو حالت با هوادهی و بدون هوادهی نشان داد که ورود هوا باعث کاهش قدرت موج فشاری می‌شود. (Ruan et al. (2007 اثر هوای وارد شده به سرریز تونلی پروژه گوپیتان را بر اساس معیار شباهت گرانشی و شرایط سرعت جریان هوادهی بیش از ۶ متر بر ثانیه، بررسی نمودند. نتایج نشان داد که هوادهی با غلظت هوای بیشتر در پائین‌دست، می‌تواند به طور مؤثری از سرریز تونلی در برابر کاویتاسیون محافظت نمایند. (Pfister and Hager (2010 خصوصیات جریان هوادهی شده از جمله غلظت هوا را به صورت آزمایشگاهی مطالعه نمودند. در این تحقیق، شرایط جریان پس از هوادهی به سه منطقه شامل جت، نقطه برخورد جریان با سطح و ناحیه دور از هوادهی تقسیم شده‌اند. آن‌ها مقادیر غلظت هوا در سطح جریان، میانگین غلظت و غلظت در کف سرریز برای هر سه منطقه فوق را ارائه نمودند. نتایج نشان می‌دهد که غلظت هوا در کف سرریز به حداکثر مقدار خود می‌رسد و تا نقطه برخورد جت ادامه دارد، سپس از نقطه برخورد جت، غلظت کاهش می‌یابد. همچنین یک گرادیان هوادهی بزرگ نیز در محل نقطه برخورد جت با کف سرریز مشاهده گردید. (Pfister et al. (2011 توسط یک مدل هیدرولیکی به تعیین اثر غلظت ورودی هوا توسط رمپ هوادهی بر روی پارامترهای مختلف جریان پرداختند. مقادیر غلظت هوای متوسط ورودی بین  $0/4$  تا  $0/25$  و غلظت هوای متوسط برای جریان یکنواخت بین  $0/18$  تا  $0/23$  در نظر گرفته شده‌اند. همچنین مقدار غلظت متوسط ورودی باعث کاهش مختصر ضریب هوادهی شده که در کل اثرات آن کم می‌باشد. در محل شروع هوادهی (انتهای رمپ) غلظت متوسط از غلظت متوسط ورودی بزرگ‌تر می‌باشد. همچنین با افزایش غلظت متوسط ورودی مقدار غلظت متوسط افزایش پیدا می‌کند. غلظت هوای کف جریان نیز با افزایش غلظت متوسط

ورودی کاهش می‌یابد. (Pfister (2011) به بررسی تغییرات مشخصه‌های هیدرولیکی جریان دو فازی از جمله ضریب هوادهی، طول جت، گسترش غلظت هوا با تغییر تحت تأثیر دو پارامتر مهم زاویه دفلکتور و زیر فشار داخل کاویتی پرداخت. نتایج نشان داد که دفلکتور با شیب بالاتر بهترین عملکرد را در ورود هوا به داخل جریان دارد به این صورت که دفلکتور دارای شیب بالاتر باعث افزایش هوای ورودی می‌گردد در حالی که تأثیر آن بر روی غلظت هوا کم است. همچنین با افزایش زیر فشار داخل کاویتی طول جت و ضریب هوادهی کاهش می‌یابند. همچنین با افزایش زیر فشار، غلظت هوای کف سرریز نیز کاهش می‌یابد. (Zhenwei et al. (2012) به شبیه‌سازی جریان در سرریز تحت شرایط سطح سیلاب بررسی شده (۶۵۰/۳۹ متر) و سطح سیلاب طراحی شده (۶۵۳/۳۶ متر) با استفاده از نرم‌افزار FLUENT پرداختند. نتایج نشان داد که نتایج عددی مربوط به ارتفاع سطح، فشار و سرعت جریان در طول سرریز با نتایج آزمایشگاهی به خوبی مطابقت داشتند به طوری که تفاوت سرعت متوسط بین محاسبات و آزمایش‌ها کم‌تر از ۶ درصد بود. (Eghbalzadeh and Javan (2012) با انجام شبیه‌سازی عددی به مقایسه بین مدل‌های VOF و Mixture در شبیه‌سازی جریان‌های دو فازی پرداختند. در این مطالعات، شبیه‌سازی جریان عبوری از روی یک سرریز پلکانی توسط نرم‌افزار Fluent صورت گرفته و در طی آن پروفیل سطح آزاد آب و مقدار هوای وارد شده به جریان محاسبه و نتایج حاصله با داده‌های آزمایشگاهی (Chen et al. (2002) مقایسه شدند. نتایج این شبیه‌سازی نشان داد که سطح آزاد آب و مقدار هوای وارد شده به جریان توسط مدل Mixture بهتر از مدل VOF تخمین زده شده است. (Kermani et al. (2013) به بررسی مقاطع وقوع کاویتاسیون بر روی سرریز سد شهید عباسپور پرداختند. آزمایش‌ها بر روی مدل هیدرولیکی صورت گرفته و دو پارامتر سرعت جریان و اندیس کاویتاسیون برای تعیین ۵ سطح مهم در خسارت به کاررفته است. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد از آنجایی که سرعت جریان در طول سرریز افزایش می‌یابد احتمال خسارت در مقاطع نزدیک به انتهای سرریز بیشتر می‌گردد. (Chakib (2013) به صورت عددی به بررسی نقطه شروع هوادهی طبیعی از سطح جریان بر روی سرریز پلکانی پرداخت. برای محاسبه اندرکنش بین فاز آب و فاز هوا از روش VOF و مدل‌سازی توربولانس از مدل استاندارد استفاده گردید. در این مطالعه چندین نقطه برای تعیین نقطه شروع هوادهی طبیعی تعیین شد و با نتایج آزمایشگاهی و روابط تئوری مقایسه گردید. همچنین به تعیین نقاط هواگیری سطحی با تغییر در آبگذری‌های جریان پرداخته شد. نتایج بیانگر این موضوع می‌باشند که با افزایش آبگذری جریان، نقطه شروع هوادهی از سطح به پائین دست انتقال پیدا کرده و برای دبی ۰/۸۲ متر بر مجذور ثانیه، هوادهی روی پله‌های سرریز وجود نداشته و به حوضچه آرامش انتقال پیدا کرده است. همچنین ورود هوا به جریان به دلیل اینکه باعث کاهش اصطکاک دیواره‌ها می‌گردد سرعت جریان نیز افزایش می‌یابد. (Chinnarasri et al. (2014) با روش حجم محدود به مطالعه مشخصه‌های هیدرولیکی و توربولانسی جریان در دو حالت سرریز صاف و پلکانی پرداختند. از روش VOF برای تشکیل سطح آزاد آب و همچنین از مدل RNG-Realizable برای مدل‌سازی توربولانسی جریان استفاده گردیده است. نتایج به دست آمده نشان داد که مقادیر پروفیل‌های سرعت در دو حالت سرریز شوت و سرریز پله‌ای دارای تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند و بیشترین درصد خطا در توزیع سرعت جریان در سرریز شوت ۱۷ درصد می‌باشد. در ایستگاه‌های دورتر از سرریز سرعت‌ها تمایل به داشتن پروفیل و مقدار ماکزیمم ثابتی دارند. سرعت ماکزیمم در ایستگاه نزدیک به خروجی در سرریز شوت نسبت به همان شرایط ورودی جریان در سرریز پله‌ای دارای مقدار بیشتری است که می‌تواند خود باعث به وجود آمدن توربولانس گردد. نتایج شدت توربولانس در سرریز شوت نیز بیانگر بیشترین مقدار آن در کف سرریز می‌باشد. همچنین مقادیر کم‌ترین و بیشترین شدت توربولانس در سرریز شوت در ایستگاه نزدیک به خروجی که دارای سرعت جریان بالاتری می‌باشد قرار دارند. حسن‌زاده و ایقان و همکاران (۱۳۹۴)، به بررسی عددی پدیده کاویتاسیون روی سرریز سد ونیار با استفاده از نرم‌افزار FLUENT پرداختند. در این تحقیق از روش VOF برای شبیه‌سازی سطح جریان و از مدل RNG K- $\epsilon$  برای مدل آشفتگی استفاده شد. نتایج بررسی حاکی از آن است که تمامی مقادیر شاخص کاویتاسیون از مقدار بحرانی ۰/۲ بزرگ‌تر بوده و طراحی سرریز به صورت ایمن انجام گرفته است. (Luna-Bahena et al. (2018) میزان هوای ورودی به داخل جریان در دو حالت سرریز هوادهی شده از کف با پایه و بدون پایه را به صورت آزمایشگاهی بررسی نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد که مقدار هوای ورودی به داخل جریان در مدل سرریز با پایه بیشتر از مدل بدون پایه است. این افزایش به دلیل وقوع موج بعد از پایه و ورود هوا به داخل جریان است که باعث کاهش پدیده کاویتاسیون در مجرا می‌شود. همچنین، در حالت سرریز با پایه، غلظت هوای ورودی به داخل جریان بعد از هواده کف غیریکنواخت است و میزان غلظت هوا در نزدیک دیواره‌های جانبی بیشتر از مرکز سرریز است. (Jamali and Manafpour (2019) به بررسی وقوع پدیده کاویتاسیون در تخلیه کننده تحتانی سد سیمره با کمک نرم‌افزار FLOW-3D پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که مقادیر اندیس کاویتاسیون در امتداد بستر مجرا از مقطع  $X=41m$  تا انتهای کانال برای بازشدگی‌های ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪، ۸۰٪ درجه سرویس کم‌تر از مقدار بحرانی ۰/۲ می‌باشد. همچنین دیواره‌های مجرا در بخش  $X=41m$  برای همه بازشدگی‌ها به جز ۱۰۰٪ و در مقطع  $X=42m$  برای همه بازشدگی‌ها با پدیده کاویتاسیون مواجه می‌باشد. (Jamali et al. (2023) به بررسی عددی

تأثیر زاویه بازشدگی دیواره‌های جانبی (بین ۰ تا ۱۰ درجه) و عدد فرود (بین ۰ تا ۲۰/۱) بر روی اندیس کاویتاسیون در جریان‌های فوق بحرانی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که پدیده کاویتاسیون برای زوایای بازشدگی بین ۰ تا ۱۰ درجه در اعداد فرود کوچک‌تر از ۴/۴۹ رخ نمی‌دهد. این در حالی است که اندیس کاویتاسیون در زوایای بازشدگی بزرگ‌تر از ۶ درجه و اعداد فرود بزرگ‌تر از ۱۴ به کم‌تر از مقدار بحرانی خود (۰/۲) رسید. همچنین نتایج حاکی از آن بود که نباید هیچ‌گونه بازشدگی برای دیواره‌های جانبی برای اعداد فرود بزرگ‌تر از ۱۷/۵ در نظر گرفت. پیربوداقی و همکاران (۱۴۰۱)، به شبیه‌سازی جریان دو فازی روی سرریز اوجی سد آغ‌چای پرداختند. نتایج بررسی وقوع پدیده کاویتاسیون به‌ازای دو دبی ۱۰۶۵ و ۴۴۰۰ مترمکعب بر ثانیه نشان داد که در قسمت اوجی و تغییر زاویه کانال تندآب به‌ازای دبی ۴۴۰۰ مترمکعب بر ثانیه، رخداد پدیده کاویتاسیون بسیار محتمل بوده و جهت جلوگیری از وقوع آن باید تدابیری اتخاذ گردد. ولی در دبی‌های کم‌تر از جمله ۱۰۶۵ مترمکعب بر ثانیه به خاطر سرعت کم‌تر و عدم جدایش جریان از بستر احتمال وقوع کاویتاسیون کم‌تر می‌باشد.

به‌منظور ذخیره آب‌های سطحی جهت مصارف گوناگون، طراحی سدهای بلند با افزایش چشمگیری همراه بوده است. سرریزها از جمله سازه‌های هیدرولیکی وابسته به سد وظیفه انتقال آب به‌صورت ایمن از بالادست به پائین‌دست را بر عهده دارد. مرور مراجع حاکی از آن است که وقوع پدیده کاویتاسیون یکی از مهم‌ترین مشکلات سرریز سدهای بلند بوده و آسیب‌های جدی به این سازه‌ها وارد کرده است. لذا جهت مقابله با این پدیده مخرب و داشتن طراحی‌هایی مناسب در ساخت سرریزهای آبی، نیازمند درک صحیحی از الگوی جریان به خصوص میدان‌های فشار و سرعت جریان می‌باشد تا از وقوع این پدیده مخرب جلوگیری شده و در صورت مواجهه با آن راهکارهای مناسب ارائه گردد. در تحقیق حاضر به بررسی عددی الگوی جریان در سرریز شوت سد بلند نازلو چای به ارتفاع ۱۰۰ متر از بستر رودخانه، با کمک نرم‌افزار FLOW-3D پرداخته شده است. بدین صورت که ابتدا مشخصه‌های هیدرولیکی جریان مانند سرعت و فشار جریان به‌ازای دبی‌های مختلف ورودی مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته و سپس اندیس کاویتاسیون بر روی کف و دیواره‌های مجرا بررسی شده است. نتایج بررسی‌های پژوهش حاضر گویای آن است که اندیس کاویتاسیون در قسمت‌های انتهایی تندآب به کم‌تر از مقدار بحرانی ۰/۲ کاهش می‌یابد. بنابراین، برای اجتناب از وقوع پدیده مخرب کاویتاسیون در این ناحیه، روش هوادهی از کف و دیواره‌های مجرا توصیه می‌شود.

## مواد و روش‌ها

### سد نازلوچای

در شکل (۱-الف) محدوده دریاچه سد مخزنی نازلو ارائه شده است. سد مخزنی نازلوچای در شمال غربی شهر ارومیه واقع در استان آذربایجان غربی در ایران بر رودخانه نازلوچای به مختصات عرض و طول جغرافیایی به ترتیب ۳۷-۴۰ و ۴۴-۵۱ درجه احداث شده است (شکل ۱-ب). از جمله سرشاخه‌های تشکیل دهنده رودخانه نازلو، سه رودخانه بردوک، سرو و مارمیشو هستند. از این سه رودخانه، رودخانه بردوک (سرشاخه رودخانه گنبد) تقریباً تمامی آب خود را از خاک ایران تأمین می‌نماید. در مقابل قسمت اعظم رودخانه سرو مربوط به سرشاخه‌های آن در خاک کشور ترکیه است. هدف طرح، بهره برداری بهینه از منابع آب و خاک منطقه از طریق مهار و تنظیم آب رودخانه نازلو و استفاده از آب تنظیم شده برای آبیاری حدود ۴۳۱۰۰ هکتار اراضی دشت‌های نازلو، روضه، کهریز و انزل شمالی و همچنین تأمین بخشی از آب مورد نیاز صنعت شهرک‌های دشت ارومیه، تأمین بخشی از آب شرب شهرهای اطراف و نهایتاً جلوگیری از خسارت سیل و تأمین نیازهای زیست محیطی می‌باشد. هدف کیفی طرح نیز، ارتقاء وضع اقتصادی و اجتماعی بخش شمالی دشت ارومیه است. در جدول (۱) مشخصات سد مخزنی نازلو آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات سد مخزنی نازلو

نوع سد	خاکی با هسته رسی
تراز آستانه سد	۱۵۰۲ متر بالاتر از سطح دریا
تراز بستر رودخانه	۱۴۰۰ متر بالاتر از سطح دریا
ارتفاع سد از بستر رودخانه	۱۰۰ متر
طول آستانه سد	۴۳۰ متر
عرض آستانه سد	۱۲ متر
عرض قاعده بزرگ‌ترین مقطع سد	۴۶۰ متر





شکل ۱. الف) تصویر هوایی دریاچه سد مخزنی نازلو (ب) موقعیت سد بر روی نقشه

### سرریز سد نازلو

سیستم تخلیه سیلاب سد شامل کانال ورودی، سرریز اوجی، تندآب همگرا و حوضچه آرامش که در سمت راست بدنه سد طراحی شده است. مقطع کنترل سرریز سد نازلو سازه اوجی شکل با تراز تاج ۱۴۹۲ متر از سطح دریا است. طول مؤثر سرریز ۴۰ متر بوده و وجه بالادست اوجی از دایره‌هایی به شعاع ۴/۷۵ و ۱/۵ متر و وجه پائین دست آن به صورت سهمی به معادله  $Y=0.1015X^{1.836}$  بر اساس استانداردهای توصیه شده بین المللی طراحی شده است. شیب ۳ عمودی به ۱ افقی، بیضی بالادست اوجی را به کانال تقرب متصل می‌کند. در فاصله ۶ متری از سهمی پائین دست اوجی، قوس دایره‌ای شکل به شعاع ۲۴/۳ متری و زاویه مرکزی ۳۵/۸۱ درجه، اوجی را به کانال تندآب متصل می‌کند. شروع این قوس در تراز ۱۴۹۸/۲۷ متر از سطح دریا است. جهت نصب پل بر روی سرریز یک پایه میانی دو متری در محور طولی سرریز طراحی گردیده است. بنابراین طول ناخالص سرریز معادل ۴۲ متر می‌باشد. در ادامه مشخصات کامل سرریز به همراه پلان و پروفیل آن به ترتیب در جدول‌های (۲ تا ۴) و شکل (۲) نشان داده شده است.



**جدول ۲. مشخصات سرریز سد مخزنی نازلوچای**

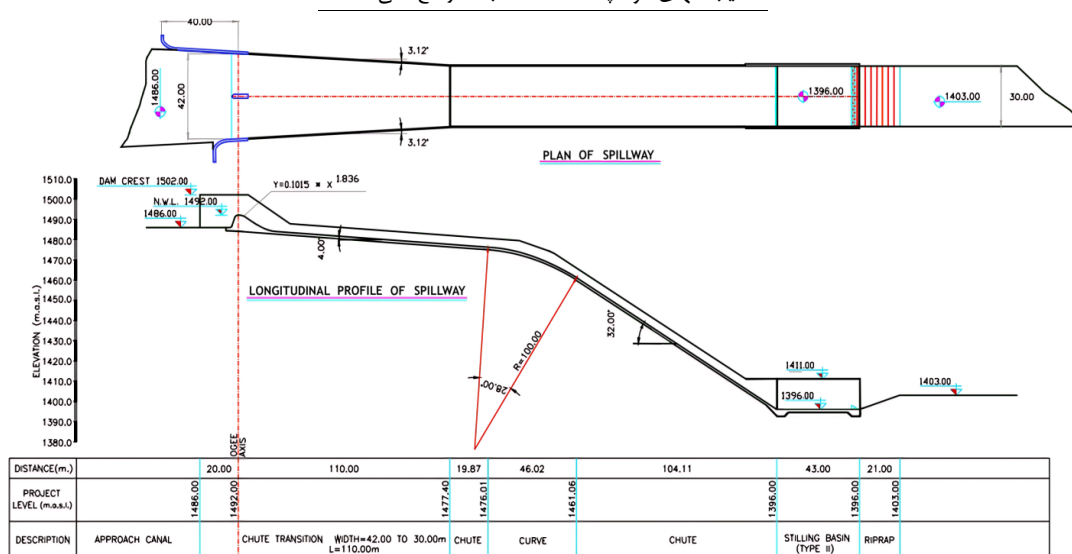
اوجی آزاد	نوع سرریز
$Y=0.1015X^{1.836}$	رابطه سرریز
۱۴۹۲ متر بالاتر از سطح دریا	تراز آستانه سرریز
۱۴۸۶ متر بالاتر از سطح دریا	تراز بستر کانال مشرف به سرریز
۶ متر	ارتفاع پشت سرریز
۴۲ متر	طول ناخالص آستانه
۴۰ متر	طول خالص آستانه
۹/۵۱ متر	طول افقی سرریز از پشت تا ابتدای قوس
۱۴۸۹/۲۷ متر بالاتر از سطح دریا	تراز ابتدای قوس
۲۴/۳۰ متر - ۳۵/۸۱ درجه	شعاع و زاویه قوس
۱۴۸۳/۷۰ متر بالاتر از سطح دریا	تراز انتهای قوس
۱۳/۸۶ متر	طول افقی قوس

**جدول ۳. مشخصات تند آب سرریز سد مخزنی نازلوچای**

۱۴۸۳/۷۰ متر بالاتر از سطح دریا	تراز ابتدا
۴۲ متر	عرض ابتدا همگرا
۳۰ متر	عرض انتها
۴ و ۳۲ درجه	شیب طولی
۱۲۹/۸۷ متر	طول افقی سطح شیب دار اول
۱۰۰ متر و ۲۸ درجه	شعاع قوسی و زاویه
۴۶/۰۲ متر	طول افقی قوس
۱۴۶۱/۰۶ متر بالاتر از سطح دریا	تراز لبه قوس
۱۰۴/۱۱ متر	طول افقی سطح شیب دار

**جدول ۴. مشخصات حوضچه آرامش سرریز سد مخزنی نازلوچای**

۱۳۹۶ متر بالاتر از سطح دریا	تراز بستر
۴۳ متر	طول
۳۰ متر	عرض
۱ به ۳ ارتفاع افقی	شیب انتهایی حوضچه



شکل ۲. پلان و پروفیل سرریز سد نازلو (بی نام، ۱۳۸۶)

**اجزای مدل فیزیکی**

مدل آزمایشگاهی با مقیاس ۱:۴۰ از سیستم سرریز مخزنی سد نازلو در موسسه تحقیقات آب و وزارت نیروی ایران جهت ارزیابی عملکرد

سازه ساخته شده است (شکل ۳) (Anonymous, 2007). هدف اصلی از ساخت این مدل هیدرولیکی، بهینه‌سازی و بهبود عملکرد سیستم تخلیه سیلاب می‌باشد. تحلیل‌های ریاضی به همراه تجربه‌های موجود، قادر به ارائه اطلاعات کامل جهت تضمین عملکرد صحیح یک سازه هیدرولیکی پرهزینه نیستند. بنابراین مطالعات مدل هیدرولیکی می‌توانند به منظور کسب اطلاعات بیشتر درباره رفتار سازه در شرایط واقعی مفید باشند. در شرایط مناسب، نتایج به دست آمده از مدل هیدرولیکی با مقیاس مشخص، قابل تعمیم به نمونه واقعی سازه خواهد بود. بهره‌گیری از مدل فیزیکی مقیاسی به دلیل قابلیت شبیه‌سازی سه بعدی هندسه محیط مورد مطالعه، امکان مشاهده و اندازه‌گیری مستقیم متغیرهای جریان نظیر عمق جریان، سرعت، و فشار را به خوبی فراهم می‌آورد.



شکل ۳. مدل هیدرولیکی سرریز سد نازلو (بی‌نام، ۱۳۸۶)

### معادلات حاکم بر جریان

یکی از نرم‌افزارهای قدرتمند در حوزه مکانیک سیالات که بر اساس روش حجم محدود عمل می‌کند، نرم‌افزار FLOW-3D است. معادلات پیوستگی و ناویر استوکس توسط نرم‌افزار FLOW-3D برای انجام شبیه‌سازی سه بعدی حرکت سیال گسسته‌سازی می‌شود. معادله پیوستگی یا بقای جرم در یک جریان سیال به صورت زیر خواهد بود (Flow Science Inc., 2016).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن،  $u_i$  مؤلفه بردار سرعت در راستای  $i$  می‌باشد. نرم‌افزار جهت تحلیل سه بعدی جریان، معادلات ناویر استوکس را با استفاده از روش حجم محدود بر روی یک میدان شبکه‌بندی شده حل می‌کند. معادلات در دستگاه مختصات کارتزین به صورت روابط زیر به دست می‌آید. (Flow Science Inc., 2016).

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) = R_{SOR} + R_{DIF} \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x + f_x \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + G_y + f_y \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + G_z + f_z \quad (\text{رابطه ۵})$$

در روابط بالا،  $(u, v, w)$  مولفه‌های سرعت،  $(A_x, A_y, A_z)$  کسری از مساحت مرتبط با جریان،  $(G_x, G_y, G_z)$  شتاب بدنه،  $(f_x, f_y, f_z)$  شتاب ناشی از لزجت در جهت‌های  $(x, y, z)$ ،  $R_{SOR}$  منبع جرم،  $R_{DIF}$  عبارت پخش آشفتگی،  $V_F$  کسر حجمی سیال و  $P$  نمایانگر فشار می‌باشند.

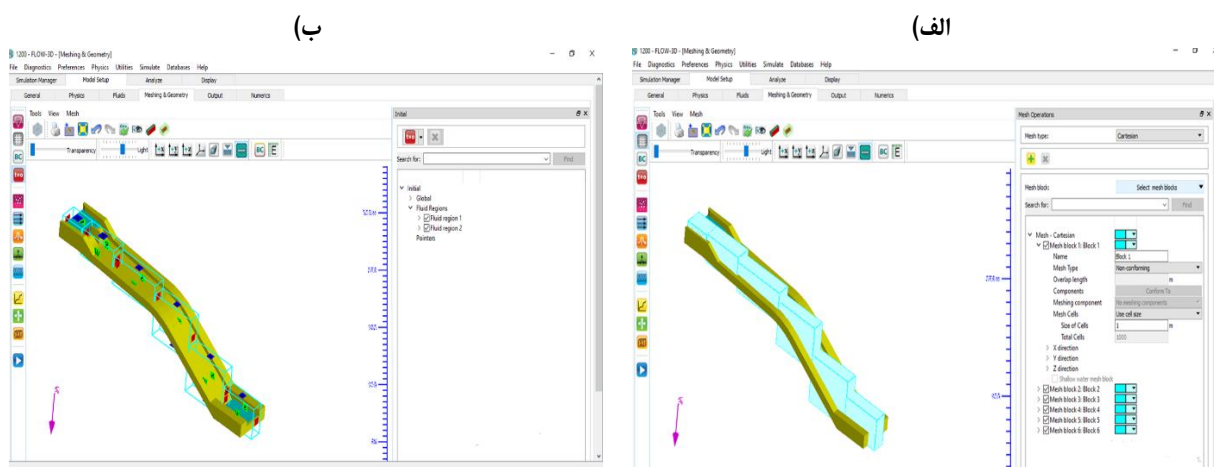
این معادله در حالت کلی به صورت رابطه (۶) بیان می‌گردد.

$$\rho \left( \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + B_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] \quad \text{(رابطه ۶)}$$

که در آن،  $B_i$  نیروی حجمی در راستای  $i$  و  $\mu$  لزوجت دینامیکی سیال،  $\rho$  جرم مخصوص آب،  $x_i$ ،  $x_j$  و  $x_k$  به ترتیب مختصات جریان در راستای فضایی  $i$ ،  $j$  و  $k$ ،  $\delta_{ij}$  دلتای کرونکر که در آن اگر  $i=j$  باشد مقدار آن برابر ۱ و در غیر این صورت مقدار آن برابر صفر دارد (Daneshfaraz et al. 2022a).

### هندسه مدل، مش‌بندی و شرایط مرزی

در پژوهش حاضر با توجه به ابعاد سرریز، چهار نوع تعداد مش انتخاب و با آنالیز حساسیت مش، تعداد بهینه آن انتخاب شد (Hassanzadeh et al. 2024). نحوه اعمال شبکه محاسباتی در هر راستا و سایر اطلاعات شبکه‌بندی مدل در شکل (۴-الف) نشان داده شده است. در این تحقیق با توجه به ایجاد چند Mesh Block وجه مشترک بین دو مش بلاک‌ها به صورت Symmetry تعریف می‌گردد. برای ورودی جریان از شرط مرزی Volume flow rate استفاده شده است و برای بررسی پارامترهای هیدرولیکی جریان در هر شبیه‌سازی دبی ورودی به نرم افزار معرفی شده است. برای قسمت خروجی کانال شرایط مرزی Outflow بکار برده شده است. برای جداره‌ها و کف شبکه‌ی حل که نقش دیواره‌ها و کف کانال را ایفا می‌کنند از شرط مرزی Wall استفاده شده است برای مرز Z max نیز شرط مرزی Symmetry اعمال گردید (شکل ۴-ب). در پژوهش حاضر مدل آشفتگی RNG برای شبیه‌سازی مدل‌های تحقیق حاضر انتخاب گردید. از دلایل انتخاب این مدل می‌توان به مواردی همچون اطمینان‌پذیری در پاسخ‌گویی به مسائل گوناگون، حل دقیق معادلات، دقت بالا در نشان دادن جزئیات جریان و بررسی مطالعات پیشین اشاره نمود (Daneshfaraz et al. 2022b, 2023).

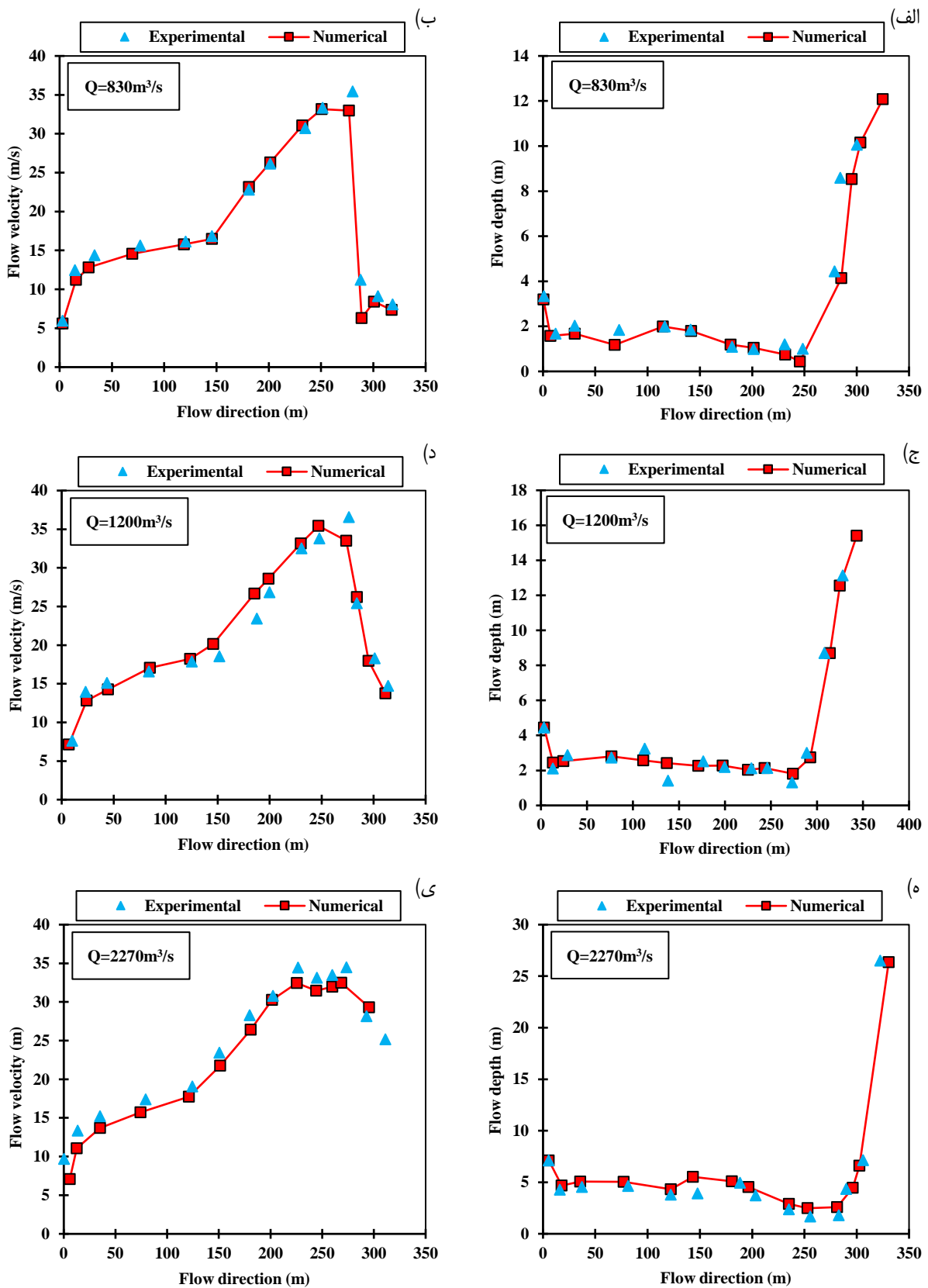


شکل ۴. الف) مش‌بندی مدل (ب) تعریف شرایط مرزی و اولیه به مدل

## نتایج و بحث

### صحت‌سنجی مدل‌ها

اولین گام در یک مدل عددی جهت استخراج نتایج، کالیبره کردن مدل است. بدین معنی که تأثیرات عوامل خارجی به حداقل رسیده و شرایط مدل عددی به شرایط مدل آزمایشگاهی یا واقعی نزدیک‌تر گردد. برای اینکه از اعتبار محاسبات مدل عددی اطمینان حاصل گردد باید نتایج حاصل از مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی مطابقت داده شود. اگر خطا در حد قابل قبولی باشد می‌توان از نتایج مدل عددی استفاده نمود. پس از لحاظ کردن شرایط مختلف، نتایج حاصل از مدل عددی با نتایج موجود مدل آزمایشگاهی مقایسه شده و در صورت وجود اختلاف معقول، مدل کالیبره شده محسوب شده و می‌توان از نتایج آن استفاده نمود (Hassanzadeh and Abbaszadeh, 2023; Abbaszadeh et al. 2024). در پژوهش حاضر برای صحت‌سنجی مدل عددی، از نتایج عمق در دبی‌های ورودی ۸۳۰، ۱۲۰۰ و ۲۲۷۰ مترمکعب بر ثانیه که از آزمایش‌های مدل هیدرولیکی سرریز سد نالزو استخراج شده است بهره برده شد. شکل (۵) روند تغییرات عمق و سرعت جریان حاصل از نتایج عددی و آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.



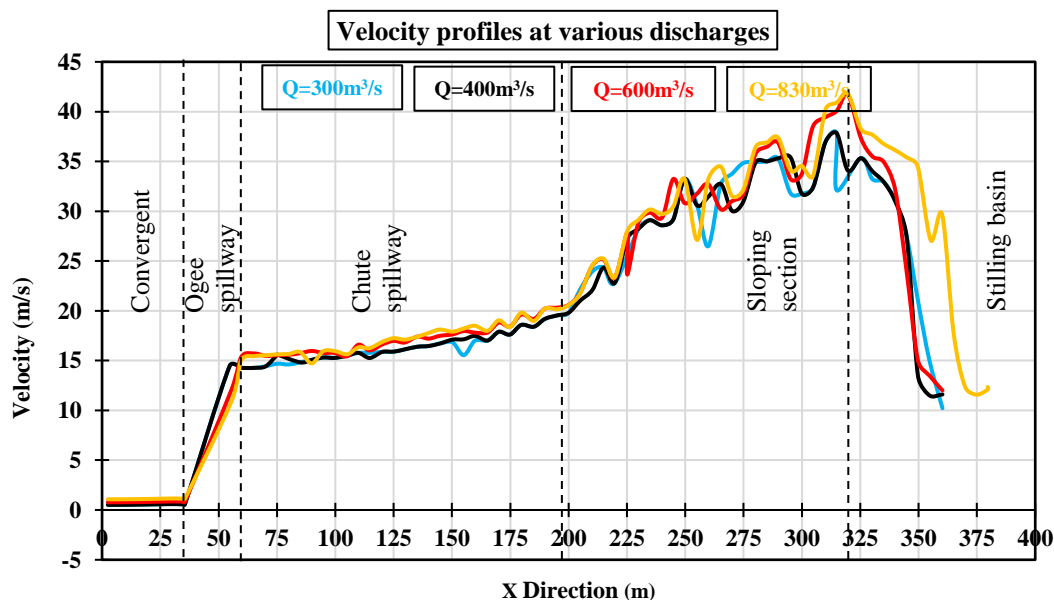
شکل ۵. تغییرات عمق و سرعت جریان در دبی‌های مختلف

در ادامه به بررسی مشخصات هیدرولیکی جریان از جمله پروفیل‌های سرعت، فشار و اندیس کاویتاسیون بر روی کف (وسط مجرا در راستای طولی) و دیواره‌های سرریز در مقاطع مختلف به‌ازای دبی‌های ورودی ۳۰۰ (کم‌ترین مقدار دبی)، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۳۰ (دبی سیلاب

۱۰۰۰۰، ۱۰۰۰۰، ۱۲۰۰، ۱۴۰۰، ۱۶۰۰، ۱۸۰۰، ۲۰۰۰، ۲۲۷۰ (حداکثر دبی محتمل P.M.F) مترمکعب بر ثانیه پرداخته شده و نهایتاً برای شرایط احتمال وقوع پدیده کویتاسیون راهکارهای مناسب جهت پیشگیری ارائه شده است.

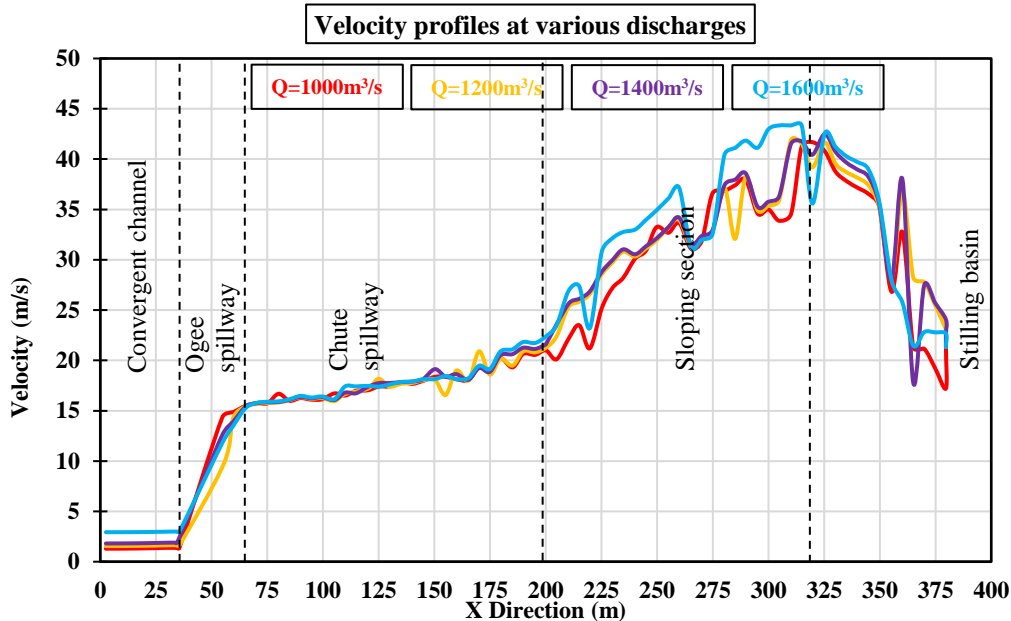
### بررسی تغییرات سرعت جریان در راستای طولی سرریز به‌ازای دبی‌های مختلف ورودی

شکل (۶) نشانگر پروفیل‌های سرعت جریان به‌ازای دبی‌های ورودی ۳۰۰ (دبی مینیمم طراحی)، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۳۰ (دبی سیلاب ۱۰۰۰۰) مترمکعب بر ثانیه در وسط سرریز در امتداد طولی جریان می‌باشد. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که با حرکت جریان از بالادست به‌سمت پائین‌دست سرریز، انرژی استاتیکی جریان به انرژی دینامیکی تبدیل شده و سرعت جریان افزایش پیدا کرده است به‌طوری که سرعت جریان در قسمت ورودی کانال (۰-۴۰ متری از دهانه سرریز) به‌دلیل دارا بودن شیب ثابت، یکنواخت بوده، سپس با عبور از روی سرریز اوجی (۴۰-۶۵ متری از دهانه سرریز) به‌دلیل افزایش شیب کف سرریز، سرعت جریان افزایش شدیدی پیدا کرده است. در ادامه با ورود جریان به قسمت سرریز شوت (۶۰-۲۰۰ متری از دهانه ورودی سرریز) سرعت جریان با شیب ملایم افزایش پیدا کرده و با ورود به قسمت تندآب (۲۰۰-۳۲۰ متری از دهانه سرریز) به‌دلیل شیب بالای تند آب افزایش شدیدی به خود شاهد بوده است. نهایتاً با ورود به حوضچه آرامش (۳۲۰ متری تا ۳۸۰ متری از دهانه ورودی سرریز) انرژی دینامیکی جریان در این قسمت مستهلک گردیده و سرعت جریان کاهش پیدا کرده است. با مقایسه مقادیر به‌دست آمده برای سرعت جریان به‌ازای دبی‌های مختلف ورودی مشاهده گردید که سرعت جریان به‌ازای دبی ۳۰۰ مترمکعب بر ثانیه در قسمت ورودی کانال ۰/۵۲ متر بر ثانیه است که این مقدار برای دبی‌های ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۳۰ مترمکعب بر ثانیه به‌ترتیب ۰/۵۸، ۰/۸۵ و ۱/۰۷ متر بر ثانیه حاصل گردید. با عبور جریان از روی سرریز اوجی، سرعت جریان به‌ترتیب به مقادیر ۱۴/۴۹، ۱۴/۷۳، ۱۵/۳۸، ۱۵/۵۲ متر بر ثانیه افزایش پیدا کرده و در قسمت سرریز شوت سرعت جریان به روند افزایشی خود ادامه داده و به مقادیر ۱۹/۸۱، ۱۹/۹۲، ۲۰/۳۲ و ۲۰/۵۸ رسید. قسمت تندآب که بیشترین شیب مجرا مربوط به این قسمت می‌باشد و حداکثر مقادیر سرعت در این قسمت مشاهده می‌شود. به‌ازای دبی‌های مذکور، سرعت جریان به‌ترتیب ۳۴/۲۵، ۳۵/۲، ۳۸/۴۲ و ۴۱/۸۰ متر بر ثانیه حاصل گردید. نهایتاً انرژی دینامیکی جریان در حوضچه آرامش مستهلک شده و سرعت جریان به مقادیری بین ۱۰/۲۲ تا ۱۱/۵۸ محدود می‌گردد.



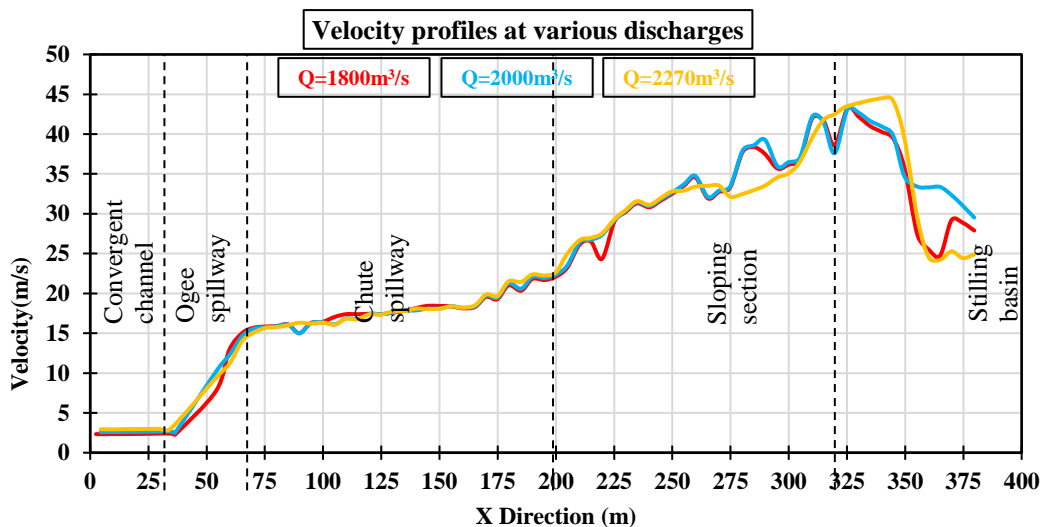
شکل ۶. پروفیل‌های سرعت جریان در راستای طولی سرریز به‌ازای دبی‌های مختلف

با بررسی مقادیر سرعت جریان به‌ازای دبی‌های ورودی ۱۰۰۰، ۱۲۰۰، ۱۴۰۰ و ۱۶۰۰ مترمکعب بر ثانیه در راستای طولی سرریز در شکل (۷) مشاهده گردید که مقادیر این پارامتر در قسمت کانال همگرا بین ۱/۲۹ تا ۲/۹۳ متر بر ثانیه متغیر می‌باشد. به‌طوری که با افزایش دبی جریان سرعت جریان نیز افزایش می‌یابد. در قسمت سرریز اوجی مقادیر سرعت جریان به‌ترتیب برای دبی‌های مذکور ۱۵/۸۰، ۱۵/۹۱ و ۱۶/۱۰ متر بر ثانیه به‌دست آمد. همچنین در قسمت سرریز شوت روند افزایشی سرعت جریان ادامه داشته و مقادیر ۲۰/۹۹، ۲۱/۲۶، ۲۱/۶۴ و ۲۲/۳۹ متر بر ثانیه حاصل گردید. قسمت تندآب که حداکثر سرعت جریان در این قسمت رخ می‌دهد به مقادیر ۴۱/۶۹، ۴۱/۹۰ و ۴۲/۴۹ متر بر ثانیه رسید. و نهایتاً سرعت جریان در قسمت حوضچه آرامش مقادیر کاهش یافته و در محدوده ۱۷/۲۱ تا



شکل ۷. پروفیل‌های سرعت جریان در راستای طولی سرریز به‌ازای دبی‌های مختلف

بررسی نتایج سرعت جریان در شکل (۸) به‌ازای دبی‌های ورودی ۱۸۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۲۷۰ مترمکعب بر ثانیه در راستای طولی سرریز نشان داد که حداکثر مقدار این پارامتر در دبی ۲۲۷۰ مترمکعب بر ثانیه در قسمت تندآب رخ می‌دهد. با توجه به نتایج به‌دست آمده سرعت جریان در قسمت کانال همگرا به‌ازای دبی‌های مذکور بین ۲/۳۵ تا ۳/۰۱ متر بر ثانیه متغیر بوده، سپس با ورود به قسمت اوجی افزایش یافته و به‌ترتیب به مقادیر ۱۶/۱۲، ۱۶/۱۶ و ۱۶/۲۸ متر بر ثانیه می‌رسد. در قسمت سرریز شوت سرعت جریان با شیب ملایم‌تری نسبت به قسمت تندآب و سرریز اوجی به افزایش خود ادامه داده و به مقادیر ۲۲/۱۲، ۲۳/۴۸ و ۲۴/۹۷ متر بر ثانیه می‌رسد. قسمت تند آب که دارای شیب کف تندتری نسبت به دیگر مناطق بوده و از طول بیشتری بهره‌مند است. سرعت جریان در این قسمت شاهد حداکثر مقدار خود می‌باشد به‌طوری که مقادیر سرعت جریان به‌ترتیب ۴۳/۲۲، ۴۴/۱۶ و ۴۴/۹۰ متر بر ثانیه در انتهای تندآب به‌دست آمد. نهایتاً با ورود آب به قسمت حوضچه آرامش سرعت جریان کاهش یافته و به‌ترتیب به مقادیر ۲۰/۲۰، ۲۳/۱۰ و ۲۴/۸۹ می‌رسد.



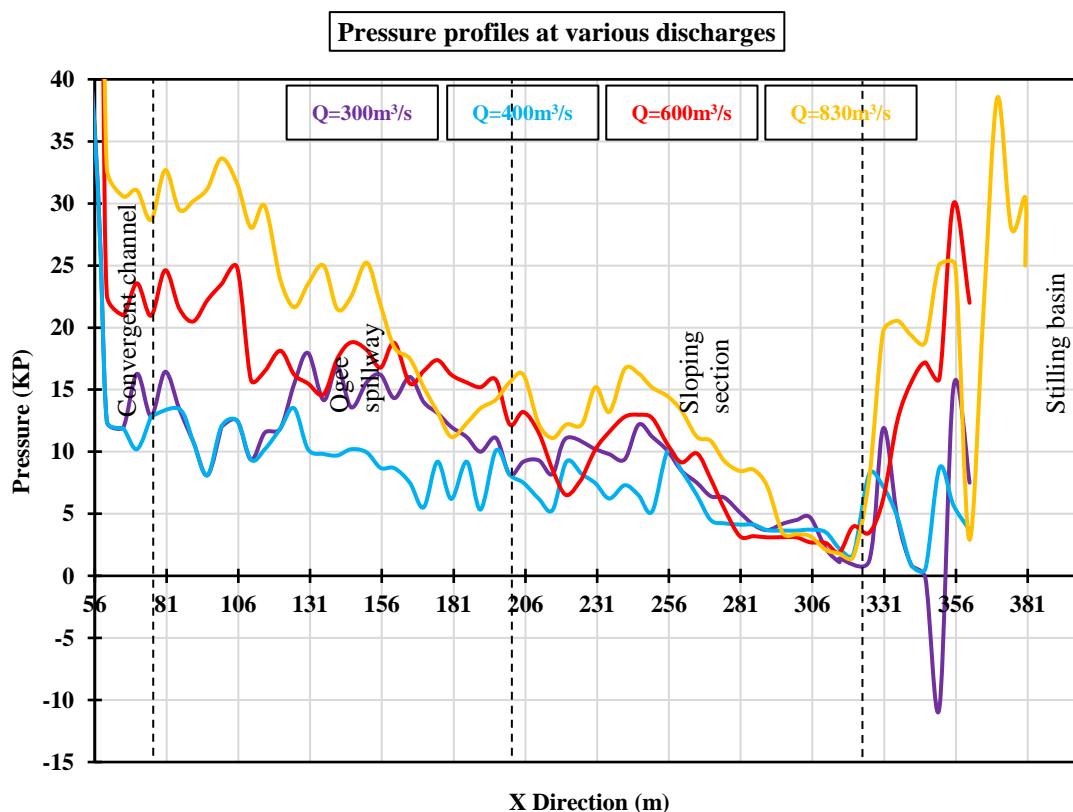
شکل ۸. پروفیل‌های سرعت جریان در راستای طولی سرریز به‌ازای دبی‌های مختلف

با توجه به اینکه مقادیر به‌دست آمده برای سرعت جریان در قسمت تندآب بیشتر از ۳۰ متر بر ثانیه است بنابراین وقوع پدیده کاویتاسیون در این قسمت محتمل بوده و ضروری است که مقادیر فشار جریان جهت پیش‌بینی وقوع پدیده کاویتاسیون در طول مجرا بررسی گردد.



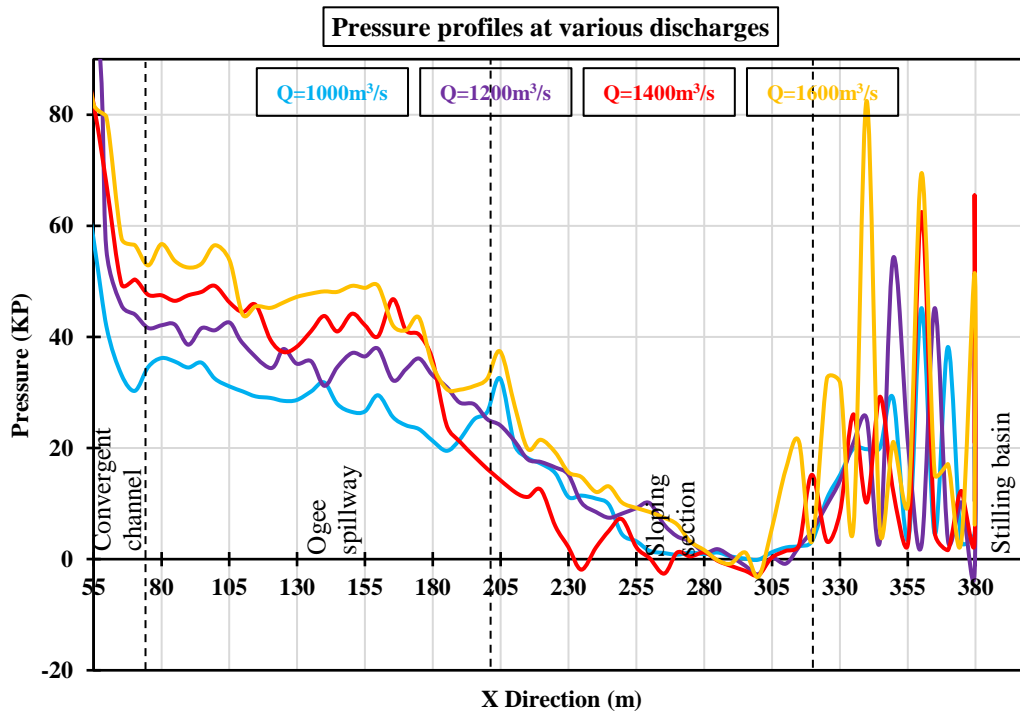
### بررسی تغییرات فشار جریان در راستای طولی سرریز به‌ازای دبی‌های مختلف ورودی

با بررسی نتایج به‌دست آمده برای مقادیر فشار بر روی کف سرریز در راستای طولی مشاهده گردید که در حالت کلی با حرکت از بالادست سرریز به سمت پائین‌دست، مقدار فشار جریان کاهش می‌یابد. همچنین با ورود جریان به داخل حوضچه آرامش به دلیل وجود آشفتگی بالای جریان، فشار جریان دارای نوسانات بیشتری است. همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌گردد با حرکت از روی سرریز اوجی به سمت انتهای تندآب، مقادیر فشار به‌ازای دبی‌های ورودی ۳۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۳۰ مترمکعب بر ثانیه به‌ترتیب از مقدار ۳۸/۵، ۱/۲۳، ۳۸/۲۰ به ۱/۷۲، ۶۳/۸۰، ۱/۸۹ و ۷۷/۲۵ به ۱/۵۲ کیلو پاسکال کاهش یافته است. همچنین در داخل حوضچه آرامش کم‌ترین و بیشترین مقدار فشار به‌ترتیب ۱۰/۶۳- کیلو پاسکال برای دبی ۳۰۰ مترمکعب بر ثانیه و ۳۸/۵۰ کیلو پاسکال برای دبی ۸۳۰ مترمکعب بر ثانیه حاصل گردید.



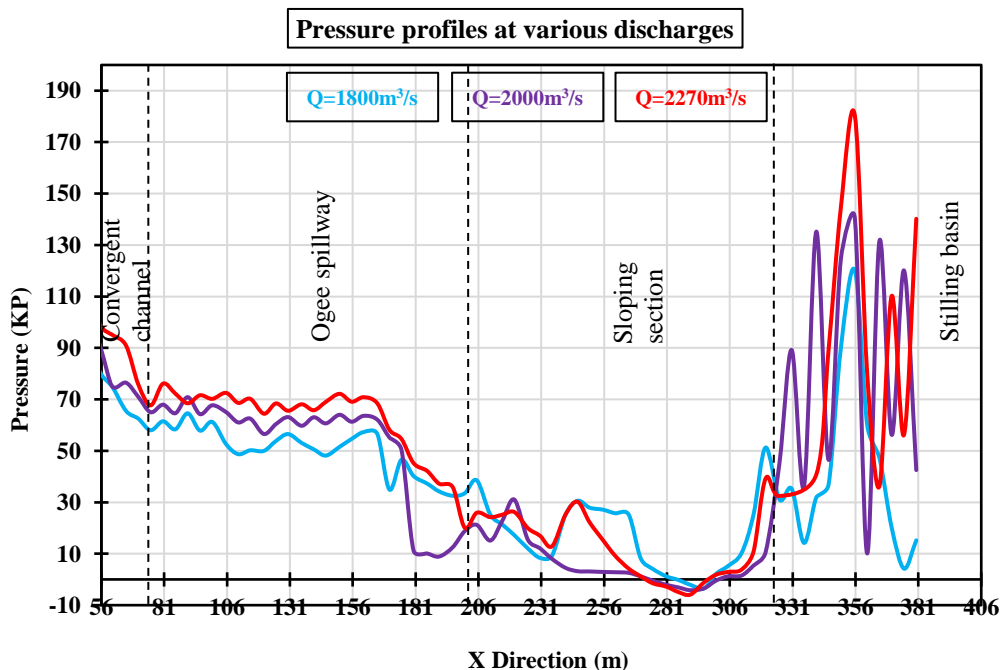
شکل ۹. پروفیل‌های فشار جریان در راستای طولی سرریز به‌ازای دبی‌های مختلف

نتایج به‌دست آمده برای فشار جریان به‌ازای دبی‌های ورودی ۱۰۰۰، ۱۲۰۰، ۱۴۰۰ و ۱۶۰۰ مترمکعب بر ثانیه در شکل (۱۰) نشان داد در قسمت‌هایی که سرعت جریان و متعاقباً آشفتگی جریان کمتر است، فشار جریان غالباً به‌صورت هیدرواستاتیکی بوده و با افزایش دبی، عمق جریان افزایش یافته و به‌تبع آن میزان فشار جریان افزایش می‌یابد که این امر در قسمت‌های سرریز اوجی و سرریز شوت قابل مشاهده است. اما با افزایش سرعت و آشفتگی جریان به خصوص در قسمت تندآب و حوضچه آرامش میزان نوسانات فشار جریان بیشتر بوده و پارامتر دیگری به نام فشار دینامیکی در تعیین روند این پارامتر دخیل می‌باشد. نتایج نشان داد که حداکثر و حداقل مقدار این پارامتر از سرریز اوجی تا انتهای تندآب به‌ازای دبی‌های ورودی مذکور به‌ترتیب ۱۳۲/۵۴ و ۰/۱-، ۱۴۳/۱۵ و ۲/۷-، ۱۵۳/۰۸ و ۲/۹- و ۱۶۲/۲۷ و ۳/۲- است که در حالت کلی با حرکت از سمت بالادست به سمت پائین‌دست کاهش می‌یابد. در حوضچه آرامش نیز نوسانات فشار به دلیل آشفتگی بالا بیشتر بوده و بین مقادیر ۸۲/۵ تا ۱/۲- متغیر است.



شکل ۱۰. پروفیل‌های فشار جریان در راستای طولی سرریز به‌ازای دبی‌های مختلف

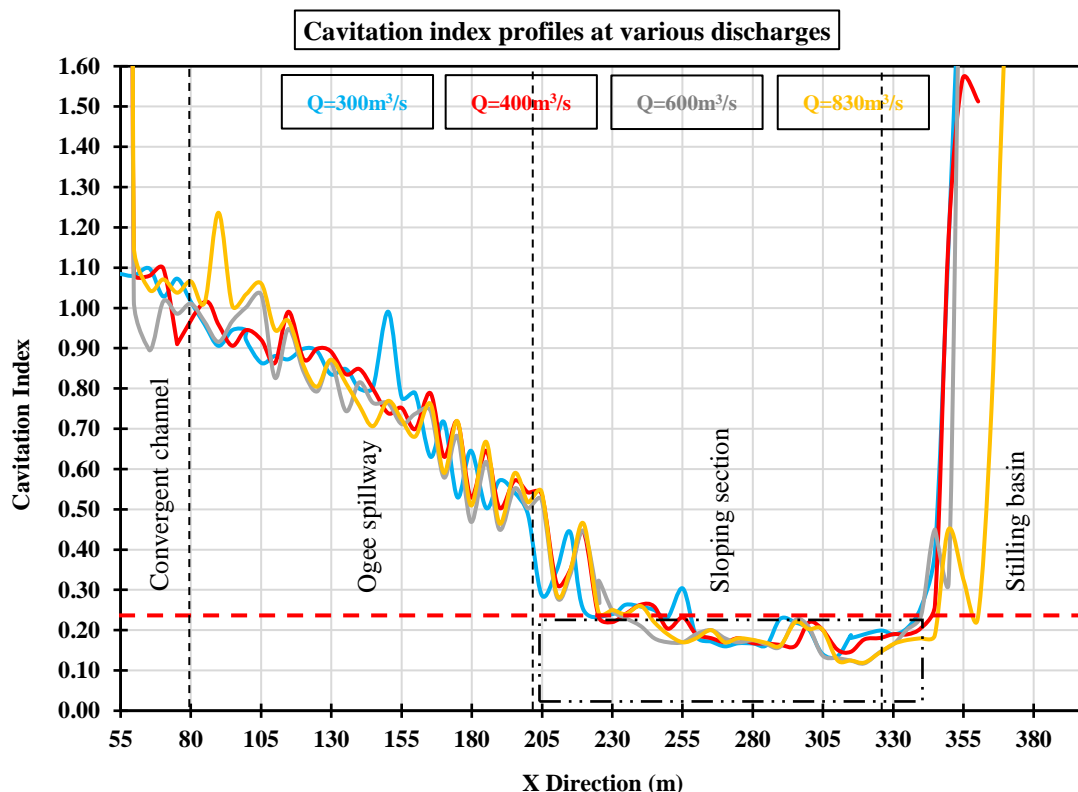
نتایج به‌دست آمده برای فشار جریان به‌ازای دبی‌های ورودی ۱۸۰۰، ۲۰۰۰، و ۲۲۷۰ مترمکعب بر ثانیه در شکل (۱۱) نشان داد که فشار جریان به‌ازای دبی‌های مذکور از سرریز اوجی تا انتهای تندآب با کاهش ۸۴/۵، ۹۵/۲ و ۱۰۵/۷۵ کیلو پاسکال روبرو است. به‌طوری که بیشترین مقدار فشار در ابتدای سرریز اوجی به‌ترتیب ۸۱/۵، ۹۱/۲ و ۹۹/۳۳ کیلو پاسکال و کم‌ترین مقدار فشار در انتهای تندآب ۳/۵-، ۴/۵- و ۵/۹- به‌دست آمد. همچنین با افزایش دبی جریان میزان نوسانات فشار جریان در قسمت حوضچه آرامش افزایش یافت به‌طوری که این تغییرات در حوضچه آرامش بین ۲/۴ و ۱۸۰/۲۲ کیلو پاسکال به‌دست آمد.



شکل ۱۱. پروفیل‌های فشار جریان در راستای طولی سرریز به‌ازای دبی‌های مختلف

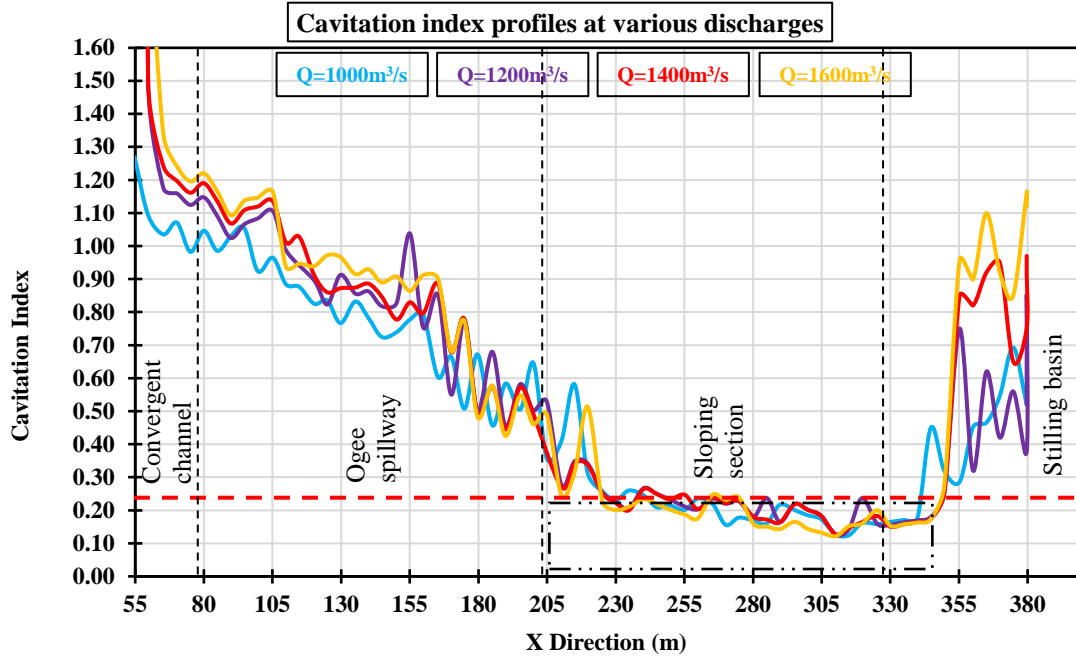
### بررسی تغییرات اندیس کاویتاسیون در راستای طولی کف سرریز به‌ازای دبی‌های مختلف ورودی

با توجه به معادله برنولی، با افزایش سرعت جریان، فشار وارد بر سطح کاهش می‌یابد. از طرفی با کاهش فشار جریان به کم‌تر از مقدار فشار بخار احتمال وقوع کاویتاسیون افزایش می‌یابد. بنابراین در سرریز سدها با حرکت جریان از بالادست به سمت پائین‌دست سرعت جریان افزایش یافته و متعاقباً فشار جریان کاهش می‌یابد. به‌منظور پیشگیری از وقوع پدیده مخرب کاویتاسیون بررسی مقادیر فشار حائز اهمیت است. در ادامه به بررسی اندیس کاویتاسیون بر روی کف و دیواره‌های سرریز به‌ازای دبی‌های ورودی مختلف پرداخته شده است. شکل (۱۲) نشانگر مقادیر اندیس کاویتاسیون در راستای طولی کف سرریز از ابتدای سرریز اوجی تا انتهای حوضچه آرامش به‌ازای دبی‌های ورودی ۳۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۳۰ مترمکعب بر ثانیه است. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که مجرای سرریز در تمامی دبی‌های مذکور حتی در دبی حداقل طراحی با پدیده کاویتاسیون در انتهای تندآب و ابتدای حوضچه آرامش مواجه می‌باشد. به‌طوری‌که به‌ازای دبی‌های ۳۰۰ و ۴۰۰ مترمکعب بر ثانیه، اندیس کاویتاسیون از مقطع ۲۶۰ متری تا مقطع ۳۳۵ متری از دهانه سرریز به کم‌تر از مقدار بحرانی ۰/۲ کاهش می‌یابد. همچنین به‌ازای دبی‌های ۶۰۰ و ۸۳۰ مترمکعب بر ثانیه، کف مجرای سرریز از مقطع ۲۴۰ متری تا ۳۴۰ متری از دهانه سرریز با وقوع پدیده کاویتاسیون روبرو است. حداقل مقدار اندیس کاویتاسیون ۰/۱۳ در مقطع ۳۲۰ متری از دهانه سرریز در انتهای تندآب به‌ازای دبی ۸۳۰ مترمکعب حاصل گردید. لازم به ذکر است قسمت کانال همگرا به‌دلیل داشتن سرعت جریان کم و متعاقباً فشار و اندیس کاویتاسیون بالا در این بخش مورد بررسی قرار نگرفت.



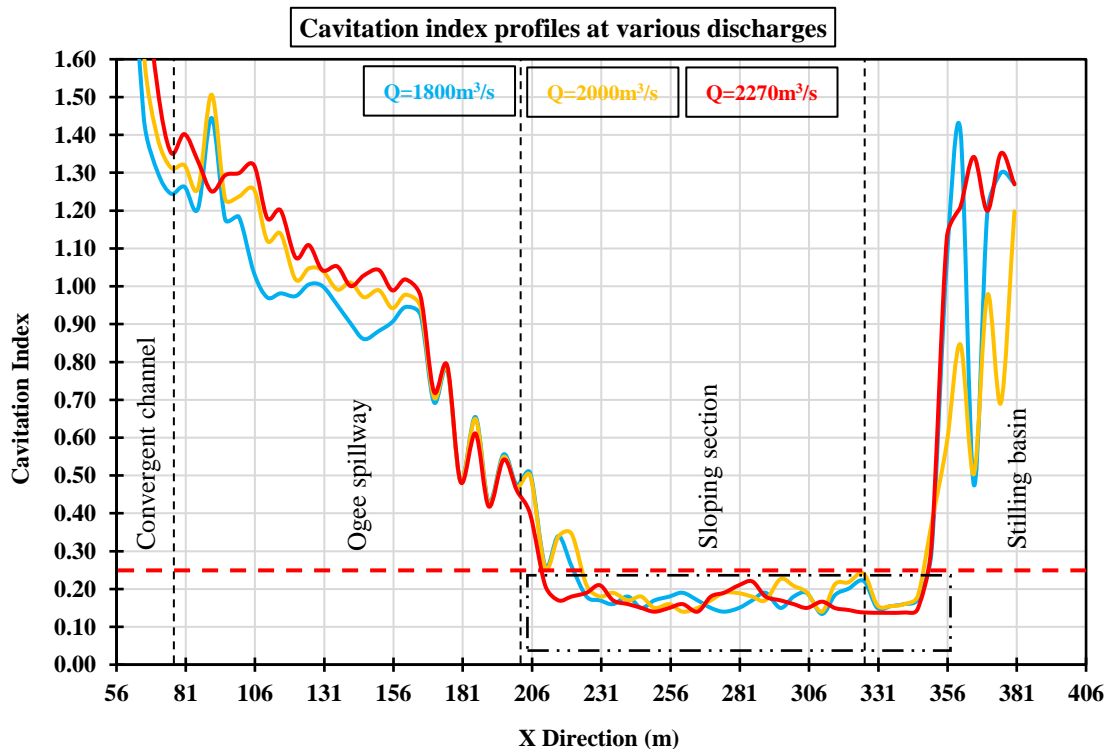
شکل ۱۲. پروفیل‌های اندیس کاویتاسیون در راستای طولی سرریز به‌ازای دبی‌های مختلف

نتایج به دست آمده در شکل (۱۳) برای مقادیر اندیس کاویتاسیون به‌ازای دبی‌های ورودی ۱۰۰۰، ۱۲۰۰، ۱۴۰۰ و ۱۶۰۰ مترمکعب بر ثانیه در راستای طولی کف مجرا نشان داد که با افزایش دبی جریان قسمت بیشتری از تندآب با وقوع پدیده کاویتاسیون مواجه می‌گردد به‌طوری‌که مقادیر این اندیس از مقطع ۲۲۵ متر تا ۳۴۵ متری برای دبی ۱۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه و از مقطع ۲۲۵ متر تا ۳۵۰ متری از دهانه سرریز برای دبی‌های دیگر به کم‌تر از ۰/۲ کاهش یافته است. همچنین کم‌ترین مقدار اندیس کاویتاسیون در قسمت تندآب ۰/۱۲ و در قسمت حوضچه آرامش ۰/۱۷ به‌ازای دبی ۱۶۰۰ مترمکعب بر ثانیه حاصل گردید که با حرکت به سمت انتهای حوضچه آرامش به‌دلیل استهلاک انرژی، سرعت جریان کاهش و اندیس کاویتاسیون افزایش می‌یابد.



شکل ۱۳. پروفیل‌های اندیس کاویتاسیون در راستای طولی سرریز به‌ازای دبی‌های مختلف

با افزایش دبی جریان به ۱۸۰۰، ۲۰۰۰ و حداکثر دبی محتمل P.M.F (۲۲۷۰ مترمکعب بر ثانیه)، نتایج به‌دست آمده برای اندیس کاویتاسیون در شکل (۱۴) در راستای طولی کف از ابتدای سرریز اوجی تا انتهای حوضچه آرامش نشان داد که به‌ازای دبی‌های ۱۸۰۰ و ۲۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه مقدار اندیس کاویتاسیون از مقطع ۲۲۵ متری تا ۳۴۵ متری از دهانه سرریز به کم‌تر از ۰/۲ می‌رسد این درحالی است که به‌ازای دبی ۲۲۷۰ مترمکعب بر ثانیه این مقدار از مقطع ۲۱۰ متری از دهانه سرریز رخ می‌دهد. با توجه به نتایج به‌دست آمده کم‌ترین مقدار اندیس کاویتاسیون ۰/۱۵ به‌ازای دبی ۲۲۷۰ در انتهای تندآب و قسمت ابتدایی حوضچه آرامش رخ داد.



شکل ۱۴. پروفیل‌های اندیس کاویتاسیون در راستای طولی سرریز به‌ازای دبی‌های مختلف

## نتیجه گیری

- بررسی مقادیر سرعت جریان در امتداد طولی سرریز به‌ازای دبی‌های ورودی مختلف نشان داد که:
- در قسمت کانال همگرا به‌دلیل شیب کم کف، سرعت جریان تقریباً یکنواخت بوده و با حرکت از سمت بالادست به‌سمت پائین‌دست، انرژی استاتیکی جریان به انرژی دینامیکی تبدیل گردید. با توجه به سرعت کم جریان در قسمت کانال همگرا، مقادیر فشار جریان از نوع هیدرواستاتیکی است و با افزایش دبی جریان (عمق جریان) فشار جریان افزایش می‌یابد.
  - با عبور جریان از روی سرریز اوجی و شوت به‌دلیل افزایش شیب کف سرعت جریان افزایش و به‌تبع آن، مطابق معادله انرژی، فشار کاهش یافت.
  - به‌دلیل شیب تند قسمت تندآب و ارتفاع بالای ۱۰۰ متری سد از بستر رودخانه، با ورود جریان به این قسمت، سرعت جریان افزایش، و فشار کاهش چشم‌گیری به‌خود می‌گیرند، به‌طوری که در بخش‌های انتهایی تندآب، سرعت جریان به حد اکثر تا حدود ۴۴/۹ متر بر ثانیه و فشار به حداقل تا ۵/۹- کیلو پاسکال نیز می‌رسند.
  - با ورود جریان به قسمت حوضچه آرامش سرعت جریان کاهش یافته و انرژی دینامیکی جریان مستهلک می‌گردد. به‌طوری که به‌ازای دبی ۳۰۰ مترمکعب بر ثانیه، سرعت جریان از ۳۴/۲۵ به ۱۰/۲۲ متر بر ثانیه و به‌ازای دبی ۲۲۷۰ مترمکعب بر ثانیه از ۴۴/۱۶ به ۲۴/۸۹ متر بر ثانیه کاهش پیدا کرد. به‌دلیل آشفتگی جریان در اثر رخداد پرش هیدرولیکی و تبدیل بخشی از انرژی سرعتی به انرژی فشاری، در این قسمت، مقادیر فشار دارای نوسانات بیشتری است، به‌طوری که کم‌ترین مقدار فشار برابر با ۱۰/۶۳- به‌ازای دبی ۳۰۰ مترمکعب بر ثانیه و بیشترین فشار برابر با ۱۸۰/۲۰ کیلو پاسکال به‌ازای دبی ۲۲۷۰ مترمکعب بر ثانیه حاصل گردید.

بررسی مقادیر اندیس کاویتاسیون بر روی کف سرریز نشان داد که:

- کف مجرا به‌ازای تمامی دبی‌های ورودی حتی دبی مینیم طراحی در قسمت‌های انتهایی تندآب با وقوع پدیده کاویتاسیون روبرو است.
- برای اندیس کاویتاسیون در راستای طولی کف مجرا به‌ازای دبی‌های ۳۰۰ و ۴۰۰ مترمکعب بر ثانیه، اندیس این پارامتر از مقطع ۲۶۰ متری تا مقطع ۳۳۵ متری از دهانه سرریز به کم‌تر از ۰/۲ کاهش می‌یابد.
- با افزایش دبی جریان، وقوع پدیده کاویتاسیون در بالادست تندآب افزایش می‌یابد به‌طوری که به‌ازای دبی‌های ۶۰۰ و ۸۳۰ مترمکعب بر ثانیه از مقطع ۲۴۰ متر تا ۳۴۰ متری، به‌ازای دبی‌های ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه از مقطع ۲۲۵ متر تا ۳۵۰ متری و نهایتاً به‌ازای دبی ۲۲۷۰ مترمکعب بر ثانیه از مقطع ۲۱۰ متری تا ۳۵۰ دهانه سرریز با وقوع پدیده کاویتاسیون روبرو است.
- قسمت‌های انتهایی تندآب و ابتدایی حوضچه آرامش به‌ازای تمامی دبی‌های مختلف ورودی، با وقوع پدیده کاویتاسیون روبرو می‌باشند و مقدار اندیس کاویتاسیون به ۰/۱۴ کاهش می‌یابد. این درحالی است که قسمت انتهایی حوضچه آرامش به‌ازای دبی‌های ورودی ۳۰۰ و ۴۰۰ مترمکعب بر ثانیه از وقوع این پدیده در امان می‌باشند.
- با توجه به نتایج به‌دست آمده برای سرعت و فشار جریان می‌توان نتیجه گرفت با افزایش سرعت جریان به بیش از ۳۰ متر بر ثانیه، فشار جریان کاهش بیشتری داشته و وقوع پدیده کاویتاسیون در مجرا محتمل می‌باشد. مقادیر اندیس کاویتاسیون نشان داد که وقوع کاویتاسیون در قسمت‌های انتهایی تندآب و ابتدای حوضچه آرامش بسیار زیاد است. جهت جلوگیری از وقوع این پدیده، روش هوادهی جریان از کف و دیواره‌های مجرا قبل از مقطع ۲۱۰ متری پیشنهاد می‌گردد. با تزریق هوا به داخل جریان، هوا به‌عنوان بالشک بین سطح جریان و مجرا عمل کرده و با افزایش فشار جریان، از بخار شدن آب و متعاقباً وقوع پدیده مخرب کاویتاسیون جلوگیری کند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

## منابع

- بی‌نام، (۱۳۸۶). گزارش نهایی مطالعات مدل هیدرولیکی سیستم تخلیه سیلاب سد نازلو، موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو، تهران، ایران.
- پیروباقی، س؛ خلیل زاده، ق و حسن زاده، ی (۱۴۰۱). بررسی عددی پدیده کاویتاسیون در سرریز سد آغ‌چای به روش VOF و نرم‌افزار Flow-3D. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، ۵۲(۴)، ۱۳۵-۱۴۴.



حسن زاده وایقان، و؛ حسن‌زاده، ی؛ حسین‌زاده دلیر، ع و عبدی کردانی، الف (۱۳۹۴). بررسی پدیده کاویتاسیون روی سرریز سد ونیار با استفاده از مدل عددی FLUENT. *پژوهش آب ایران*، ۹(۳)، ۱۷۷-۱۸۰.

## REFERENCES

- Abbaszadeh, H., Norouzi, R., Sume, V., Kuriqi, A., Daneshfaraz, R., & Abraham, J. (2023). Sill role effect on the flow characteristics (experimental and regression model analytical). *Fluids*, 8(8), 235.
- Abbaszadeh, H., Daneshfaraz, R., Sume, V., & Abraham, J. (2024). Experimental investigation and application of soft computing models for predicting flow energy loss in arc-shaped constrictions. *AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 73(3), 637-661.
- Anonymous, (2007). The final report of studies on the hydraulic model of the Nazlo Dam flood discharge system. Water Research Institute of Energy Ministry, Tehran, Iran
- Chakib, B. (2013). Numerical computation of inception point location for flat-sloped stepped spillway. *International Journal of Hydraulic Engineering*, 2(3), 47-52.
- Chanson, H. (1997). Measuring air-water interface area in supercritical open channel flow. *Water research*, 31(6), 1414-1420.
- Chen, Q., Dai, G., & Liu, H. (2002). Volume of fluid model for turbulence numerical simulation of stepped spillway overflow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(7), 683-688.
- Chinnarasri, C., Kositgittiwong, D., & Julien, P. Y. (2014, March). Model of flow over spillways by computational fluid dynamics. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, 167(3), 164-175.
- Daneshfaraz, R., Norouzi, R., Abbaszadeh, H., Kuriqi, A., & Di Francesco, S. (2022a). Influence of sill on the hydraulic regime in sluice gates: an experimental and numerical analysis. *Fluids*, 7(7), 244.
- Daneshfaraz, R., Norouzi, R., & Ebadzadeh, P. (2022b). Experimental and numerical study of sluice gate flow pattern with non-suppressed sill and its effect on discharge coefficient in free-flow conditions. *Journal of Hydraulic Structures*, 8(1), 1-20.
- Daneshfaraz R, Norouzi R, Ebadzadeh P, Kuriqi A, (2023). Influence of sill integration in labyrinth sluice gate hydraulic performance. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(4), 118.
- Dargahi, B. (2006). Experimental study and 3D numerical simulations for a free-overflow spillway. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(9), 899-907.
- Dong, Z. Y., Chen, L., & Ju, W. J. (2007). Cavitation characteristics of high velocity flow with and without aeration on the order of 50 m/s. *Journal of Hydrodynamics*, 19(4), 429-433.
- Eghbalzadeh, A., & Javan, M. (2012). Comparison of mixture and VOF models for numerical simulation of air-entrainment in skimming flow over stepped spillways. *Procedia engineering*, 28, 657-660.
- Falvey, H. T. (1990). *Cavitation in chutes and spillways. Engineering Monograph 42*. Water Resources Technical Publication. US Printing Office. Bureau of Reclamation. Denver.
- Hasanzadeh Vaighan, V., Hasanzadeh, Y., Hasan Zadeh Dalir, A., & Abdi Kardani, A. (2015). Investigation of cavitation phenomenon on Vanyar dam's spillway using the FLUENT numerical model. *Iranian Water Researches Journal*, 9(3), 177-180. (in Persian)
- Hassanzadeh, Y., & Abbaszadeh, H. (2023). Investigating discharge coefficient of slide gate-sill combination using expert soft computing models. *Journal of Hydraulic Structures*, 9(1), 63-80.
- Hassanzadeh, Y., Abbaszadeh, H., Abedi, A., & Abraham, J. (2024). Numerical simulation of the effect of downstream material on scouring-sediment profile of combined spillway-gate. *AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, jws2024360.
- Jamali, T., Manafpour, M., & Ebrahimnezhadian, H. (2023). Evolution of pressure and cavitation in transition region walls for supercritical flow. *AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 72(1), 62-82.
- Jan, C. D., Chang, C. J., Lai, J. S., & Guo, W. D. (2009). Characteristics of Hydraulic Shock Waves in an Inclined Chute Contraction-Experiments. *Journal of Mechanics*, 25(2), 129-136.
- Kermani, E. F., Barani, G. A., & Ghaeini-Hessaroeyeh, M. (2013). Investigation of cavitation damage levels on spillways. *World Applied Sciences Journal*, 21(1), 73-78.
- Luna-Bahena, J. C., Pozos-Estrada, O., Ortiz-Martínez, V. M., & Gracia-Sánchez, J. (2018). Experimental investigation of artificial aeration on a smooth spillway with a crest pier. *Water*, 10(10), 1383.
- Pfister, M. (2011). Chute aerators: Steep deflectors and cavity subpressure. *Journal of hydraulic engineering*, 137(10), 1208-1215.
- Pfister, M., & Hager, W. H. (2010). Chute aerators. I: Air transport characteristics. *Journal of Hydraulic Engineering*, 136(6), 352-359.



- Pfister, M., Lucas, J., & Hager, W. H. (2011). Chute aerators: preaerated approach flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(11), 1452-1461.
- Pirboudaghi, S., Khalilzadeh, GH., & Hassanzadeh, Y. (2023). Numerical investigation of cavitation phenomenon in Aghchai dam spillway by VOF method and Flow-3D software. *Journal of Mechanical Engineering*, 52(4), 135-144. (in Persian)
- Ruan, S. P., Wu, J. H., Wu, W. W., & Xi, R. Z. (2007). Hydraulic research of aerators on tunnel spillways. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 19(3), 330-334.
- Süme, V., Daneshfaraz, R., Kerim, A., Abbaszadeh, H., & Abraham, J. (2024). Investigation of clean energy production in drinking water networks. *Water Resources Management*, 38(6), 2189-2208.
- Zhenwei, M. U., Zhiyan, Z., & Tao, Z. H. A. O. (2012). Numerical simulation of 3-D flow field of spillway based on VOF method. *Procedia Engineering*, 28, 808-812.