

Numerical Investigation of Flow Characteristics in Different Types of Chute Spillway Aerators

Fateme Safiloo, Farzin Salmasi* , Hadi Arvanagi, Akram Abbaspour

Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

ABSTRACT: Aeration of chute spillways, as an effective method for reducing erosive damage caused by cavitation, plays an important role in protecting chute structures. The degree of protection achieved through aeration largely depends on the design of the aerator and the distribution of air concentration within the flow. In the present study, the characteristics and performance of various chute aerators were simulated using Computational Fluid Dynamics (CFD) with the ANSYS Fluent software. The considered models included offset aerators, ramp aerators, combined ramp–offset aerators, as well as bottom and sidewall ramp aerators. For the hydraulic analysis of the flow, the RNG $k-\epsilon$ turbulence model and a multiphase flow approach were applied. The results revealed that the spacing between aerators in bottom and sidewall ramp aerators is greater than that of ramp, offset, and combined ramp–offset aerators. This is attributed to the formation of a cavity region along the bottom and sidewall, which enhances turbulence and promotes better air–water mixing within the flow. Moreover, the combination of bottom and sidewall ramps produced more effective aeration compared to other configurations. By forming cavity zones along both the bottom and sidewall, this configuration improves both the efficiency and uniformity of air concentration. In this case, the length of the cavity region was approximately 50% greater than that observed when using a bottom ramp alone.

Review History:

Received: Nov. 02, 2025
Revised: May, 09, 2026
Accepted: Jul. 05, 2026
Available Online: Jul. 17, 2026

Keywords:

Aerator
Bottom Ramp and Side Wall
Cavitation
Cavity Region Length
Turbulence Model

1- Introduction

Chute aerators are installed on the bottom or sidewalls of a spillway to prevent cavitation damage during a high-speed flood discharge. Typically, a combination of lateral and bottom aerators offers effective aeration protection near the chute wall by entraining air bubbles [1]. An aerator's effectiveness can be estimated by considering the air entrainment rate, which is influenced by factors such as the geometry of the aerator and the conditions of the discharge flow. There are three commonly utilized aerator geometries: (1) deflector, (2) offset, and (3) a combination of both. The introduction of air into the water flow primarily occurs through an air supply system connected to the open atmosphere. This system typically includes two lateral ducts and a transverse groove, enabling the transverse distribution of air beneath the water jet [2, 3]. The volume of air mixed into a flow serves as a measure of aeration efficiency. In laboratory experiments, Chanson [4] demonstrated that the demand for air is primarily influenced by the geometry of the aerator, the flow discharge, and the sub-pressure within the cavity. Following model tests on a bottom-inlet aerator with varying flow rates and angles (θ), Aydin [5] proposed empirical formulas to estimate air entrainment. Lian et al. [6]

assessed existing empirical methods for estimating air demand and developed a new predictive approach. Aydin and Ozturk [7] conducted a numerical study that showed computational fluid dynamics (CFD) modeling offers accurate predictions of air entrainment in aerators, aligning well with both field observations and empirical equations. Wei et al. [8] utilized a numerical model to simulate air demand in a tunnel aerator, achieving an average deviation of 25% from experimental results. Tullis and Larchar [9] examined how factors such as gate geometry, gate opening, water head, and tailwater submergence affect air demand.

2- Methodology

The dimensions of the solution domain consisted of a length of 5.0 m, a height of 0.45 m, and a width of 0.2 m. The aerator is located at a distance of 0.5 m from the upstream, and also, the numerical simulation data were validated using the experimental results Bai et al. [10]. The basis of all numerical methods in hydraulic engineering is the solution of the governing equations of flow, including the continuity equations and the momentum equations, which are known as the Navier-Stokes equations. For an incompressible flow with constant viscosity, these equations are written in the form of

*Corresponding author's email: salmasi@tabrizu.ac.ir

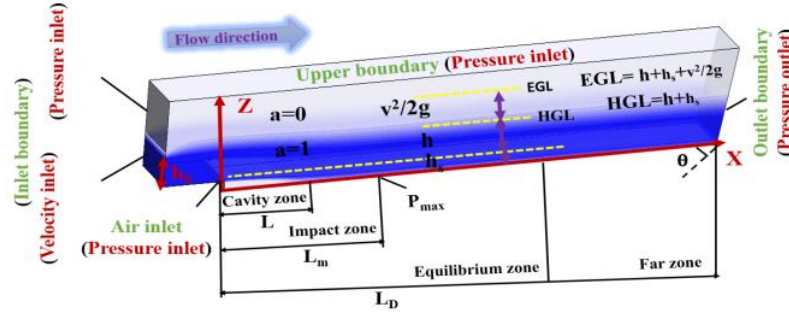


Fig. 1. Apply boundary and initial conditions for numerical simulation in the present study.

Table 1. Flow characteristics in ramps aerators.

L _r (m)	Φ (degree)	Q _w (m ³ /s)	Q _a ×10 ⁻³ (m ³ /s)	β %	F _r	C%	L (m)	L _a (m)
0.04	15	0.255	0.21	0.84	6.6	9	0.8	1.4
0.04	15	0.383	0.315	0.83	9.9	11	1.5	1.8
0.08	15	0.255	0.42	1.65	6.6	8	1.2	1.5
0.08	15	0.383	0.632	1.65	9.9	8.5	2.4	2.1
0.12	15	0.255	0.63	2.47	6.6	10	1.5	1.6
0.12	15	0.383	0.945	2.47	9.9	9	2.7	2.2
0.04	10	0.192	0.104	5.5	4.97	9	0.5	1
0.04	10	0.255	0.14	0.55	6.6	9.5	0.8	1.2
0.08	10	0.255	0.275	1.08	6.6	10	0.9	1.3
0.08	10	0.383	0.413	1.08	9.9	11	1.6	1.9
0.12	10	0.255	0.413	1.62	6.6	12	1	1.6
0.12	10	0.383	0.62	1.62	9.9	8	2	1.8

Eqs. (1) and (2), respectively [11, 12]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{x}_i) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial u_j} \right) = B_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \bar{u}_i u_j \right) \quad (2)$$

Where u_i and u_j the velocity vector components in the spatial direction i, j , and B_i are the volumetric force in the direction i , p represents the pressure, μ is the fluid viscosity and ρ is the fluid density.

The upstream boundary condition consists of an inlet for the flow velocity that depends on the water depth, as well as an inlet for the air pressure set to atmospheric pressure. The upper boundary and aerator are defined as pressure inlet conditions. The downstream boundary is positioned 4.5 m downstream of the deflector in the region where the water flow is supercritical. At this location, the boundary is perpendicular to the base of the chute and encompasses both the water flow and the air. In this instance, the downstream

boundary is a pressure outlet, indicating that water and air can discharge from the channel without restriction. Where boundaries are not explicitly mentioned, they are considered walls, and a no-slip condition is applied. The BCs are shown in Fig.1.

3- Results and Discussion

The cavity length below the aerator, which is influenced by aerator distance and air supply, has a significant effect on air entrainment and cavitation protection. The distance between aerators depends on the minimum air concentration, the rate of air detrainment along the chute, and the specific chute geometry and flow conditions. Table 1 illustrate the distance between the aerators (L_a) and the average air concentration (C) at the area where the second aerator is located. The distance of the aerators is obtained based on the average air concentration during the chute spillway. To determine the optimal distance of the aerators and increase the efficiency of aeration, an average air concentration between 8% and 12% was considered. In Fig. 2, the length of the aerator area L_r , and the distance between the two aerators is L_a , which equals 1.5 m; the water flow rate is assumed to be 0.255 m³/s. It can be seen that the length of L_1 is 1.2 m and the length of L_2 is 1.1 m. The reason for the slight change in L_2 is that the

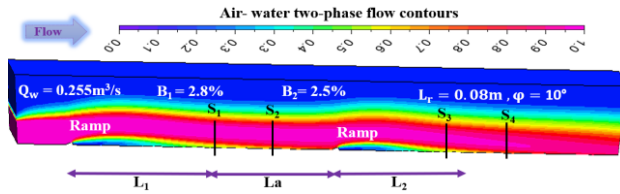


Fig. 2. Distance between two aerators in the chute spillway

initial aeration happens on the first ramp, and the aeration efficiency on the second ramp is slightly reduced. As a result, the suitable distance between two ramps can be obtained from numerical simulations. This means that the distance between two consecutive ramps should be determined so that the aeration efficiency of the next ramp is appropriate. In this aerator, the aeration efficiency or air concentration coefficient ($\beta = Q_a/Q_w$) for the first ramp is 2.8%, and for the second ramp is 2.5%.

4- Conclusion

This study presents an examination of aerated flow downstream of a chute aerator. A 3D numerical model was developed to determine the distance between two aerators with different types of chute aerators. These models include ramps, offsets, ramps with offsets, and bottom-and-side wall ramps. The simulations captured the air concentration distributions at various locations such as the cavity, the impact area, and the equilibrium area. Also, it was found that the air concentration is affected by various factors, including ramp length, ramp angle, offset height,

and upstream Froude number. Furthermore, bottom and side wall ramp aerators provide improved aeration because they create a cavity zone in both the bottom and side wall chute. Therefore, the length of the cavity zone is longer than and the aeration efficiency increases. In addition, the optimal spacing of the various chute spillway aerators was determined to prevent cavitation damage downstream of the spillway and to ensure that the required air concentration is maintained throughout the chute.

References

- [1] F. Ye, W. Xu, W. Wei, Experimental study of the air concentration diffusion in aerated chute flows downstream of lateral and bottom aerators, *AIP Advances*, 12(2) (2022).
- [2] M. Pfister, J. Lucas, W.H. Hager, Chute aerators: preaerated approach flow, *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(11) (2011) 1452-1461.
- [3] H. Chanson, Flow downstream of an aerator-aerator spacing, *Journal of Hydraulic Research*, 27(4) (1989) 519-536.
- [4] H. Chanson, Study of air demand on spillway aerator, *Journal of Fluids Engineering*, 112(3) (1990) 343-350.
- [5] M.C. Aydin, Aeration efficiency of bottom-inlet aerators for spillways, *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 24(3) (2018) 330-336.
- [6] J. Lian, C. Qi, F. Liu, W. Gou, S. Pan, Q. Ouyang, Air entrainment and air demand in the spillway tunnel at the Jinping-I Dam, *Applied Sciences*, 7(9) (2017) 930.
- [7] M.C. Aydin, M. Ozturk, Verification and validation of a computational fluid dynamics (CFD) model for air entrainment at spillway aerators, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 36(5) (2009) 826-836.
- [8] W. Wei, J. Deng, W. Xu, Numerical investigation of air demand by the free surface tunnel flows, *Journal of Hydraulic Research*, 59(1) (2021) 158-165.
- [9] B.P. Tullis, J. Larchar, Determining air demand for small-to medium-sized embankment dam low-level outlet works, *Journal of irrigation and drainage engineering*, 137(12) (2011) 793-800.
- [10] B.R. Bai RuiDi, L.S. Liu ShanJun, T.Z. Tian Zhong, W.W. Wang Wei, Z.F. Zhang FaXing, Experimental investigation of air-water flow properties of offset aerators, (2018).
- [11] F. Salmasi, J. Abraham, Hydraulic characteristics of flow over stepped and chute spillways (case study: Zirdan Dam), *Water Supply*, 23(2) (2023) 851-866.
- [12] F. Safiloo, F. Salmasi, H. Arvanaghi, A. Abbaspour, J. Abraham, CFD Modeling of Air-Water Flow Characteristics in Chute Spillway Aerators, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 026-02125 (2026) 190-205.



بررسی عددی مشخصات جریان در انواع مختلف هوادهای سرریز شوت

فاطمه صفی‌لو، فرزین سلماسی* , هادی ارونتقی، اکرم عباس‌پور

گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۱

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۱۹

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۱۴

ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۴/۲۶

کلمات کلیدی:

هواده

رمپ کف و دیواره جانبی

کاویتاسیون

طول ناحیه کاویتی

مدل آشفتگی

خلاصه: هواهی سرریز شوت به‌عنوان روشی مؤثر برای کاهش آسیب‌های فرسایشی ناشی از کاویتاسیون، نقش مهمی در حفاظت از سازه‌های شوت ایفا می‌کند. میزان حفاظت ایجاد شده به‌وسیله هواهی، عمدتاً به طراحی هواه و نحوه توزیع غلظت هوا در جریان وابسته است. در تحقیق حاضر، ویژگی‌های هوادهای مختلف شوت و عملکرد آنها با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلوئنت شبیه‌سازی شده است. مدل‌های مورد استفاده شامل هواه پله، هواه رمپ، ترکیب رمپ و پله و همچنین هوادهای رمپ کف و دیواره جانبی هستند. برای تحلیل هیدرولیکی جریان، از مدل آشفتگی k-ε RNG و روش سیال چندفازی استفاده گردید. نتایج نشان داد فاصله هوادها در هواه رمپ کف و دیواره جانبی نسبت به هوادهای رمپ، پله و ترکیب هواه رمپ و پله به دلیل ایجاد ناحیه کاویتی در کف و دیواره جانبی، ایجاد آشفتگی و همچنین اختلاط بیشتر آب و هوا در جریان آب بیشتر است. علاوه بر این، ترکیب رمپ کف و دیواره جانبی در مقایسه با سایر روش‌ها، هواهی مؤثرتری ایجاد کرده و با تشکیل ناحیه کاویتی در هر دو بخش کف و دیواره، موجب بهبود راندمان و یکنواختی غلظت هوا می‌شود. در این حالت، طول ناحیه کاویتی حدود ۵۰ درصد بیشتر از شرایط استفاده از رمپ کف به تنهایی است.

۱- مقدمه

با پیشرفت فناوری در دهه‌های اخیر، به‌ویژه در زمینه سدسازی، تعداد قابل توجهی از سدهای مرتفع با ارتفاعی بیش از ۲۰۰ متر طراحی و احداث شده‌اند. این سازه‌های عظیم متشکل از اجزای متعددی می‌باشند که یکی از حیاتی‌ترین آن‌ها سرریز^۱ است. سرریزها از جمله سازه‌های هیدرولیکی کلیدی در سدها به شمار می‌روند که وظیفه آن‌ها تخلیه ایمن رواناب ناشی از سیلاب‌های شدید در کوتاه‌ترین زمان ممکن است. به دلیل دبی و سرعت بالای جریان در این سازه‌ها، طراحی آن‌ها باید با دقت بالا و بر پایه اصول هیدرولیکی پیشرفته انجام شود تا عملکرد مطمئن و ایمن آن‌ها تضمین گردد. از میان عوامل تهدیدکننده پایداری سازه سرریز، پدیده کاویتاسیون^۲ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این پدیده در جریان‌های با سرعت بالا به‌طور جدی محتمل است و در صورت وقوع می‌تواند به آسیب‌های شدید سازه‌ای

از جمله تخریب موضعی و فرسایش شدید منجر شود. لذا شناخت دقیق رفتار جریان‌های آشفته و دو فازی در طراحی و تحلیل عملکرد سرریزها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

در جریان عبور آب از سرریزهای بلند، به‌ویژه در تندآب‌ها، وجود ناصافی‌ها و ناهمواری‌های سطح بستر سرریز، موجب جدا شدن خطوط جریان از کف شده و نواحی گردابی در پایین‌دست محل جداشدگی ایجاد می‌شود. در این مناطق گردابی، به دلیل سرعت بالای جریان گاهی بیش از ۲۵ متر بر ثانیه کاهش فشار قابل توجهی رخ می‌دهد که ممکن است به فشار بخار آب برسد. در چنین شرایطی، پدیده کاویتاسیون به وقوع می‌پیوندد؛ به‌طوری‌که حباب‌های بخار تشکیل شده و با انتقال به نواحی پرفشارتر در پایین‌دست، دچار انفجار می‌شوند. با وجود سطح تماس محدود این حباب‌ها با بستر سرریز، انرژی آزادشده ناشی از انفجار آن‌ها نیروی بسیار زیادی را به سطح بتن وارد می‌کند. تکرار این فرآیند می‌تواند منجر به آسیب‌های جدی در سازه بتنی کف سرریز شود [۱]. سرعت بالای جریان و افت فشار در سرریزهای بلند، احتمال بروز پدیده کاویتاسیون را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد.

1. Spillway
2. Cavitation

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: salmasi@tabrizu.ac.ir



تحت تأثیر هندسه هوا، دبی جریان و فشار زیرسطحی ناحیه کاویتی قرار دارد. آیدین^۴ [۹] با انجام آزمایش‌های مدل بر روی هوادهی با ورودی از پایین و در شرایط مختلف نرخ جریان و زاویه سرریز، روابط تجربی جدیدی را برای برآورد میزان ورود هوا ارائه کرد. افزون بر این، تولیس و لارچار^۵ [۱۰] در بررسی‌های خود بر روی عملکرد تخلیه‌کننده‌های تحتانی، نشان دادند که عواملی نظیر هندسه و میزان بازشدگی دریچه، ارتفاع سطح آب و شرایط غوطه‌وری پایاب تأثیر قابل توجهی بر تقاضای هوا دارند. لیان و همکاران^۶ [۱۱] با ارزیابی روش‌های تجربی موجود برای تخمین تقاضای هوا، یک رویکرد پیش‌بینی نوین توسعه دادند. در همین راستا، آیدین و اوزتورک^۷ [۱۲] از مدل‌سازی عددی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)^۸ استفاده کردند و نشان دادند که این روش می‌تواند پیش‌بینی‌های دقیقی از فرآیند ورود هوا در هوادها ارائه دهد که با داده‌های تجربی و مشاهدات میدانی سازگاری بالایی دارد. وی و همکاران^۹ [۱۳] نیز با به‌کارگیری مدل عددی برای شبیه‌سازی تقاضای هوا در یک هواده تونلی، میانگین انحرافی حدود ۲۵٪ نسبت به نتایج آزمایشگاهی گزارش کردند.

یانگ و همکاران^{۱۰} [۱۴] با انجام مطالعات آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های عددی، تأثیر انتقال مومنتوم بین آب و هوا را بر مدل دو سیالیه دوفازی آب-هوا مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، اصلاحاتی بر روی مدل اعمال شد تا نیروی درگ وارد بر گروهی از حباب‌ها و نیروی بالابری دیواره‌ها، که پاسخ فازها در نزدیکی دیواره را نشان می‌دهد، بهتر شبیه‌سازی گردد. نتایج نشان داد که در ناحیه کاویتی، استفاده از حباب‌های با قطر کوچک‌تر تطابق بهتری با داده‌های آزمایشگاهی دارد، در حالی که غلظت هوای نزدیک کف در پایین‌دست ناحیه برخورد جت تا حدودی پیش‌بینی شده و دارای انحراف نسبت به مقادیر آزمایشگاهی بود. هانگ وانگ و همکاران^{۱۱} [۱۵] به بررسی و تخمین میزان هوای وارد شده به سرریز شوت اصلاح‌شده با استفاده از سیستم هواده پله‌ای پرداختند. مدل هواده پله‌ای مورد مطالعه دارای شیب بالادست ثابت ۱۴ درجه، سه ارتفاع نسبی پله ۱، ۰/۵، ۳/۰ h_s/h_0 و دو شیب پایین‌دست جریان برابر با ۱۴ و ۱۹/۷ درجه بود. این مدل از نظر ویژگی‌های هوادهی جریان مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که

در صورت عدم کنترل این پدیده، خسارات سنگینی به سازه‌های هیدرولیکی وارد خواهد شد. بین سال‌های ۱۹۶۰ تا ۱۹۸۰، موارد متعددی از تخریب شدید در سطوح بتنی و پی سرریزها به علت کاویتاسیون گزارش شده است. از جمله این نمونه‌ها می‌توان به آسیب‌های گسترده در سرریز سد کارون ۱ در ایران (سال ۱۹۷۷) و نیز سرریز سد گلن کانپون^۱ در ایالت کلرادوی ایالات متحده آمریکا (سال ۱۹۸۳) اشاره کرد [۲، ۳].

هواده‌های شوت به عنوان یکی از مؤثرترین ابزارها برای کاهش خطرات ناشی از کاویتاسیون در سرریزها به کار می‌روند. هواده‌ها در کف یا دیواره‌های جانبی سرریز شوت نصب می‌شوند و با ایجاد حفره هوایی و تزریق کنترل‌شده هوا به جریان، سطح سازه را در برابر پدیده کاویتاسیون محافظت می‌کنند. مکانیزم عملکرد هواده‌ها بر مبنای ایجاد جدایش موقت جریان از سطح شوت است؛ به این ترتیب یک حفره هوایی تشکیل می‌شود و امکان ورود هوا از سطح آزاد به درون جریان فراهم می‌گردد. هوا به صورت حباب‌های متعدد در جریان انتقال یافته و به پایین‌دست منتقل می‌شود. این حباب‌ها نقش حفاظتی کلیدی در برابر تخریب‌های ناشی از پدیده کاویتاسیون دارند [۴]. کارایی هواده‌ها معمولاً با توجه به نرخ جذب هوا مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این نرخ به عواملی چون هندسه هواده، زبری سطح، شیب و شرایط هیدرولیکی جریان وابسته است. بر اساس مطالعات انجام‌شده، سه شکل هندسی متداول برای طراحی هواده‌ها شامل: (۱) رمپ (۲) پله و (۳) ترکیب رمپ و پله می‌باشد. فرآیند اصلی ورود هوا به جریان از طریق یک سیستم تأمین هوا انجام می‌شود که به فضای باز متصل بوده و اغلب شامل دو مجرای جانبی به همراه یک شیار عرضی است. این ترکیب امکان توزیع عرضی و یکنواخت هوا در زیر جت آب را فراهم می‌سازد و موجب بهبود کارایی هواده می‌شود [۵]. ورود هوا به جریان تحت تأثیر مجموعه‌ای از متغیرهای مستقل قرار دارد. این متغیرها شامل شیب سرریز و هواده، ارتفاع رمپ و پله، عمق جریان، عدد فرود جریان و میزان زیرفشار در ناحیه کاویتی می‌باشند [۶].

بر اساس مطالعات پترکا^۲ و راسموسن^۳ [۷]، حفظ غلظت متوسط هوا به صورت $C = Q_a / Q_a + Q_w$ به بازه ۱ تا ۶ درصد، روشی مؤثر برای جلوگیری از بروز پدیده کاویتاسیون محسوب می‌شود. در این رابطه Q_a ، بیانگر دبی هوای ورودی و Q_w نشان‌دهنده دبی جریان آب است. چانسون [۸] در مطالعات آزمایشگاهی خود نشان داد که میزان تقاضای هوا عمدتاً

4. Aydin
5. Tullis and Larchar
6. Lian et al.
7. Aydin and Ozturk
8. Computational Fluid Dynamic
9. Wei et al.
10. Yang et al.
11. Wang

1. Glen Canyon Dam
2. Peterka
3. Rasmussen

ناشی از هوادهی در سرریزهای مختلف پرداخته‌اند. با این حال، خلأ پژوهشی قابل توجهی در درک جامع ارتباط میان ترکیب بهینه انواع هواده‌ها و کاهش مؤثر خسارات کاویتاسیون همچنان وجود دارد. بسیاری از مطالعات پیشین یا بر روی یک نوع خاص از هواده تمرکز داشته‌اند، یا فاقد تحلیل عددی دقیق برای پارامترهای حیاتی جریان دوفازی بوده‌اند. در این تحقیق، به‌منظور ارتقای کارایی هوادهی و کاهش مؤثر آسیب‌های کاویتاسیون، عملکرد انواع مختلف هواده‌ها شامل رمپ^۲، پله^۳، ترکیب رمپ با پله^۴ و همچنین ترکیب رمپ کف و رمپ دیواره جانبی^۵ بررسی شده است. این تحقیق فراتر از مطالعات گذشته، نه تنها انواع هواده‌های متداول مانند رمپ و پله را مورد بررسی قرار می‌دهد، بلکه به‌طور ویژه بر ارزیابی اثر هم‌افزایی ترکیب رمپ با پله و ترکیب رمپ کف و رمپ دیواره جانبی تمرکز دارد. همچنین، در این تحقیق رفتار هیدرولیکی سرریزهای مجهز به هواده با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) در نرم‌افزار انسیس فلوئنت^۶ تحلیل شده است. در این مسیر، از مدل آشفتگی k-ε RNG و رویکرد چندفازی مخلوط^۷ برای شبیه‌سازی دقیق‌تر جریان استفاده شده است. علاوه بر این، در این راستا، فاصله بهینه بین هواده‌ها نیز تعیین گردیده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تعریف مطالعه موردی و انواع سیستم های هوادهی

در این تحقیق به شبیه‌سازی عددی جریان عبوری از هواده‌های مختلف سرریز شوت شامل: رمپ، پله، ترکیب پله با رمپ و همچنین ترکیب هواده رمپ کف و دیواره‌ی جانبی پرداخته شده است. ابتدا به‌منظور اطمینان از صحت نتایج عددی، فرآیند اعتبارسنجی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی بای و همکاران [۱۹] و بر پایه توزیع غلظت هوا در پایین‌دست هواده صورت گرفت. سپس به تحلیل عددی مشخصه‌های هیدرولیکی جریان عبوری از هواده‌ها شامل طول ناحیه کاویتی در پایین‌دست هواده، نرخ ورود هوا، توزیع غلظت هوا، پروفیل‌های غلظت هوا و پروفیل‌های سطح آب در انواع مختلف هواده‌ها انجام شد. در نهایت، با استفاده از نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی، فاصله بهینه بین هواده‌ها تعیین گردید.

تغییرات نرخ ورود هوا تحت تأثیر کسر فضای خالی و توزیع سرعت سطحی جریان است و فرایند حذف هوا هنگام برخورد جت با کف بستر شوت، که ناشی از ورود هوا و محبوس شدن آن در امتداد سطح جت پایینی رخ می‌دهد، تأیید شد. درصد حذف هوا در برخورد جت با کف شوت عمدتاً به زاویه برخورد جت بستگی داشت، شو و وی^۱ [۱۶] به بررسی دینامیک جریان دوفازی و نحوه پراکندگی غلظت هوا در پایین‌دست هواده‌های شوت پرداختند. آن‌ها در این تحقیق سه نوع هواده شامل هواده کف، هواده جانبی و هواده تمام‌مقطع (ترکیب کف و جانبی) را مورد مقایسه قرار دادند. نتایج نشان داد که هواده کف به‌تنهایی اگرچه موجب ورود هوا به جریان از طریق ایجاد حفره در بستر می‌شود، اما در گسترش یکنواخت هوا در سراسر مقطع جریان محدودیت دارد. در مقابل، هواده جانبی نیز به‌تنهایی قادر است ورود هوا به جریان را تسهیل کرده و علاوه بر بهبود هوادهی، در کاهش انرژی و توان تخریبی جریان نقش مؤثری ایفا کند. با این حال، بیشترین کارایی زمانی حاصل شد که هواده کف و جانبی به‌صورت ترکیبی مورد استفاده قرار گرفتند. سلماسی و آبراهام [۱۷] به بررسی ویژگی‌های هیدرولیکی جریان در سرریزهای پلکانی و شوت پرداخته و سد زیردان را به عنوان مطالعه موردی انتخاب کردند. این نوع سرریزها با تقویت فرآیند هوادهی خودبه‌خودی، احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون را نسبت به سرریزهای صاف کاهش می‌دهند. نتایج این مطالعه نشان داد که راندمان اتلاف انرژی در سرریزهای پلکانی به‌طور قابل ملاحظه‌ای بالاتر از سرریزهای صاف است. در مقابل، در سرریزهای صاف احتمال بروز فشارهای منفی در پایین‌دست وجود دارد که می‌تواند ریسک کاویتاسیون را افزایش دهد. نیکرو و پیربوداگی [۱۸] با استفاده از نرم‌افزار Flow 3D پدیده کاویتاسیون در سرریز سرویس سد آغچای را شبیه‌سازی کردند. در این تحقیق، روش حجم سیال (VOF) برای مدل‌سازی جریان سطح آزاد به کار گرفته شد و شبیه‌سازی‌ها در دو دبی ۱۰۶۵ و ۴۴۰۰ متر مکعب بر ثانیه انجام شد. نتایج نشان داد که مدل عددی قادر است ویژگی‌های جریان و نواحی ایجاد کاویتاسیون را با دقت بالایی پیش‌بینی کند و تطابق قابل توجهی با داده‌های تجربی داشته باشد. تحلیل‌ها همچنین نشان داد که افزایش دبی جریان موجب افزایش شدت و گستره کاویتاسیون می‌شود، همچنین استفاده از روش‌های عددی می‌تواند ضمن کاهش نیاز به آزمایش‌های تجربی پرهزینه، پیش‌بینی دقیقی از رفتار جریان‌های پیچیده و نقاط بحرانی کاویتاسیون ارائه کند.

در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی به بررسی الگوهای جریان و تأثیرات

2. Ramp
3. Offset
4. Ramp and offset aerator combination
5. Bottom and side wall ramp
6. Ansys Fluent
7. Mixture

۲-۱-۱ مدل آزمایشگاهی

صورت $\beta = Qa/Qw$ تعریف می‌شود. ضریب هوادهی جریان تابعی از پارامترهای هندسی، شرایط هیدرولیکی و خصوصیات سیال می‌باشد که بر اساس این سه پارمتر، ضریب هوادهی جریان با رابطه (۳) بیان می‌گردد:

$$\beta = f(Q_w, Q_a, h_s, h_0, L_r, L_{rs}, \phi, \phi_s, V, \rho, \mu, \sigma, g, b) \quad (3)$$

در رابطه فوق Q_w دبی آب؛ Q_a دبی هوا؛ h_0 عمق جریان ورودی، h_s ارتفاع پله، L_r طول رمپ، L_{rs} طول رمپ دیواره جانبی، Φ زاویه رمپ، Φ_s زاویه رمپ دیواره جانبی، V سرعت جریان، ρ چگالی سیال، μ ویسکوزیته سیال، σ کشش سطحی سیال، g شتاب گرانشی و b عرض سرریز می‌باشند که در شکل (۱) شماتیکی از انواع مختلف هوادهای و مشخصات آن‌ها نمایش داده شده است. پس از آنالیز ابعادی، ضریب هوادهی به عنوان تابعی از پارامترهای بی‌بعد، طبق رابطه (۴) به دست می‌آید.

$$\beta = \frac{Q_a}{Q_w} = f\left(\frac{\rho V h_0}{\mu}, \frac{V^2}{g h_0}, \frac{\rho h_0 V^2}{\sigma}, \frac{h_s}{b}, \frac{L_r}{b}, \frac{L_{rs}}{b}, \phi, \phi_s\right) \quad (4)$$

در رابطه فوق، $\rho V h_0 / \mu$ عدد رینولدز، $V^2 / g h_0$ عدد فرود بالادست، $\rho h_0 V^2 / \sigma$ عدد وبر، h_s / b نسبت ارتفاع پله به عرض سرریز، L_r / b نسبت طول رمپ به عرض سرریز، L_{rs} / b نسبت طول رمپ دیواره جانبی به عرض سرریز، Φ زاویه رمپ و Φ_s زاویه رمپ دیواره جانبی است.

تشابه فرود معمولاً در آزمایش‌های مدل برای مقایسه نیروهای گرانشی و اینرسی به کار گرفته شده است. با این حال، وقتی صحبت از مدل‌سازی جریان‌های هوا-آب می‌شود، اغلب اثرات مقیاس وجود دارد که باید در نظر گرفته شوند. این اثرات مقیاس شامل تغییرات در غلظت هوا و اندازه و فرکانس حباب‌ها می‌شود. فیشر و چانسون [۲۱] تأثیر مقیاس مدل را بر آزمایش‌های هیدرولیکی بررسی کردند. آنها دریافتند که وقتی دو عدد بدون بعد از آستانه‌های خاصی فراتر می‌روند، حداقل تأثیر را بر اندازه‌گیری غلظت هوا دارند. این اعداد شامل عدد وبر و عدد رینولدز می‌باشند. عدد وبر باید بیشتر از ۱۴۰ و عدد رینولدز باید بیشتر از 10^5 باشد. عدد وبر، کشش سطحی (σ) و خواص آب (چگالی ρ_w و ویسکوزیته دینامیک μ_w) را به سرعت جریان (V_0) و طول مشخصه (h_0) مرتبط می‌کند. عدد رینولدز، همان سرعت جریان و طول مشخصه را به ویسکوزیته آب مرتبط می‌کند.

آزمایش‌های بای و همکاران [۱۹] بر روی یک سرریز شوت مستطیلی از جنس پلی‌متیل متاکریلات) با طول ۵ متر و عرض ۰/۵ متر انجام شد. برای تأمین آب مورد نیاز آزمایش‌ها، از سیستم با هد ثابت استفاده گردید که امکان تأمین دبی تا حداکثر ۰/۵ مترمکعب بر ثانیه را فراهم می‌کرد. اندازه‌گیری دبی جریان با بهره‌گیری از سرریز لبه تیز مستطیلی نصب شده در بخش بالادست صورت گرفت و دقت اندازه‌گیری‌ها در حدود ۱ درصد حفظ شد. سرعت جریان دو فازي هوا-آب و همچنین نمودارهای توزیع غلظت هوا، با استفاده از پروب سوزنی آشکارساز فاز اندازه‌گیری شدند. ناحیه کاویتی در حالت باز نگه داشته شد تا در تماس مستقیم با فشار اتمسفر قرار گیرد و بدین ترتیب تعادل فشار برقرار شود. عمق جریان ورودی ثابت بوده و برابر با ۰/۱۵ متر در نظر گرفته شد. سرعت جریان در محدوده ۴ تا ۹ متر بر ثانیه و همچنین عدد فرود بین مقادیر ۳/۸ تا ۷/۴ متغیر بودند.

۲-۲ مدل‌سازی عددی

۲-۲-۱ معادلات حاکم بر جریان

پایه و اساس تمام روش‌های عددی در مهندسی هیدرولیک حل معادلات حاکم بر جریان شامل معادلات پیوستگی و معادلات مومنتم می‌باشد که اصطلاحاً به معادلات ناویر-استوکس معروف می‌باشند. برای یک جریان تراکم‌ناپذیر با لزجت ثابت معادلات مذکور به ترتیب به فرم روابط (۱) و (۲) نوشته می‌شوند:

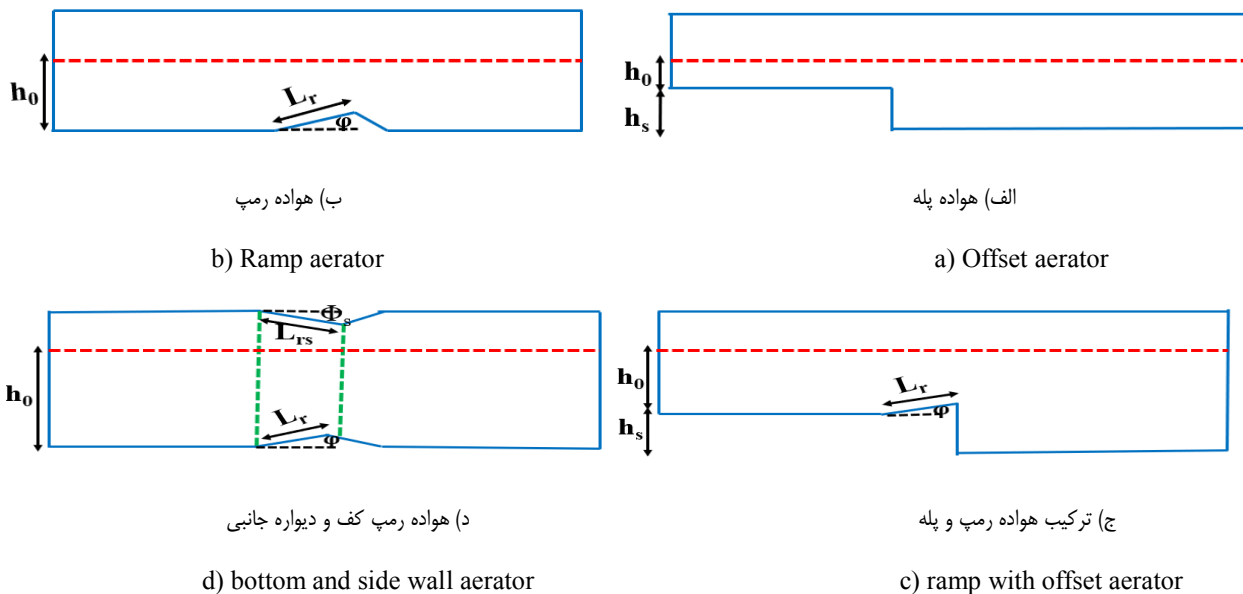
$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{x}_i) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = B_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i u_j} \right) \quad (2)$$

در روابط فوق u_i و u_j مولفه بردار سرعت در راستای فضایی i ، j و B_i نیروی حجمی در راستای i ، $\bar{p}$ بیانگر فشار، μ لزجت سیال، P چگالی سیال می‌باشد [۲۰].

۲-۲-۲ آنالیز ابعادی

مهم‌ترین پارامتر مؤثر بر هوادهی جریان ضریب هوادهی است که به



شکل ۱. شماتیکی از انواع مختلف هواده‌های سرریز شوت.

Fig. 1. Schematic design of different types of chute spillway aerators.

حاوی آب و هوا است و مقدار 0.5 نشان دهنده سطح مشترک هوا-آب است [۲۲]. کسر حجمی (α) را می‌توان با استفاده از رابطه (۵) محاسبه کرد [۲۳]. همچنین مشخصات سطوح آب از روش مدل مخلوط در شکل (۲) نشان داده شده است.

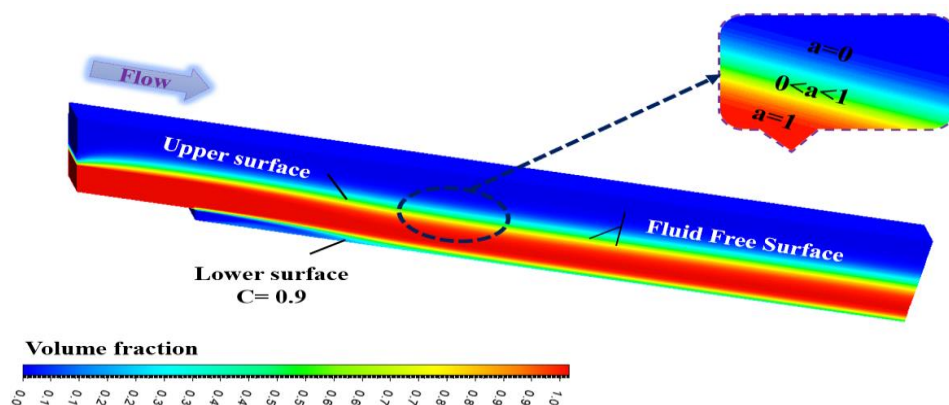
$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha) + u_i \frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha) + u_j \frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha) = 0 \quad (5)$$

۲-۲-۴- شرایط مرزی

شرایط مرزی شبیه‌سازی تحقیق حاضر در شکل (۳) نشان داده شده است. شرایط مرزی برای جریان ورودی به صورت سرعت ورودی (Veloc-ity Inlet) که به عمق آب بستگی دارد، و همچنین یک ورودی برای فشار هوا که روی فشار اتمسفر تنظیم شده است، مرز بالایی و هوا به عنوان شرایط ورودی فشار (pressure inlet) تعریف شدند. برای خروجی به صورت فشار خروجی (Pressure outlet) تعریف شد که نشان می‌دهد آب و هوا می‌توانند بدون محدودیت از کانال تخلیه شوند، شدت آشفتگی و نسبت ویسکوزیته به عنوان پارامترهای مدل‌سازی آشفتگی در مرزهای ورودی برای شرایط ورودی فلووم مشخص شدند. مقادیر تعبیه شده مورد استفاده

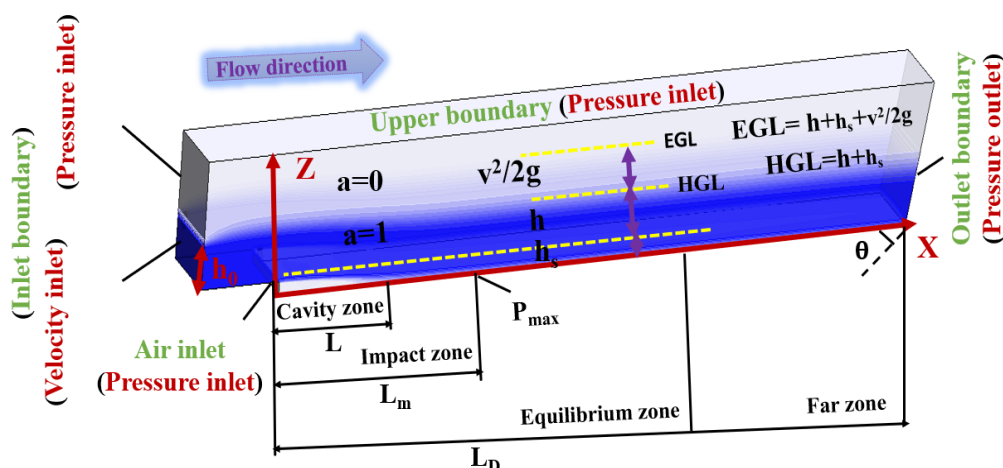
۲-۲-۳- روش جزء حجم سیال

یکی از چالش‌های مطرح شده در بسیاری از مسائل هیدرودینامیکی تعیین مرز یا سطح مشترک دو یا چند فاز سیال می‌باشد. مدل VOF به ندرت برای شبیه‌سازی جریان در یک هواده استفاده می‌شود، اما مدل مخلوط (Mixture) برای بررسی جریان در یک هواده استفاده می‌شود و برای شبیه‌سازی جریان هواده، به ویژه در مناطقی با غلظت هوای بالا مناسب‌تر است. در مطالعه حاضر، سطح آزاد با استفاده از رویکرد مخلوط، که یک ابزار محاسباتی قدرتمند است، شبیه‌سازی شده است. مدل مخلوط برای شبیه‌سازی جریان‌های چندفازی که اجزای مختلف سیال در سطح مولکولی با هم مخلوط می‌شوند، استفاده می‌شود. با تعریف فازها و خواص آنها، مانند چگالی و ویسکوزیته، این مدل تعامل و رفتار فازها را در دامنه جریان محاسبه می‌کند. کسر حجمی و کسر جرمی پارامترهای مهمی در این مدل هستند که به ترتیب کسری از کل حجم و کل جرم اشغال شده توسط یک فاز یا جزء خاص در یک سلول محاسباتی را نشان می‌دهند. در این رویکرد، از کسر حجمی (α) استفاده می‌شود که بین صفر و یک ($0 < \alpha < 1$) متغیر است. اگر $\alpha = 1$ باشد، آن سلول با آب پر شده است، در حالی که اگر $\alpha = 0$ باشد، المان پر از هوا است. هر مقداری بین ۰ و ۱ نشان دهنده المانی است که



شکل ۲. کانتورهای کسر حجمی آب در هوا ده سرریز شوت.

Fig. 2. Water volume fraction contours at the chute spillway aerator.



شکل ۳. نحوه اعمال شرایط مرزی و اولیه برای شبیه سازی عددی در تحقیق حاضر.

Fig. 3. How to apply boundary and initial conditions for numerical simulation in the present study.

۲-۵- تعریف محدوده و هندسه هوا ده ها

در تحقیق حاضر ابعاد دامنه حل شامل یک کانال یا فلومی به طول ۵ متر، ارتفاع ۰/۴۵ متر و عرض ۰/۲ متر در نظر گرفته شد و هوا ده ها در فاصله ۰/۵ متری از بالادست قرار گرفتند. جدول (۱) تعریف کلی از تمامی حالت های ممکن شبیه سازی شده در تحقیق حاضر را نشان می دهد. به منظور بررسی تاثیر تغییرات هندسی در هوا ده های سرریز شوت در مجموع ۳۸ مدل با ترکیب های مختلفی از شرایط هیدرولیکی و هندسی مورد شبیه سازی قرار گرفت. لازم به ذکر است که عمق آب و شیب شوت در همه مدل ها ثابت فرض شد و به ترتیب مقادیر ۰/۱۶ متر و ۱۵ درجه در نظر گرفته شدند.

در برنامه ۳٪ برای شدت آشفتگی و ۵٪ برای نسبت ویسکوزیته می باشد. در مواردی که مرزها به صراحت ذکر نشده اند، به عنوان دیوار (wall) در نظر گرفته شدند و همچنین شرط عدم لغزش برای دیواره ها اعمال شد، به این معنی که هیچ حرکت نسبی بین سیال و مرز وجود ندارد. پس از تعیین شرایط مسئله، شرایط مرزی، نوع معادلات و گسسته سازی آن ها، برنامه اجرا می شود. زمان مورد نیاز برای اجرای برنامه به عوامل مختلفی همانند حجم مسئله، تعداد و نوع عناصر شبکه، نوع معادلات، سیستم پردازش گر مورد استفاده و حافظه آن بستگی دارد [۲۴]. در شکل (۴) کلیه مراحل طی شده برای شبیه سازی عددی در تحقیق حاضر به صورت کامل آورده شده است.



شکل ۴. فلوجارت شبیه‌سازی عددی.

Fig. 4. Flowchart for numerical modeling.

تدریجی شبکه‌های محاسباتی در پنج وضوح مختلف (۴۰۰۰۰، ۶۰۰۰۰، ۸۰۰۰۰، ۱۴۰۰۰۰، ۱۰۰۰۰۰) انجام شد. در طول این آزمون، توزیع حداکثر غلظت هوا (C) در نواحی مختلف هواده سرریز شوت شامل ناحیه‌ی کاویتی، ناحیه‌ی برخورد و ناحیه‌ی تعادل با داده‌های آزمایشگاهی بای و همکاران (۲۰۱۷) مقایسه گردید. مقایسه بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی و داده‌های تجربی نشان داد که نتایج مستقل از گسسته‌سازی یا اندازه

تنظیمات پارامتر برای شیب دیواره جانبی و شیب کف برابر صفر در نظر گرفته شد.

۲-۲-۶- شبکه‌بندی و اعتبارسنجی مدل عددی

به‌منظور ارزیابی دقت مدل آشفستگی و اطمینان از استقلال نتایج شبیه‌سازی از شبکه محاسباتی، شبکه‌ای متشکل از المان‌های چهارضلعی و شش‌ضلعی مورد استفاده قرار گرفت. بررسی استقلال از شبکه با اصلاح

جدول ۱. پارامترهای هندسی و هیدرولیکی هواده شوت در تحقیق حاضر.

Table 1. Chute aerator's geometrical and hydraulic properties in the present study.

Test	V (m/s)	h_s (m)	L_r (m)	Φ (degree)	L_{rs} (m)	Φ_s (degree)	Fr	Q_w (m ³ /s)	$Q_a \times 10^{-3}$ (m ³ /s)	Re (10 ⁵)	We
T ^۱	۸	۰/۰۲	.	.	.	.	۶/۶	۰/۲۵۵	۰/۳۹۲	۱۲	۳۶۰
T ^۲	۱۲	۰/۰۲	.	.	.	.	۹/۹	۰/۳۸۳	۰/۵۸۸	۱۹/۲	۵۷۲
T ^۳	۸	۰/۰۴۵	.	.	.	.	۶/۶	۰/۲۵۵	۰/۸۷۱	۱۲	۳۶۰
T ^۴	۱۲	۰/۰۴۵	.	.	.	.	۹/۹	۰/۳۸۳	۱/۳۲۳	۱۹/۲	۵۷۲
T ^۵	۸	۰/۰۶	.	.	.	.	۶/۶	۰/۲۵۵	۱/۱۷۶	۱۲	۳۶۰
T ^۶	۱۲	۰/۰۶	.	.	.	.	۹/۹	۰/۳۸۳	۱/۷۶۴	۱۹/۲	۵۷۲
T ^۷	۸	۰/۱	.	.	.	.	۶/۶	۰/۲۵۵	۱/۸۶۲	۱۲	۳۶۰
T ^۸	۱۲	۰/۱	.	.	.	.	۹/۹	۰/۳۸۳	۲/۷۹۳	۱۹/۲	۵۷۲
T ^۹	۶	.	۰/۰۴	۱۰	.	.	۴/۷۹	۰/۱۹۲	۰/۱۰۵	۹/۶	۲۷۰
T ^{۱۰}	۸	.	۰/۰۴	۱۰	.	.	۹/۹	۰/۳۸۳	۰/۱۴	۱۲	۵۷۲
T ^{۱۱}	۸	.	۰/۰۸	۱۰	.	.	۶/۶	۰/۲۵۵	۰/۲۷۶	۱۲	۳۶۰
T ^{۱۲}	۱۲	.	۰/۰۸	۱۰	.	.	۹/۹	۰/۳۸۳	۰/۴۱۳	۱۹/۲	۵۷۲
T ^{۱۳}	۸	.	۰/۱۲	۱۰	.	.	۶/۶	۰/۲۵۵	۰/۴۱۳	۱۲	۳۶۰
T ^{۱۴}	۱۲	.	۰/۱۲	۱۰	.	.	۹/۹	۰/۳۸۳	۰/۶۲۰	۱۹/۲	۵۷۲
T ^{۱۵}	۸	.	۰/۰۴	۱۵	.	.	۶/۶	۰/۲۵۵	۰/۲۱۰	۱۲	۳۶۰
T ^{۱۶}	۱۲	.	۰/۰۴	۱۵	.	.	۹/۹	۰/۳۸۳	۰/۳۱۵	۱۹/۲	۵۷۲
T ^{۱۷}	۸	.	۰/۰۸	۱۵	.	.	۶/۶	۰/۲۵۵	۰/۴۲۰	۱۲	۳۶۰
T ^{۱۸}	۱۲	.	۰/۰۸	۱۵	.	.	۹/۹	۰/۳۸۳	۰/۶۳۰	۱۹/۲	۵۷۲
T ^{۱۹}	۸	.	۰/۱۲	۱۵	.	.	۶/۶	۰/۲۵۵	۰/۶۳۰	۱۲	۳۶۰
T ^{۲۰}	۱۲	.	۰/۱۲	۱۵	.	.	۹/۹	۰/۳۸۳	۰/۹۴۵	۱۹/۲	۵۷۲
T ^{۲۱}	۸	۰/۰۴۵	۰/۰۴	۱۵	.	.	۶/۶	۰/۲۵۵	۰/۸۸۲	۱۲	۳۶۰
T ^{۲۲}	۸	۰/۰۴۵	۰/۰۸	۱۵	.	.	۶/۶	۰/۲۵۵	۰/۸۸۲	۱۲	۳۶۰
T ^{۲۳}	۸	۰/۰۴۵	۰/۱۲	۱۵	.	.	۶/۶	۰/۲۵۵	۰/۸۸۲	۱۲	۳۶۰
T ^{۲۴}	۸	۰/۰۴۵	۰/۰۴	۱۰	.	.	۶/۶	۰/۲۵۵	۱/۰۱۶	۱۲	۳۶۰
T ^{۲۵}	۸	۰/۰۴۵	۰/۰۸	۱۰	.	.	۶/۶	۰/۲۵۵	۱/۱۵۴	۱۲	۳۶۰
T ^{۲۶}	۸	۰/۰۴۵	۰/۱۲	۱۰	.	.	۶/۶	۰/۲۵۵	۱/۲۹۲	۱۲	۳۶۰
T ^{۲۷}	۸	۰/۰۶	۰/۰۴۵	۱۵	.	.	۶/۶	۰/۲۵۵	۱/۱۸۶	۱۲	۳۶۰
T ^{۲۸}	۸	۰/۰۶	۰/۰۸	۱۵	.	.	۶/۶	۰/۲۵۵	۱/۵۹۶	۱۲	۳۶۰
T ^{۲۹}	۸	۰/۰۶	۰/۱۲	۱۵	.	.	۶/۶	۰/۲۵۵	۱/۸۰۶	۱۲	۳۶۰
T ^{۳۰}	۸	۰/۱	۰/۰۴۵	۱۵	.	.	۶/۶	۰/۲۵۵	۲/۰۴۳	۱۲	۳۶۰
T ^{۳۱}	۸	۰/۱	۰/۰۸	۱۵	.	.	۶/۶	۰/۲۵۵	۲/۳۸۰	۱۲	۳۶۰
T ^{۳۲}	۸	۰/۱	۰/۱۲	۱۵	.	.	۶/۶	۰/۲۵۵	۲/۵۹۰	۱۲	۳۶۰
T ^{۳۳}	۶	.	۰/۰۸	۵	۰/۰۸	۵	۴/۷۹	۰/۱۹۲	۰/۱۰۵	۹/۶	۲۷۰
T ^{۳۴}	۸	.	۰/۰۸	۵	۰/۰۸	۵	۶/۶	۰/۲۵۵	۰/۱۴	۱۲	۳۶۰
T ^{۳۵}	۶	.	۰/۰۴	۱۰	۰/۰۴	۱۰	۴/۷۹	۰/۱۹۲	۰/۱۰۵	۹/۶	۲۷۰
T ^{۳۶}	۸	.	۰/۰۴	۱۰	۰/۰۴	۱۰	۶/۶	۰/۲۵۵	۰/۱۴	۱۲	۳۶۰
T ^{۳۷}	۱۲	.	۰/۰۴	۱۰	۰/۰۴	۱۰	۹/۹	۰/۳۸۳	۰/۲۰	۱۹/۲	۵۷۲
T ^{۳۸}	۱۲	.	۰/۰۸	۵	۰/۰۸	۵	۹/۹	۰/۳۸۳	۰/۲۱	۱۹/۲	۵۷۲

میانگین مربعات خطا ($RMSE$) را برای غلظت هوا در پایین دست هواده به دست آورد. $RMSE$ برای $RNG\ k-\epsilon$ (۰/۰۵۲)، $Standard\ k-\epsilon$ (۰/۳۴)، $Realizable\ k-\epsilon$ (۰/۳۱)، $SST\ k-\omega$ (۱/۰۱۹)، $Standard\ k-\omega$ (۱/۲۳) و LES (۱/۸۶) محاسبه شد.

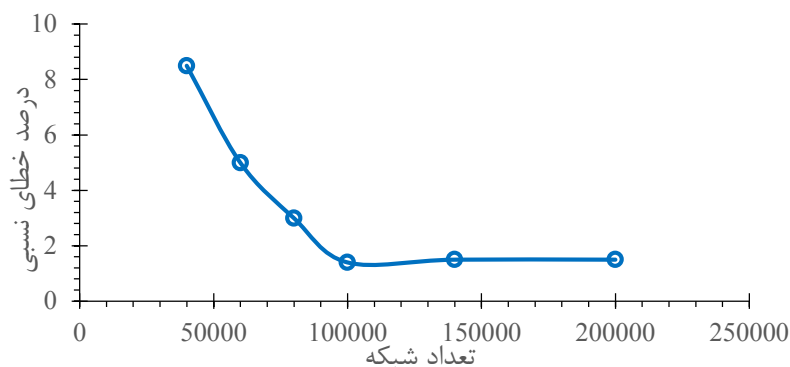
$$E\% = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \times 100 \quad (۶)$$

۳- نتایج و بحث

میدان جریان در پایین دست سیستم هواده به چهار ناحیه مجزا شامل ناحیه کاویتی، ناحیه برخورد، ناحیه تعادل و ناحیه میدان دور تقسیم می شود. مرز پایینی جریان با استفاده از خط ایزو-غلظت که در آن غلظت هوا (C) برابر با ۰/۹ است، تعیین می شود. بر این اساس، طول کاویتی (L) به صورت بازه ای از موقعیت اولیه هواده $x=0$ تا نقطه برخوردی که در آن فشار برابر با $P=P_{max}$ است، تعریف می گردد. در این رابطه، بیشینه فشار در کف شوت با نماد P_{max} بیان می شود که تابعی از طول مشخصه L_m است. همچنین فاصله L_D به عنوان پارامتر هندسی دیگری معرفی می گردد که فاصله بین موقعیت اولیه ($x=0$) و محل تلاقی نواحی هواده بالایی و پایینی جریان را مشخص می کند. برای تحلیل دقیق تر، دستگاه مختصات (x, z) در نظر گرفته شد؛ به گونه ای که محور x در امتداد کف شوت و محور z عمود بر آن

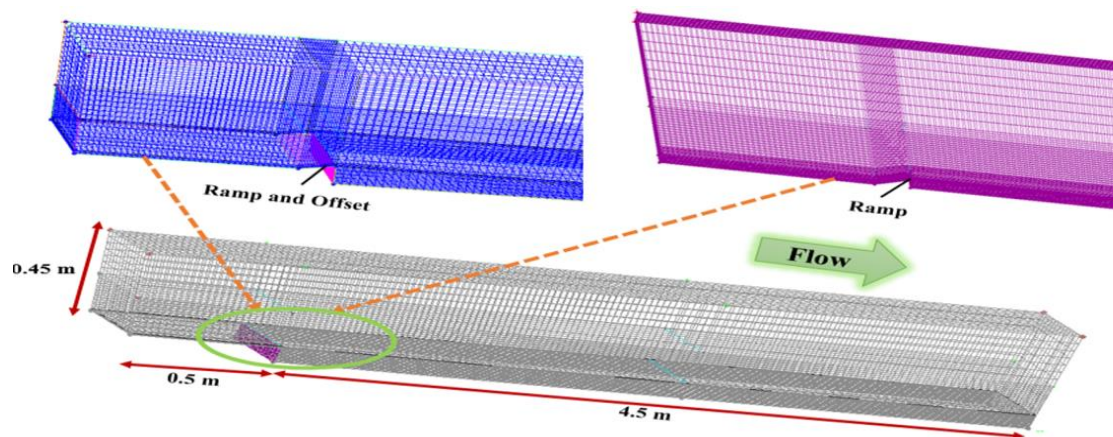
شبکه مورد استفاده در حوزه محاسباتی هستند. در شکل (۵) نتایج حاصل از استقلال شبکه نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می شود تفاوت مقدار درصد خطای نسبی بین شبکه های متوسط و ریز کمتر از ۰/۴٪ است. این نشان می دهد که وضوح شبکه متوسط به اندازه کافی متراکم است تا رفتارهای جریان را به طور دقیق ثبت کند. از این رو، در این مطالعه تعداد شبکه محاسباتی ۱۰۰۰۰۰ سلول در نظر گرفته شد و مقدار درصد خطا با استفاده از رابطه (۶) محاسبه شد. که در آن O_i نشان دهنده مقدار غلظت هوای آزمایشگاهی و E_i مقدار غلظت هوای شبیه سازی عددی می باشد. همچنین چگالی شبکه در نزدیک دیواره های شوت و نواحی اطراف هوادها افزایش یافت تا لایه مرزی آشفته و شدت آشفتگی را با دقت بیشتری ثبت کند. شکل (۶) شبکه بندی سرریز هواده شوت را با پله، رمپ و ترکیبی از پله و رمپ نشان می دهد. علاوه بر این، در شکل (۷) مقایسه توزیع غلظت هوا در ناحیه پایین دست هواده در بخش های مختلف هواده سرریز شوت نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود تطابق قابل توجهی میان نتایج حاصل از مدل سازی CFD و داده های آزمایشگاهی وجود دارد.

یکی از مهمترین مولفه های موثر بر دقت مدل سازی عددی با نرم افزارهای CFD، انتخاب یک مدل آشفتگی مناسب می باشد. در تحقیق حاضر برای شبیه سازی هوادهی سرریز شوت، مدل های آشفتگی $RNG\ k-\epsilon$ ، $Standard\ k-\epsilon$ ، $Realizable\ k-\epsilon$ ، $SST\ k-\omega$ ، $Standard\ k-\omega$ و LES برای شبیه سازی هواده های سرریز شوت مورد بررسی قرار گرفتند. مدل $RNG\ k-\epsilon$ در مقایسه با داده های تجربی، کمترین ریشه



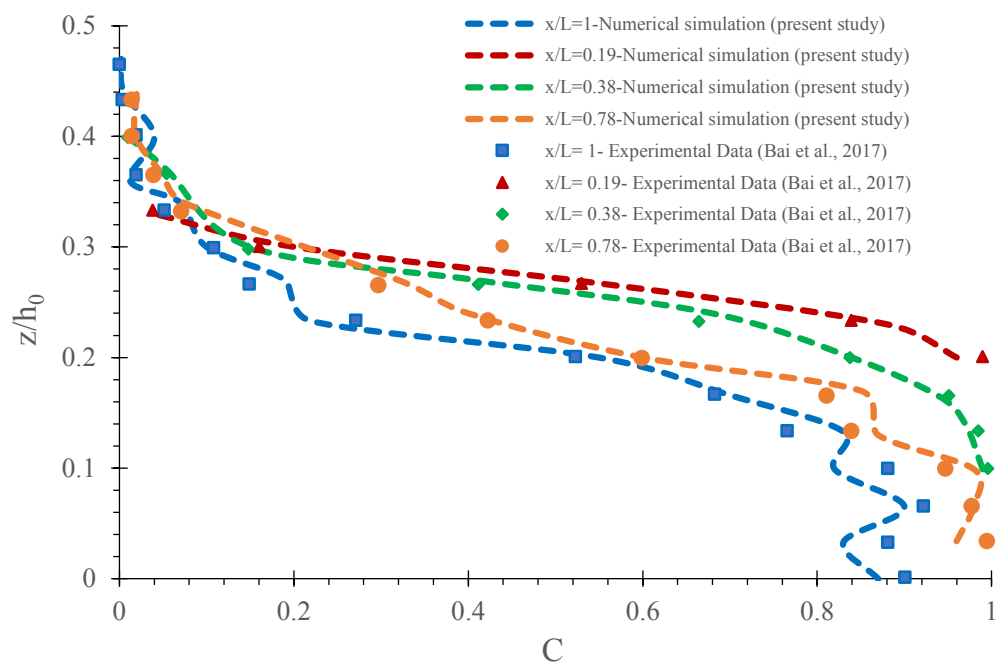
شکل ۵. میانگین خطای نسبی نتایج مدل عددی و داده های آزمایشگاهی.

Fig. 5. Average relative error of numerical model results and experimental data.



شکل ۶. شبکه‌بندی مدل عددی در تحقیق حاضر.

Fig. 6. Numerical model mesh generation in the present study.

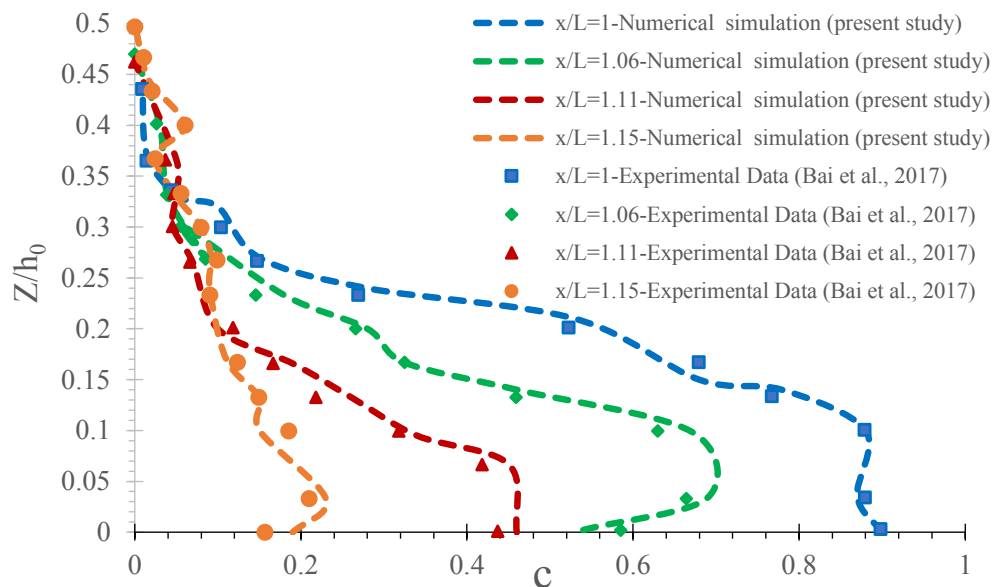


الف ناحیه کاویتی

a) The cavity area

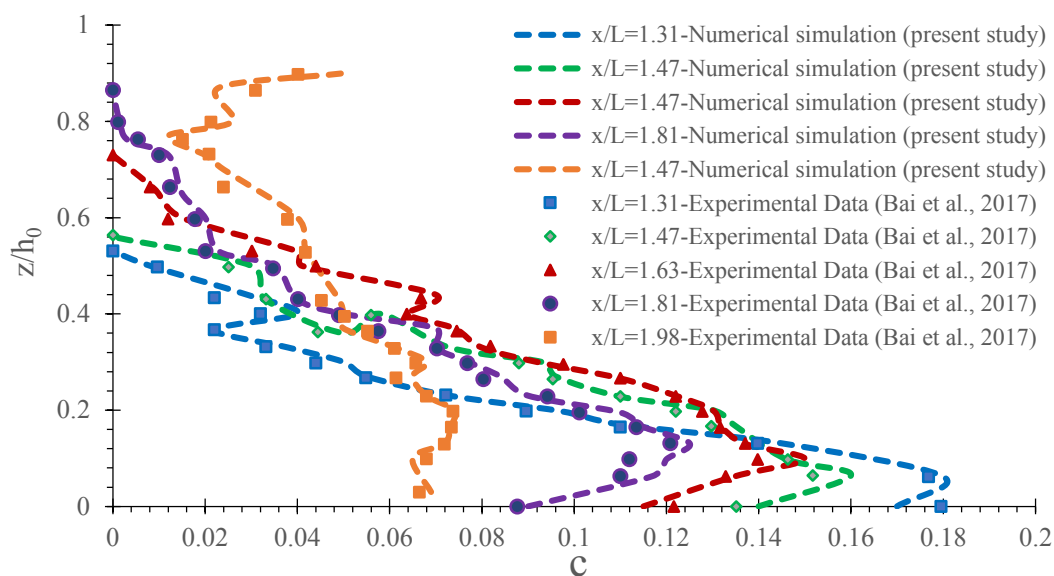
شکل ۷. مقایسه داده‌های عددی و تجربی غلظت هوا در نواحی پایین‌دست هوا ده سرریز شوت. (ادامه دارد)

Fig. 7. Comparison of numerical and experimental data of air concentration in different areas downstream of the chute spillway aerator. (Continued)



(ب) ناحیه برخورد

b) Impact area



(ج) ناحیه تعادل

c) Equilibrium area

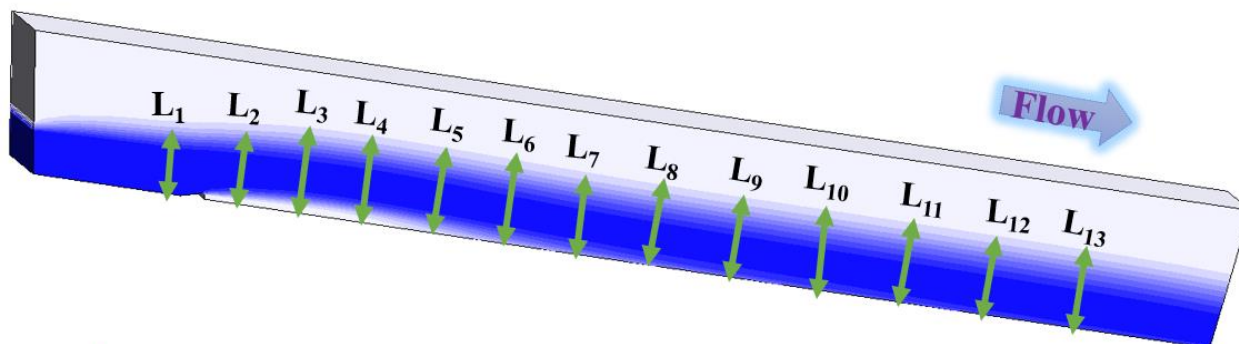
شکل ۷. مقایسه داده‌های عددی و تجربی غلظت هوا در نواحی مختلف پایین‌دست هواده سرریز شوت

Fig. 7. Comparison of numerical and experimental data of air concentration in different areas downstream of the chute spillway aerator.

جدول ۲. موقعیت مقاطع عرضی.

Table 2. Positions of the cross-sections.

Section	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7	L_8	L_9	L_{10}	L_{11}	L_{12}	L_{13}
$X(m)$	۰	۰/۲	۰/۴	۰/۶	۰/۸	۱	۱/۲	۱/۴	۱/۶	۱/۸	۲	۲/۲	۲/۴



شکل ۸. شماتیکی از مکان مقاطع در امتداد مسیر جریان.

Fig. 8. Schematic of the location of sections along the flow path.

تجربی و راه‌حل‌های تحلیلی را ارائه می‌دهد که نشان می‌دهد مدل عددی پدیده‌های فیزیکی مورد مطالعه را به طور دقیق شبیه‌سازی می‌کند. مقادیر به‌دست‌آمده برای R^2 ، $RMSE$ و $RE\%$ بین داده‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی به ترتیب ۰/۹۹۷، ۰/۰۳۴ و ۰/۳٪ به دست آمد. همچنین، نمودارهای پراکندگی بین داده‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی در شکل (۱۰) نشان دهنده دقت بالای تخمین مقادیر C_m بر اساس این داده‌ها می‌باشد.

$$\frac{C_m}{C_0} = \left(1 - \frac{x-L}{L}\right)^{1.9Fr-1.4} \quad (7)$$

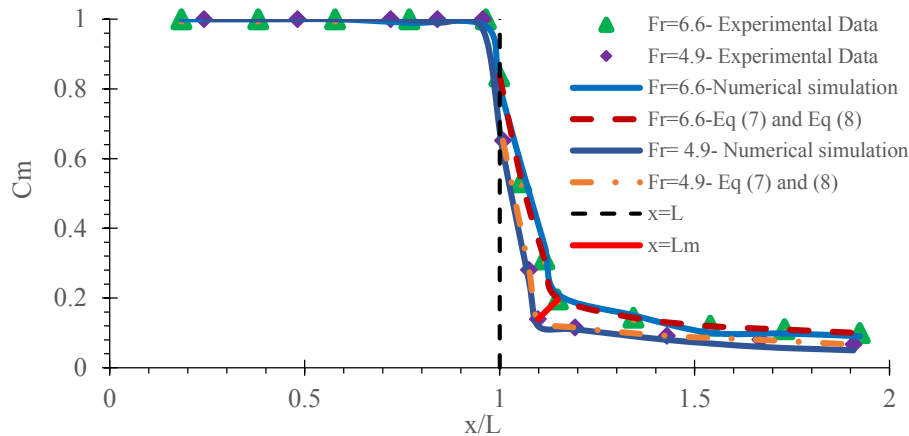
در رابطه فوق C_m نشان دهنده حداکثر غلظت هوای اندازه‌گیری شده در فاصله Z_m از کف تا مکانی با $C=C_m$ ، L طول کابیتی و $C_0=0.1(V_0+)$ C_0 نشان دهنده حداکثر غلظت هوا در $x=L$ است.

$$\frac{C_m}{C_{0,x=L_m}} = \left(\frac{x}{L_m}\right)^{-0.31Fr+0.055} \quad (8)$$

تعریف شده است (شکل ۳).

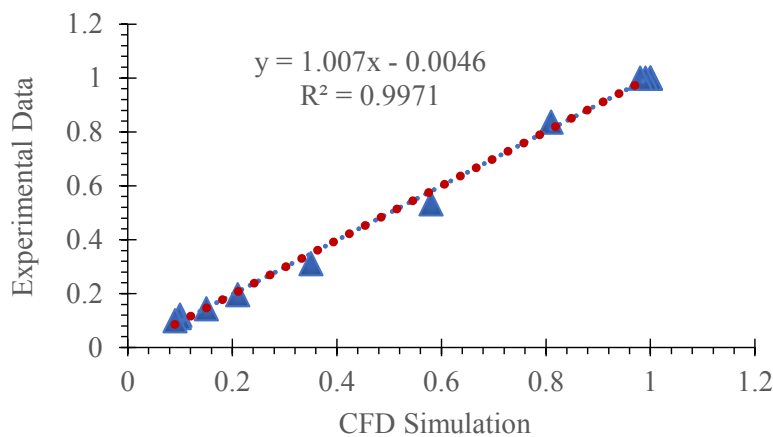
به‌منظور نمایش و تحلیل تغییرات جریان، ۱۳ مقطع عرضی با نمادهای L_1 تا L_{13} تعریف شد که هر یک عمود بر کف شوت قرار دارند. در این نواحی پارامترهای جریان از جمله توزیع غلظت هوا، سرعت و فشار مورد بررسی قرار گرفتند (شکل ۸). علاوه بر این، فاصله بین مقاطع متوالی (ΔL) طبق جدول (۲) برابر با ۰/۲ متر در نظر گرفته شد که امکان مطالعه تغییرات جریان در طول مسیر را با دقت مناسب فراهم می‌سازد.

شکل (۹) تغییرات حداکثر غلظت هوا (C_m) را برای دو عدد فرود مختلف، ۴/۹ و ۶/۶ در x/L های مختلف نشان می‌دهد. همان‌گونه که در ناحیه کابیتی ($0 < x < L$) مشاهده می‌شود، سطح زیرین جریان در معرض هوا قرار داشته و مقدار بیشینه غلظت هوا ثابت و برابر با ۱ = C_m باقی می‌ماند. این وضعیت در نقطه $x=L$ تحت تأثیر برخورد جت ایجاد شده و پس از آن کاهش اندکی در مقدار C_m رخ می‌دهد. با حرکت جریان به سمت پایین‌دست، مقدار C_m به‌تدریج در طول شوت کاهش می‌یابد. با این حال، نرخ کاهش در ناحیه برخورد ($L < x < L_m$) با ناحیه تعادل ($L_m < x < LD$) متفاوت است. علاوه بر این، مقایسه نتایج عددی و داده‌های تجربی بای و همکاران [۱۹]، و همچنین معادلات (۷) و (۸)، تطابق قوی بین شبیه‌سازی عددی، اندازه‌گیری‌های



شکل ۹. تغییرات غلظت هوا (C_m) در مقابل فاصله نسبی (x/L).

Fig. 9. Variation of air concentration (C_m) versus relative distance (x/L).



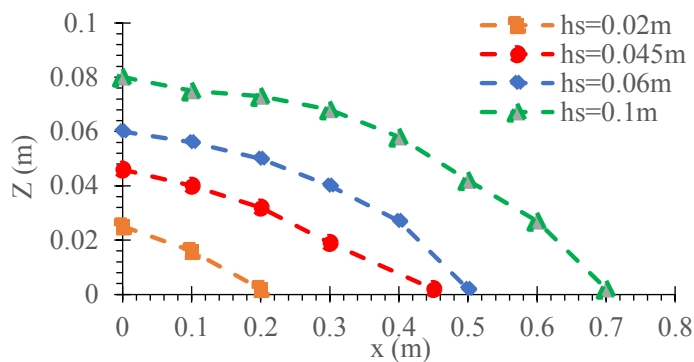
شکل ۱۰. نمودار پراکندگی برای حداکثر غلظت هوا.

Fig. 10. Scatter plot for the maximum air concentration.

۳-۱- پروفیل‌های سطح آب در ناحیه کاویتی

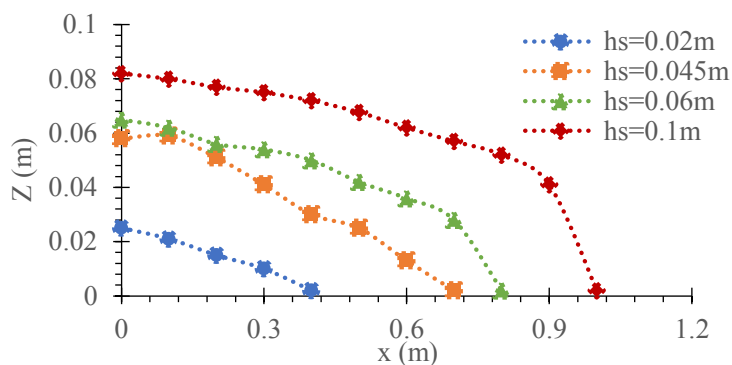
پروفیل‌های سطح آب در ناحیه کاویتی ($0 < x < L$) در امتداد شوت در شکل (۱۱) ارائه شده‌اند. در بررسی هوادهی سرریز شوت، سطح مشترک هوا - آب بر اساس خطوط ایزو-غلظت $C = 0.9$ تعریف می‌گردد؛ به‌طوری‌که این خط، مرز میان ناحیه مخلوط هوا - آب و جریان آب شفاف را مشخص می‌کند. حداکثر غلظت هوا و موقعیت آن در عمق جریان، وابسته به طول و زاویه رمپ، ارتفاع پله و عدد فرود بالادست است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش این پارامترها منجر به افزایش غلظت هوا در ناحیه حفره می‌گردد.

همان‌طور که در شکل‌های (۱۱-الف و ب) مشاهده می‌شود، افزایش ارتفاع هواده پله (hs) منجر به افزایش محل برخورد جت و طول ناحیه کاویتی شده است. به‌طور مثال، افزایش ارتفاع هواده پله در شرایط عدد فرود $Fr = 9/9$ منجر به افزایش طول ناحیه حفره به میزان حدود ۳۰ درصد نسبت به شرایط $Fr = 6/6$ شده است. همچنین مطابق شکل‌های (۱۱-ج و د)، افزایش ۵۰ درصدی زاویه رمپ در شرایط یکسان عدد فرود بالادست و طول رمپ هواده، طول ناحیه کاویتی را تا بیش از ۲۵ درصد افزایش داده است. این امر نشان می‌دهد که ترکیب شرایط هیدرولیکی و هندسی نقش به‌سزایی در تقویت



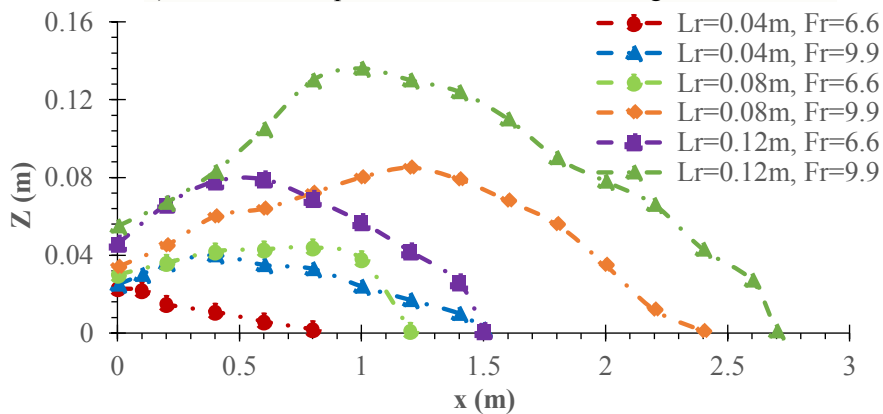
الف) پروفیل سطح آب برای ارتفاع‌های مختلف برای هواده پله با عدد فرود ۶/۶

a) Water surface profile for various offset heights with $Fr=6.6$



ب) پروفیل سطح آب برای ارتفاع‌های مختلف هواده پله با عدد فرود ۹/۹

b) Water surface profile for various offset heights with $Fr=9.9$

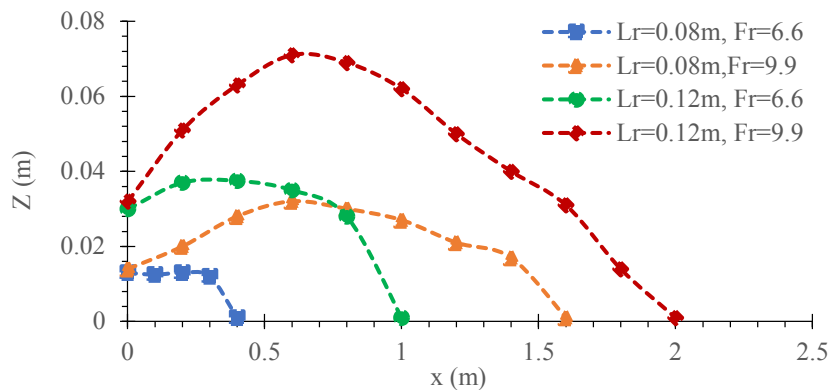


ج) پروفیل سطح آب برای طول‌های مختلف هواده رمپ با زاویه $\Phi=15^\circ$

c) Water surface profile for various ramp lengths with $\Phi=15^\circ$

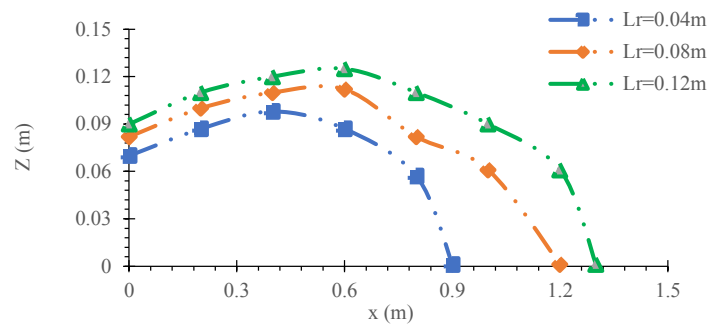
شکل ۱۱. پروفیل سطح آب برای انواع مختلف هواده‌های شوت در ناحیه کاویتی. (ادامه دارد)

Fig. 11. Water surface profile for various types of chute aerators in the cavity zone. (Continued)



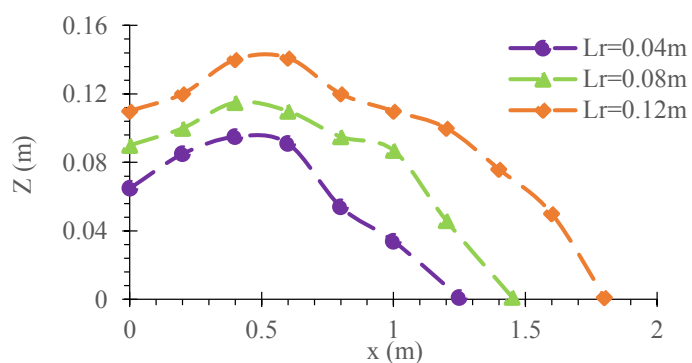
د) پروفیل سطح آب برای طول‌های مختلف هواده رمپ با زاویه $\Phi=10^\circ$

d) Water surface profile for various ramp lengths with $\Phi=10^\circ$



ه) پروفیل سطح آب برای طول‌های مختلف ترکیب هواده رمپ و پله با $h_s=0.045$ m و $\Phi=10^\circ$

e) Water surface profile for different lengths of ramps and offsets with $h_s=0.045$ m and $\Phi=10^\circ$

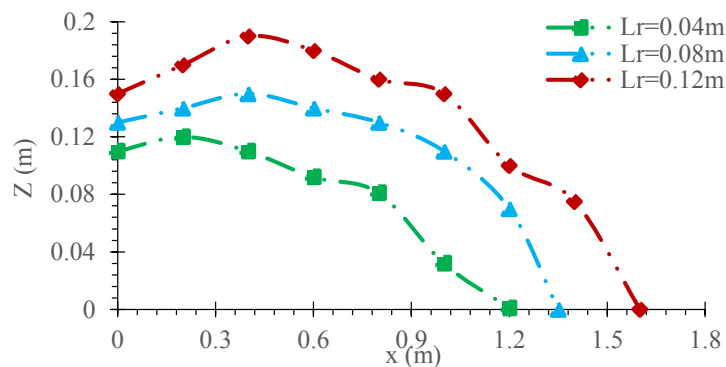


و) پروفیل سطح آب برای طول‌های مختلف ترکیب هواده رمپ و پله با $h_s=0.06$ m و $\Phi=15^\circ$

f) Water surface profile for different lengths of ramps and offsets with $h_s=0.06$ m and $\Phi=15^\circ$

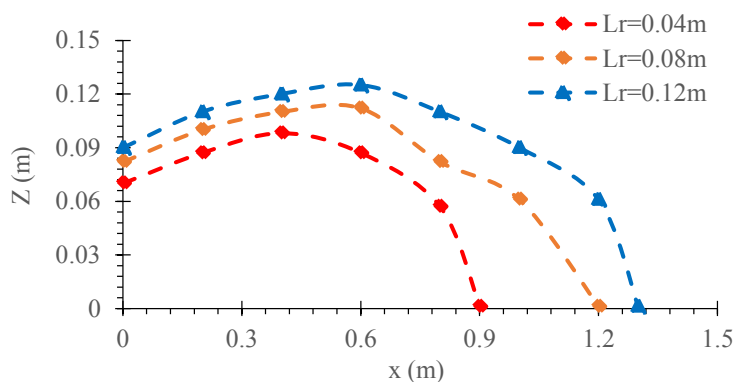
شکل ۱۱. پروفیل سطح آب برای انواع مختلف هواده‌های شوت در ناحیه کایوتی. (ادامه دارد)

Fig. 11. Water surface profile for various types of chute aerators in the cavity zone. (Continued)



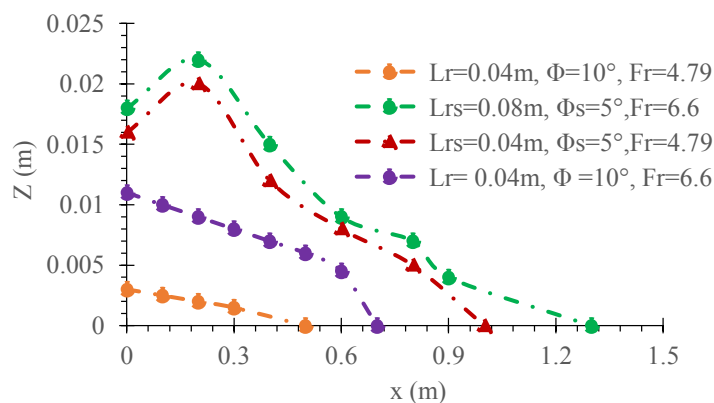
ز) پروفیل سطح آب برای طول‌های مختلف ترکیب هوا ده رمپ و پله با $h_s=0.1\text{m}$ و $\Phi=15^\circ$

g) Water surface profile for different lengths of ramps and offsets with $h_s=0.1\text{m}$ and $\Phi=15^\circ$



ح) پروفیل سطح آب برای طول‌های مختلف ترکیب هوا ده رمپ و پله با $h_s=0.45\text{m}$ و $\Phi=10^\circ$

h) Water surface profile for different lengths of ramps and offsets with $h_s=0.45\text{m}$ and $\Phi=10^\circ$

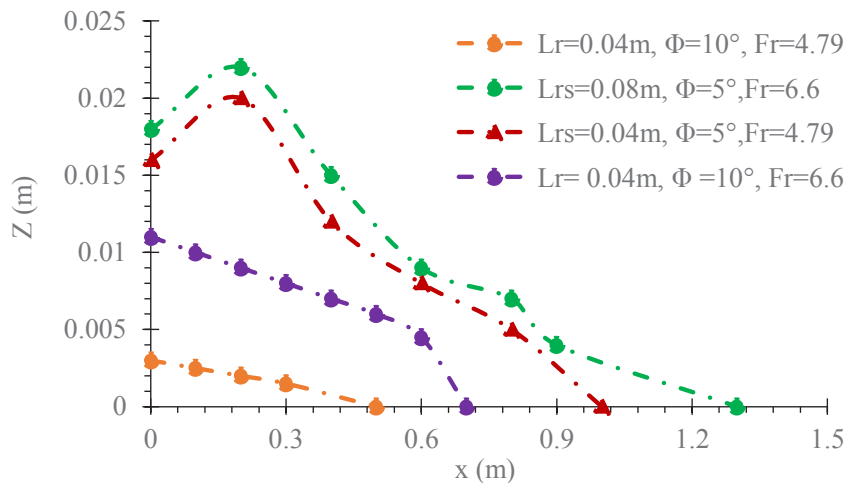


ط) پروفیل سطح آب برای طول‌ها و زوایای مختلف هوا ده رمپ کف و دیواره جانبی

i) Water surface profile for different lengths and angles of bottom and side wall ramp

شکل ۱۱. پروفیل سطح آب برای انواع مختلف هوا ده‌های شوت در ناحیه کاویتی.

Fig. 11. Water surface profile for various types of chute aerators in the cavity zone.



شکل ۱۲. مقایسه پروفیل سطح آب برای طول‌ها و زوایای مختلف رمپ کف و رمپ دیواره جانبی.

Fig. 12. Comparison of water surface profile for different lengths and angles of ramp and bottom and side wall ramp.

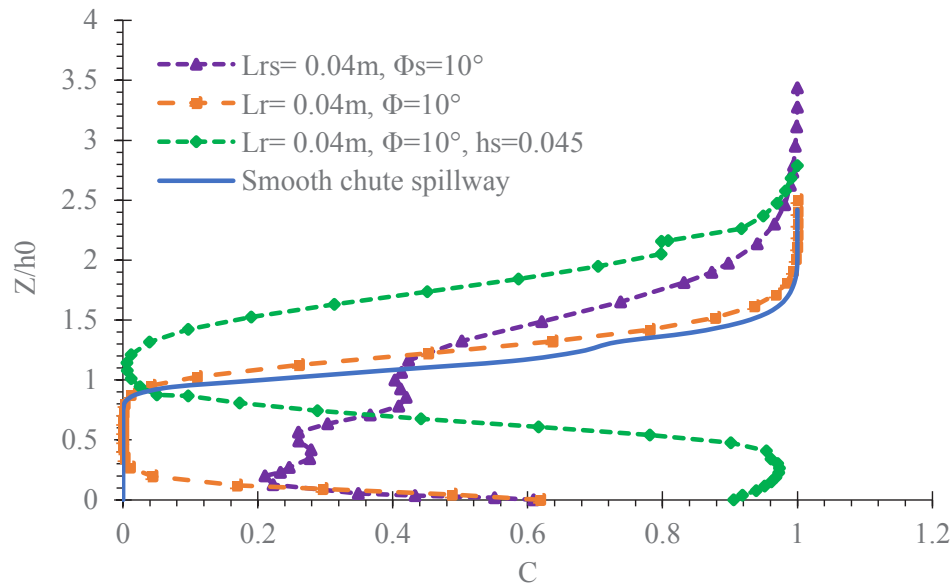
۳-۲- توزیع غلظت هوا در عمق جریان

در شکل (۱۳)، توزیع غلظت هوا در یک سرریز شوت صاف (بدون هواده‌ای) و انواع مختلف هواده‌های شوت شامل هواده رمپ، رمپ کف، رمپ دیواره جانبی و ترکیب رمپ با پله، در مقاطع مختلف ($L - 10L$) و در عدد فرود $Fr = 6/6$ مورد مقایسه قرار گرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در شوت صاف، هواده‌ای در کف جریان وجود ندارد؛ در حالی که استفاده از هواده‌های رمپ کف و دیواره جانبی سبب افزایش چشمگیر غلظت هوا در عمق جریان می‌شود. همچنین، حضور مجرای تعبیه‌شده در دیواره جانبی، امکان ورود هوای بیشتری به داخل جریان فراهم کرده و در نتیجه، غلظت هوا نسبت به سایر روش‌های هواده‌ای افزایش می‌یابد. اگرچه ترکیب پله و رمپ نیز افزایش محسوسی در غلظت هوا ایجاد می‌کند، اما هواده رمپ کف همراه با دیواره جانبی، کارایی بالاتری نشان داده است؛ به‌گونه‌ای که غلظت هوا در ناحیه میانی جریان به طور قابل توجهی بیشتر از حالتی است که تنها از رمپ کف استفاده شود. علاوه بر این، در هواده رمپ کف به تنهایی، ناحیه‌ای با هوای متراکم در نزدیکی کف و یک ناحیه آب شفاف (بدون هواده‌ای) در مرکز جریان مشاهده می‌شود. در حالی که ترکیب رمپ کف و دیواره جانبی این ناحیه آب شفاف را به‌طور کامل حذف کرده و جریان کاملاً هواده‌ای شده‌ای ایجاد می‌کند. این ویژگی موجب افزایش حفاظت سازه در

فرایند هواده‌ای دارد.

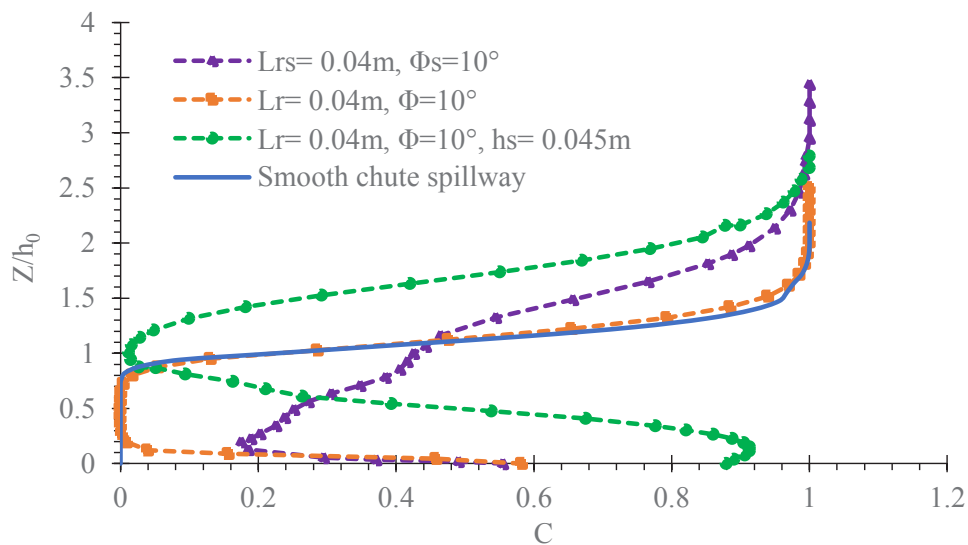
نتایج مربوط به ترکیب هواده پله و رمپ با عدد فرود $Fr = 6/6$ شکل‌های (۱۱-ه تا ج) نشان می‌دهد که طول ناحیه برخورد جریان در این حالت نسبت به استفاده منفرد از پله یا رمپ حدود ۳۵ تا ۵۰ درصد افزایش یافته است. این موضوع بیانگر راندمان بالاتر ترکیب پله و رمپ در مقایسه با سایر پیکربندی‌ها است. همچنین، همان‌طور که در شکل (۱۱-ط) مشاهده می‌شود، استفاده همزمان از هواده‌های رمپ کف و دیواره جانبی، غلظت متوسط هوا در ناحیه کاویتی را به میزان قابل توجهی (در حدود ۲۵ تا ۵۰ درصد) افزایش داده است. دلیل این امر، ورود جریان‌های جانبی هوا از طریق مجراهای دیواره و افزایش شدت تلاطم در این بخش است.

در شکل (۱۲) پروفیل‌های سطح آب در ناحیه کاویتی برای دو حالت هواده رمپ کف (L_r) و ترکیب رمپ کف با دیواره جانبی (L_{rs}) مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که طول ناحیه کاویتی در حالت ترکیبی به‌طور میانگین ۴۵ درصد بیشتر از حالت صرفاً رمپ کف است. با توجه به اینکه افزایش طول جت ارتباط مستقیمی با افزایش نرخ هواده‌ای دارد، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از ترکیب رمپ کف و دیواره جانبی باعث بهبود قابل ملاحظه ویژگی‌های جریان شده و آن را به طرخی مؤثرتر برای کاهش خطر کاویتاسیون در سرریزهای شوت تبدیل می‌کند.



الف) پروفیل غلظت هوا در بخش L۶

a) Air concentration profile at section L6

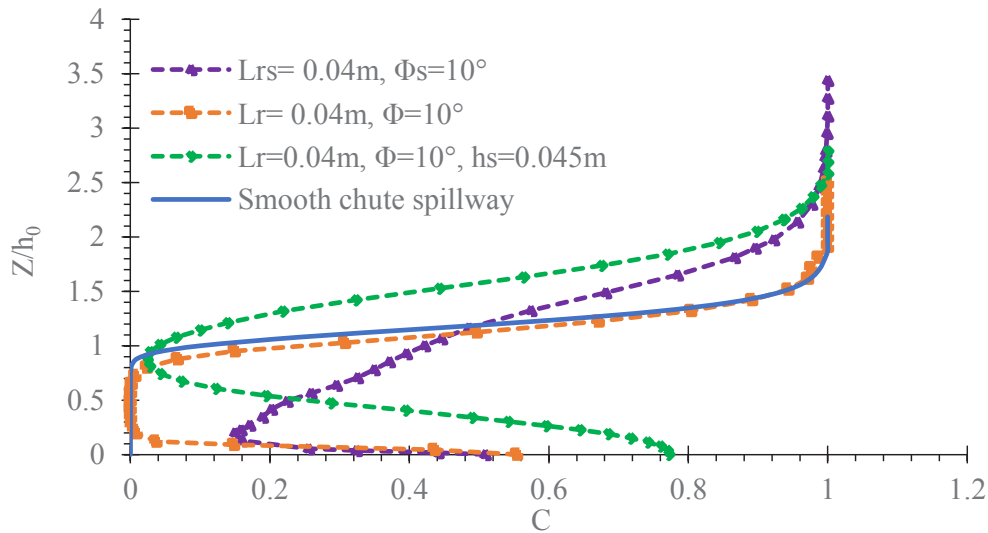


ب) پروفیل غلظت هوا در بخش L۷

b) Air concentration profile at section L7

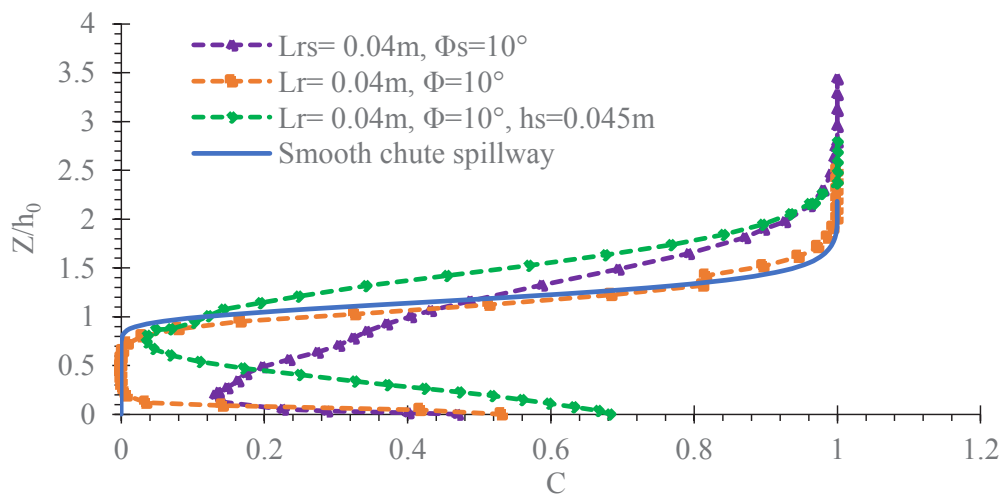
شکل ۱۳. مقایسه توزیع غلظت هوا بین سرریز شوت صاف و انواع مختلف هواده‌های شوت در مقاطع مختلف هواده‌ها با $Fr=6.6$. (ادامه دارد)

Fig. 13. Comparison of air concentration distribution between smooth chute spillway and different types of chute aerators in various sections of aerators with $Fr=6.6$. (Continued)



ج) پروفیل غلظت هوا در بخش L۸

c) Air concentration profile at section L8

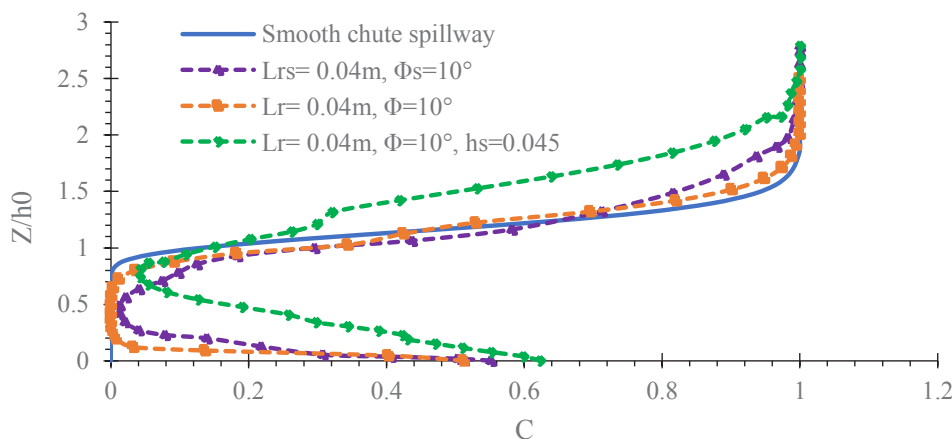


د) پروفیل غلظت هوا در بخش L۹

d) Air concentration profile at section L9

شکل ۱۳. مقایسه توزیع غلظت هوا بین سرریز شوت صاف و انواع مختلف هواده‌های شوت در مقاطع مختلف هواده‌ها با $Fr=6.6$.
(ادامه دارد)

Fig. 13. Comparison of air concentration distribution between smooth chute spillway and different types of chute aerators in various sections of aerators with $Fr=6.6$. (Continued)



ه) پروفیل غلظت هوا در مقطع L۱۰

e) Air concentration profile at section L10

شکل ۱۳. مقایسه توزیع غلظت هوا بین سرریز شوت صاف و انواع مختلف هواده‌های شوت در مقاطع مختلف هواده‌ها با $Fr= 6.6$.

Fig. 13. Comparison of air concentration distribution between smooth chute spillway and different types of chute aerators in various sections of aerators with $Fr= 6.6$.

می‌باید (برای زاویه رمپ ۱۰ درجه). به عبارت دیگر، افزایش ۳۳ درصدی دبی باعث افزایش ۳۰ درصدی طول ناحیه کاویتی می‌شود. همچنین، افزایش زاویه رمپ دیواره از ۵ درجه به ۱۰ درجه، طول ناحیه کاویتی را افزایش می‌دهد. به عبارت دیگر افزایش ۱۰۰ درصدی زاویه رمپ دیواره، باعث افزایش ۱۰ درصدی طول ناحیه کاویتی می‌شود.

جدول (۴) ترکیب هواده‌های پله و رمپ را نشان می‌دهد. در این نوع هواده‌ها، طول ناحیه کاویتی با افزایش ارتفاع پله، طول رمپ و زاویه رمپ افزایش می‌یابد. همانطور که مشاهده می‌شود، حداکثر طول ناحیه کاویتی مربوط به هواده با ارتفاع پله ۰/۱ متر، طول رمپ ۰/۱۲ متر، زاویه ۱۵ درجه و عدد فرود بالادست ۶/۶ است که طول آن ۱/۸ متر است.

با توجه به ویژگی‌های ارائه شده در جدول (۵)، می‌توان دریافت که در رمپ هواده‌ها، طول ناحیه کاویتی با افزایش عدد فرود به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. طول ناحیه کاویتی در رمپ هواده‌ها با طول ۰/۱۲ متر، زاویه ۱۵ درجه و عدد فرود ۶/۶ ۱/۵ متر است، در حالی که ناحیه کاویتی با عدد فرود ۹/۹، ۲/۷ متر است. بنابراین، با افزایش ۵۰ درصدی عدد فرود، طول ناحیه کاویتی ۸۷ درصد افزایش می‌یابد. جدول (۶) مربوط به هواده پله است و مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع پله و عدد فرود بالادست، طول

برابر فرسایش ناشی از کاویتاسیون خواهد شد.

۳-۳- طول ناحیه کاویتی

طول ناحیه کاویتی (L_c) یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی عملکرد هواده‌های شوت محسوب می‌شود. این پارامتر فاصله‌ای است که جریان پس از جدایش از لبه بالایی یا منحرف‌کننده طی می‌کند تا مجدداً به بستر شوت برخورد کند یا به نقطه‌ای با بیشینه فشار پایه در ناحیه برخورد برسد. طول کاویتی تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله طول رمپ (L_r)، زاویه رمپ (θ)، زاویه کف شوت (α)، سرعت جریان ورودی (V)، عمق آب (h_0)، ضریب ورود هوا (β) و عدد فرود (Fr) قرار دارد. ورود هوای ناشی از ناحیه کاویتی به جریان متناسب با طول این ناحیه بوده و با افزایش سرعت جت (فوران)، طول ناحیه کاویتی بیشتر شده و در نتیجه حجم هوای ورودی افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج جداول (۳) تا (۶)، تغییرات طول ناحیه کاویتی در انواع مختلف هواده‌ها شامل رمپ، ترکیب رمپ و پله، رمپ کف و دیواره جانبی و پله مورد بررسی قرار گرفته است.

مطابق جدول (۳)، با افزایش دبی آب از ۰/۱۹۲ متر مکعب بر ثانیه به ۰/۲۵۵ متر مکعب بر ثانیه، طول ناحیه کاویتی از ۱ متر به ۱/۳ متر افزایش

جدول ۳. مشخصات جریان در هواده‌های رمپ.

Table 3. Flow characteristics in ramps aerators.

L_r (m)	Φ (degree)	Q_w (m ³ /s)	$Q_a \times 10^{-3}$ (m ³ /s)	β %	Fr	C%	L (m)	L_a (m)
۰/۰۴	۱۵	۰/۲۵۵	۰/۲۱	۰/۸۴	۶/۶	۹	۰/۸	۱/۴
۰/۰۴	۱۵	۰/۳۸۳	۰/۳۱۵	۰/۸۳	۹/۹	۱۱	۱/۵	۱/۸
۰/۰۸	۱۵	۰/۲۵۵	۰/۴۲	۱/۶۵	۶/۶	۸	۱/۲	۱/۵
۰/۰۸	۱۵	۰/۳۸۳	۰/۶۳۲	۱/۶۵	۹/۹	۸/۵	۲/۴	۱/۲
۰/۱۲	۱۵	۰/۲۵۵	۰/۶۳	۲/۴۷	۶/۶	۱۰	۱/۵	۱/۶
۰/۱۲	۱۵	۰/۳۸۳	۰/۹۴۵	۲/۴۷	۹/۹	۹	۲/۷	۲/۲
۰/۰۴	۱۰	۰/۱۹۲	۰/۱۰۴	۰/۵۵	۴/۹۷	۹	۰/۵	۱
۰/۰۴	۱۰	۰/۲۵۵	۰/۱۴	۰/۵۵	۶/۶	۹/۵	۰/۸	۱/۲
۰/۰۸	۱۰	۰/۲۵۵	۰/۲۷۵	۱/۰۸	۶/۶	۱۰	۰/۹	۱/۳
۰/۰۸	۱۰	۰/۳۸۳	۰/۴۱۳	۱/۰۸	۹/۹	۱۱	۱/۶	۱/۹
۰/۱۲	۱۰	۰/۲۵۵	۰/۴۱۳	۱/۶۲	۶/۶	۱۲	۱	۱/۶
۰/۱۲	۱۰	۰/۳۸۳	۰/۶۲	۱/۶۲	۹/۹	۸	۲	۱/۸

جدول ۴. مشخصات جریان در هواده‌هایی ترکیبی رمپ و پله.

Table 4. Flow characteristics in ramp with offset aerators.

h_s (m)	L_r (m)	Φ (degree)	Q_w (m ³ /s)	$Q_a \times 10^{-3}$ (m ³ /s)	β %	Fr	C%	L (m)	L_a (m)
۰/۰۴۵	۰/۰۴	۱۵	۰/۲۵۵	۰/۶۸۲	۲/۶۷	۶/۶	۹	۰/۹	۱/۵
۰/۰۴۵	۰/۰۸	۱۵	۰/۲۵۵	۰/۶۸۲	۲/۶۷	۶/۶	۱۲	۱/۳	۱/۸
۰/۰۴۵	۰/۱۲	۱۵	۰/۲۵۵	۰/۶۸۲	۲/۶۷	۶/۶	۸	۱/۴	۱/۹
۰/۰۶	۰/۰۴	۱۵	۰/۲۵۵	۰/۶۹۷	۲/۷۳	۶/۶	۸/۵	۱/۲۵	۱/۲
۰/۰۶	۰/۰۸	۱۵	۰/۲۵۵	۰/۶۹۹	۲/۷۴	۶/۶	۱۱	۱/۴۵	۲/۲
۰/۰۶	۰/۱۲	۱۵	۰/۲۵۵	۰/۷۲۳	۲/۸۳	۶/۶	۱۰	۱/۶	۲/۷
۰/۱	۰/۰۴	۱۵	۰/۲۵۵	۰/۷۵۶	۲/۹۶	۶/۶	۹	۱/۲	۲/۴
۰/۱	۰/۰۸	۱۵	۰/۲۵۵	۰/۷۸۱	۳/۰۶	۶/۶	۱۱	۱/۳۵	۲/۵
۰/۱	۰/۱۲	۱۵	۰/۲۵۵	۰/۷۹۸	۳/۱۳	۶/۶	۸	۱/۸	۲/۶
۰/۰۴۵	۰/۰۴	۱۰	۰/۲۵۵	۰/۶۷۱	۲/۶۳	۶/۶	۱۱۲	۰/۹	۱/۸
۰/۰۴۵	۰/۰۸	۱۰	۰/۲۵۵	۰/۶۸۳	۲/۶۸	۶/۶	۹/۵	۱/۲	۱/۹
۰/۰۴۵	۰/۱۲	۱۰	۰/۲۵۵	۰/۶۹۴	۲/۷۲	۶/۶	۱۰	۱/۳	۲/۴

جدول ۵. مشخصات جریان در هواده‌های رمپ کف و دیواره جانبی.

Table 5. Flow characteristics in bottom and side wall ramp aerators.

Lr	Φ (degree)	L_{rs} (m)	Φ_s (degree)	Q_w (m ³ /s)	$Q_a \times 10^{-3}$ (m ³ /s)	β %	Fr	C%	L (m)	La (m)
۰/۰۴	۱۰	۰/۰۴	۱۰	۰/۱۹۲	۱/۰۵	۰/۵۵	۴/۹۷	۱۱	۱	۲/۲
۰/۰۴	۱۰	۰/۰۴	۱۰	۰/۲۵۵	۱/۴	۰/۵۵	۶/۶	۹	۱/۳	۲/۷
۰/۰۸	۵	۰/۰۸	۵	۰/۱۹۲	۱/۰۵	۰/۵۵	۴/۹۷	۱۰	۰/۹	۲
۰/۰۸	۵	۰/۰۸	۵	۰/۲۵۵	۱/۴	۰/۵۵	۶/۶	۸	۱/۴۵	۲/۶
۰/۰۴	۱۰	۰/۰۴	۱۰	۰/۳۸۳	۰/۲	۰/۵۴	۹/۹	۸/۵	۱/۶	۳
۰/۰۸	۵	۰/۰۸	۵	۰/۳۸۳	۰/۲۱	۰/۵۵	۹/۹	۱۲	۱/۵	۲/۹

جدول ۶. مشخصات جریان در هواده پله.

Table 6. Flow characteristics in offsets aerators.

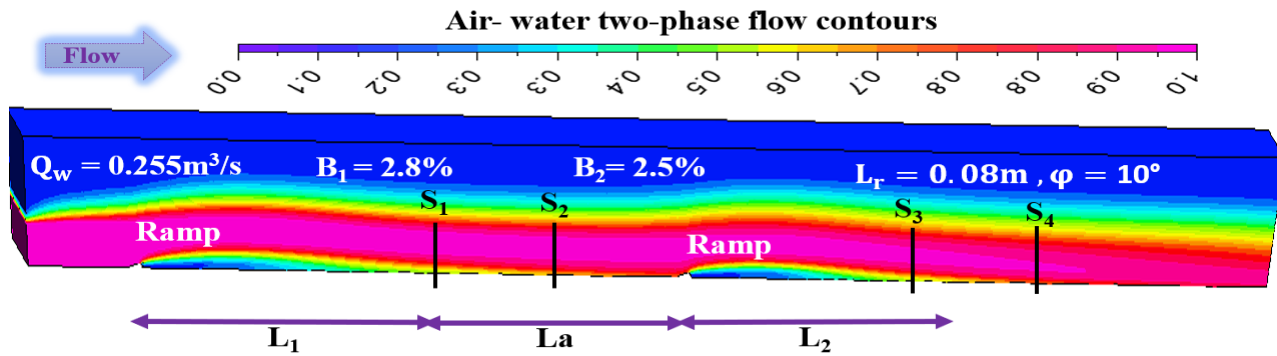
h_s (m)	Q_w (m ³ /s)	$Q_a \times 10^{-3}$ (m ³ /s)	β %	Fr	C%	L (m)	La (m)
۰/۰۲	۰/۲۵۵	۰/۳۹۲	۰/۱۵۳	۶/۶	۱۲	۰/۲	۱/۱
۰/۰۲	۰/۳۸۳	۰/۵۸۸	۰/۱۵۴	۹/۹	۸	۰/۴	۱/۲
۰/۰۴۵	۰/۲۵۵	۰/۸۷۱	۰/۳۴۲	۶/۶	۱۰	۰/۴۵	۱/۳
۰/۰۴۵	۰/۳۸۳	۱/۳۲۳	۰/۳۴۵	۹/۹	۸/۵	۰/۷	۱/۵
۰/۰۶	۰/۲۵۵	۱/۱۷۶	۰/۴۶	۶/۶	۹	۰/۵	۱/۴
۰/۰۶	۰/۳۸۳	۱/۷۶۴	۰/۴۶۱	۹/۹	۱۱	۰/۸	۱/۶
۰/۱	۰/۲۵۵	۱/۸۶۲	۰/۷۳	۶/۶	۱۱/۵	۰/۷	۱/۵
۰/۱	۰/۳۸۳	۲/۷۹۳	۰/۷۳۲	۹/۹	۹/۵	۱	۱/۷

۳-۴- تعیین فاصله بین هواده‌ها

تعیین فاصله مناسب هواده‌ها و تأمین حداقل غلظت هوای مورد نیاز برای جلوگیری از آسیب کاویتاسیون در پایین دست هواده‌های شوت ضروری است. ناحیه کاویتی زیر هواده، که تحت تأثیر فاصله هواده و تأمین هوا قرار دارد، تأثیر قابل توجهی بر ورود هوا و محافظت در برابر کاویتاسیون دارد. فاصله بین هواده‌ها به حداقل غلظت هوا، نرخ خروج هوا در امتداد شوت و هندسه خاص شوت و شرایط جریان بستگی دارد. جداول (۳) تا (۶) فاصله

ناحیه کاویتی افزایش می‌یابد. با افزایش ارتفاع پله از ۰/۰۶ متر به ۰/۱ متر با دبی آب ۰/۳۸۳ متر مکعب بر ثانیه، طول ناحیه کاویتی تقریباً ۶ درصد افزایش می‌یابد.

هواده‌های رمپ کف و دیواره جانبی، هواده‌ی بهتری نسبت به سایر هواده‌ها ارائه می‌دهند، زیرا هم در کف شوت و هم در دیواره جانبی شوت دیواره، ناحیه کاویتی ایجاد می‌کنند. بنابراین، طول ناحیه کاویتی در این هواده بیشتر از هواده‌ی است که ویژگی‌های مشابهی دارد.



شکل ۱۴. فاصله بین دو هواده در سرریز شوت.

Fig. 14. Distance between two aerators in the chute spillway.

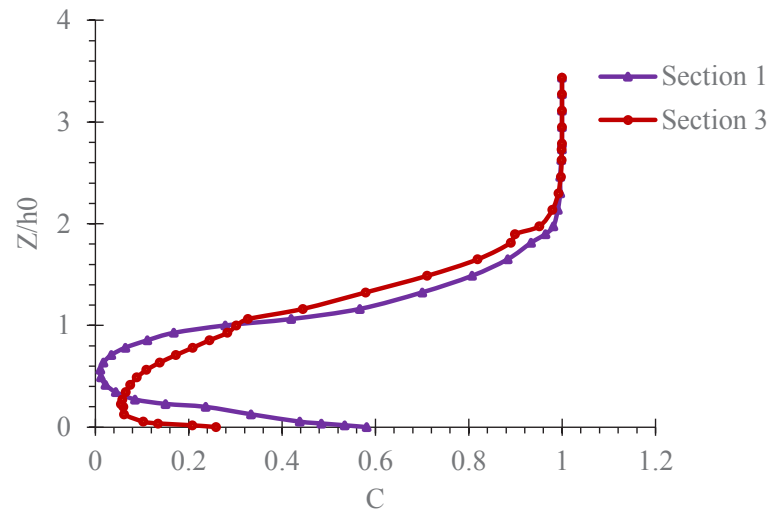
در هواده دوم بهینه بوده است. علاوه بر این، با گذشت زمان، غلظت هوا به مقدار ثابتی رسیده است که نشان دهنده توزیع یکنواخت غلظت هوا در هوادهای شوت است. شکل (۱۷) نشان می‌دهد که دبی هوا در انتهای سرریز شوت با زمان تغییر می‌کند. مشاهده می‌شود که دبی هوا در ابتدا به صورت نوسانی افزایش می‌یابد و با گذشت زمان، کاهش و دوباره افزایش می‌یابد و در نهایت به مقدار ثابتی می‌رسد. می‌توان نتیجه گرفت که جریان هوا به طور یکنواخت در طول شوت توزیع شده و به مقدار بهینه رسیده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، جریان هوادهی در پایین‌دست هواده شوت مورد بررسی عددی قرار گرفت. به منظور بررسی مشخصات جریان و تعیین فاصله میان دو هواده، مدل عددی سه‌بعدی برای انواع مختلف هواده‌ها شامل رمپ، پله، ترکیب رمپ و پله و همچنین رمپ‌های کف و دیواره جانبی بررسی شدند. نتایج شبیه‌سازی‌ها با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه و با تطابق بسیار خوبی اعتبارسنجی شدند؛ به طوری که خطای نسبی حدود ۴٪ برآورد گردید. همچنین مشخص شد که غلظت هوا تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله طول رمپ، زاویه رمپ، ارتفاع پله و عدد فرود بالادست قرار می‌گیرد. افزایش مقادیر این پارامترها منجر به غلظت هوای بالاتر در ناحیه کاویتی هواده می‌شود. در میان هندسه‌های مختلف بررسی شده، هواده‌های رمپ کف و دیواره جانبی عملکرد بهتری داشتند، زیرا تشکیل ناحیه کاویتی در هر دو ناحیه پایینی و جانبی سبب افزایش طول ناحیه کاویتی، بهبود یکنواختی توزیع هوا در شوت و در نهایت ارتقای راندمان هوادهی می‌شود. بر اساس

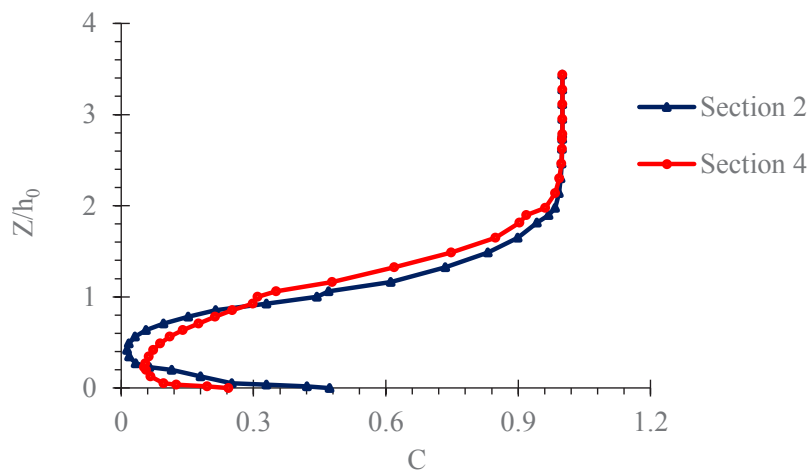
بین هواده‌ها (La) و درصد غلظت متوسط هوا (C)، در منطقه‌ای که هواده دوم قرار دارد را نشان می‌دهند. فاصله هواده‌ها بر اساس غلظت متوسط هوا در طول سرریز شوت به دست می‌آید. برای تعیین فاصله بهینه هواده‌ها و افزایش راندمان هوادهی، غلظت متوسط هوا بین ۸ تا ۱۲ درصد در نظر گرفته شد. در شکل (۱۴)، طول ناحیه هواده با Li و فاصله بین دو هواده با La نشان داده شده است که برابر با ۱/۵ متر است و دبی آب ۰/۲۵۵ متر مکعب بر ثانیه فرض شده است. مشاهده می‌شود که طول LI برابر با ۱/۲ متر و طول $L2$ برابر با ۱/۱ متر است. دلیل تغییر جزئی در طول $L2$ این است که بیشتر هوادهی اولیه در رمپ اول اتفاق می‌افتد و بنابراین راندمان هوادهی در رمپ دوم کمی کاهش می‌یابد. در این هواده، راندمان هوادهی یا ضریب غلظت هوا ($\beta = Q_a/Q_w$) برای رمپ اول، ۲/۸٪ و برای رمپ دوم ۲/۵٪ است.

در شکل (۱۵)، پروفیل‌های غلظت هوا با توجه به عمق نسبی جریان نشان داده شده است. بخش‌های مورد بررسی مطابق شکل (۱۳) با ۱S تا ۴S مشخص شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در بخش ۱، غلظت هوا از ۰.۶ آغاز شده و در عمق نسبی ۰/۵ (منطقه آب زلال) به صفر می‌رسد. با افزایش عمق، غلظت هوا مجدداً افزایش یافته و در سطح جریان به حداکثر مقدار خود (۱) می‌رسد. این روند تا حدودی در بخش ۳ نیز مشاهده می‌شود، در حالی که در بخش‌های ۲ و ۴، غلظت هوا با فاصله گرفتن از هواده‌ها کاهش می‌یابد. شکل (۱۶) توزیع غلظت هوا در برابر زمان را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، غلظت هوا در هواده دوم بیشتر از هواده اول است که نشان می‌دهد هواده اول هوای کافی وارد جریان می‌کند و هوادهی



الف) پروفیل غلظت هوا در بخش ۱ و ۳

a) The profile of air concentration at sections 1 and 3

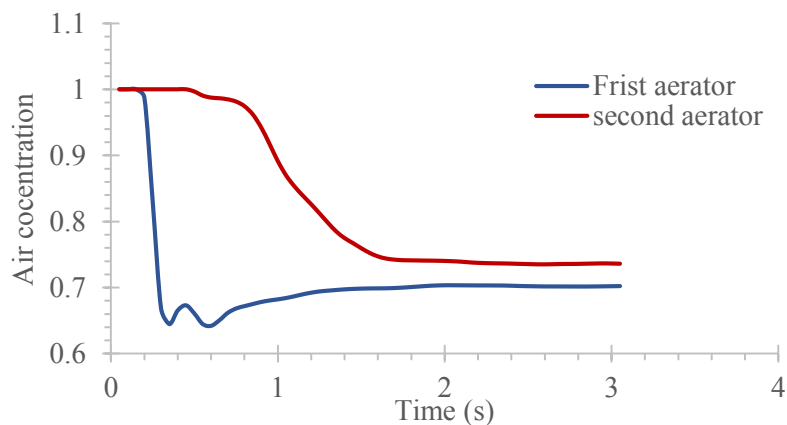


ب) پروفیل غلظت هوا در بخش‌های ۲ و ۴

b) The profile of air concentration at sections 2 and 4

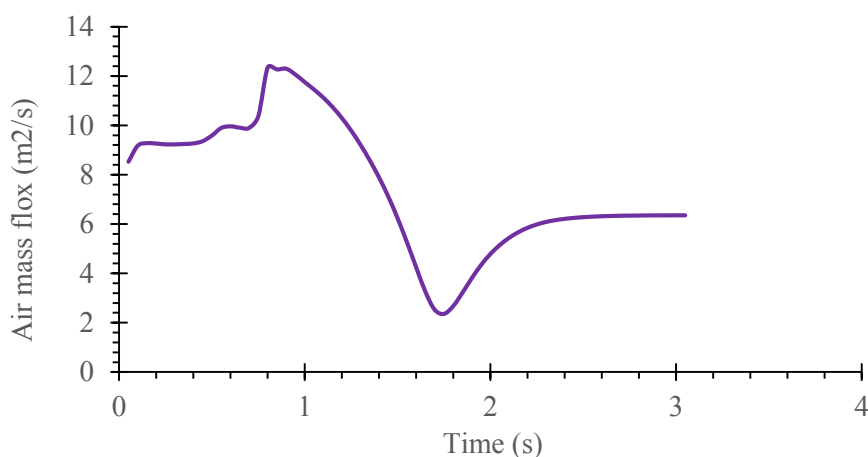
شکل ۱۵. پروفیل توزیع غلظت هوا.

Fig. 15. Air concentration distribution profile.



شکل ۱۶. توزیع غلظت هوا در مقابل زمان.

Fig. 16. Air concentration distribution versus time.



شکل ۱۷. تغییرات شار جرمی هوا نسبت به زمان.

Fig. 17. Air mass flux changes versus time.

پیکربندی‌های بررسی‌شده (شامل رمپ ساده، پله، و ترکیب رمپ و پله)، به عنوان حالت بهینه شناسایی گردید. زیرا عملکرد مکانیکی این هواده در ایجاد ناحیه کاویتی پایدار در کف و دیواره جانبی سرریز شوت است. این پدیده منجر به تشدید آشفته‌گی جریان و تسهیل اختلاط بهینه آب و هوا می‌گردد. نتایج نشان داد که به دلیل بهره‌گیری از این مکانیسم، در آرایش رمپ کف و دیواره جانبی، فرآیند هوادهی با بازدهی بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها انجام شده و توزیع غلظت هوا در جریان آب به وضعیت مطلوب‌تری می‌رسد.

یافته‌های عددی، فاصله بین هواده‌ها برای جلوگیری از بروز کاویتاسیون در پایین‌دست سرریز و حفظ غلظت هوای موردنیاز در طول شوت تعیین شد. نتایج نشان داد که حداقل غلظت متوسط هوای لازم برای پیشگیری از کاویتاسیون بین ۸ تا ۱۲ درصد متغیر است. از این‌رو، در طراحی سرریزهای بلند که در آن یک هواده به‌تنهایی قادر به تأمین هوادهی کافی نیست، استفاده از چندین هواده ضروری است. همچنین بر اساس نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی، هواده‌های رمپ کف و دیواره جانبی در مقایسه با سایر

- entrainment at spillway aerators, Canadian Journal of Civil Engineering, 36(5) (2009) 826-836.
- [13] W. Wei, J. Deng, W. Xu, Numerical investigation of air demand by the free surface tunnel flows, Journal of Hydraulic Research, 59(1) (2021) 158-165.
- [14] J. Yang, P. Teng, H. Zhang, Experiments and CFD modeling of high-velocity two-phase flows in a large chute aerator facility, Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 13(1) (2019) 48-66.
- [15] H. Wang, X. Liu, R. Bai, S. Liu, Modified bottom Air entrainment estimate by chute offset aerator, Journal of Hydraulic Engineering, 146(11) (2020) 06020016.
- [16] F. Ye, W. Xu, W. Wei, Experimental study of the air concentration diffusion in aerated chute flows downstream of lateral and bottom aerators, AIP Advances, 12(2)(2022).
- [17] F. Salmasi, J. Abraham, Hydraulic characteristics of flow over stepped and chute spillways (case study: Zirdan Dam), Water Supply, 23(2) (2023) 851-866.
- [18] P. Nikrou, S. Pirboudaghi, Numerical Analysis of Cavitation Dynamics on Free Ogee Spillways Using the Volume of Fluid (VOF) Method, arXiv preprint arXiv:2412.00695, (2024).
- [19] B.R. Bai RuiDi, L.S. Liu ShanJun, T.Z. Tian Zhong, W.W. Wang Wei, Z.F. Zhang FaXing, Experimental investigation of air-water flow properties of offset aerators, (2018).
- [20] L. Jiang, M. Diao, H. Sun, Y. Ren, Numerical modeling of flow over a rectangular broad-crested weir with a sloped upstream face, Water, 10(11) (2018) 1663.
- [21] M. Pfister, H. Chanson, Two-phase air-water flows: Scale effects in physical modeling, Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 26(2) (2014) 291-298.
- [22] F. Safiloo, F. Salmasi, H. Arvanaghi, A. Abbaspour, J. Abraham, Investigating flow characteristics in different types of chute spillway aerators, ISH Journal of Hydraulic Engineering, 31 (4), (2025) 686-706.
- [23] F. Safiloo, F. Salmasi, H. Arvanaghi, A Abbaspour, J Abraham, CFD Modeling of Air–Water Flow
- [1] H. Chanson, Flow downstream of an aerator-aerator spacing, Journal of Hydraulic Research, 27(4) (1989) 519-536.
- [2] M. Pfister, J. Lucas, W.H. Hager, Chute aerators: preaerated approach flow, Journal of Hydraulic Engineering, 137(11) (2011) 1452-1461.
- [3] M. Akbari, A. Afshar, S. Mousavi, Multi-objective reservoir operation under emergency condition: A bbaspour reservoir case study with non-functional spillways, Journal of Flood Risk Management, 7(4) (2014) 374-384.
- [4] K. Kramer, W.H. Hager, H.-E. Minor, New model investigations on two-phase chute flow, Hydraulics of dams and river structures, (2004) 33-41.
- [5] M. Pfister, W.H. Hager, Closure to “Chute Aerators. I: Air Transport Characteristics” by Michael Pfister and Willi H. Hager, Journal of Hydraulic Engineering, 138(7) (2012) 668-669.
- [6] P. Rutschmann, W.H. Hager, Air entrainment by spillway aerators, Journal of Hydraulic Engineering, 116(6) (1990) 765-782.
- [7] R. Rasmussen, Some experiments on cavitation erosion in water mixed with air, in: Proc., Int. Symp. on Cavitation in Hydrodynamics, National Physical Laboratory London, 1956, pp. 1-25.
- [8] H. Chanson, Study of air demand on spillway aerator, Journal of Fluids Engineering, 112(3) (1990) 343-350.
- [9] M.C. Aydin, Aeration efficiency of bottom-inlet aerators for spillways, ISH Journal of Hydraulic Engineering, 24(3) (2018) 330-336.
- [10] B.P. Tullis, J. Larchar, Determining air demand for small-to medium-sized embankment dam low-level outlet works, Journal of irrigation and drainage engineering, 137(12) (2011) 793-800.
- [11] J. Lian, C. Qi, F. Liu, W. Gou, S. Pan, Q. Ouyang, Air entrainment and air demand in the spillway tunnel at the Jinping-I Dam, Applied Sciences, 7(9) (2017) 930.
- [12] M.C. Aydin, M. Ozturk, Verification and validation of a computational fluid dynamics (CFD) model for air

A. Abbaspour, J. Abraham, Numerical and Experimental Study of Trajectory for Free-Falling Jets, Iranian journal of science and technology, transactions of civil engineering, 9(5), (2023) 62-70

Characteristics in Chute Spillway Aerators, Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 026-02125 (2026) 190-205.

[24] A. Taheri Aghdam, A. Hosseinzadeh Dalir, F. Salmasi,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

F. Safiloo, F. Salmasi, H. Arvanagi, A. Abbaspour, Numerical Investigation of Flow Characteristics in Different Types of Chute Spillway Aerators, Amirkabir J. Civil Eng., 58(3) (2026) 383-412.

DOI: [10.22060/ceej.2026.25030.8376](https://doi.org/10.22060/ceej.2026.25030.8376)

