Water Resources Engineering Journal

Spring 2021. Vol 14. Issue 48

Research Paper

Numerical Modeling of Flow and Aeration System of the AZAD Dam's Spillway Using ANSYS FLUENT Model

Mahya Mehdiabadi[1] , Ali Arman[1*]
1. Campus of Agriculture and Natural Resource.,Razi University , Kermsanshah, Iran

Received: 2019.5.5
Revised: 2020.1.22
Accepted: 2020.2.25

Use your device to scan and read the article online

DOI:10.30495/wej.2021.4586

Keywords:
Ogee weir, Azad dam, Cavitation, Aeration system, ANSYS FLUENT

Abstract

Introduction:
Cavitation is one of the most important problems that may occur due to high flow velocity in dam spillways. In order to predict of dam spillway structure during operation, Azad dam spillway hydraulic model has been modeled in Tehran Water Research Institute.

Materials and Methods: In this study, using computational fluid dynamics in the form of a finite volume method used in ANSYS FLUENT software, flow modeling in these channels, and a fluid volume model (VOF) in a three-dimensional state, including two-phase flow of water and air, used for Considering current turbulence, k-ε model has been used. In order to confirm the results of the model, a comparison was made with the results of a hydraulic model implemented without the aero-damping system of Azad spillway.

Findings: Then, in order to confirm the location and number of aeration systems, two scenarios (two and three aeration systems) including step ramp (RAMP) on the floor and the wall of the duct with a suitable slope and the installation of the aeration slot in the wall have been used, which sends air near the floor And the walls will be.

Conclusion: Then, by checking flow parameters such as speed, pressure and cavitation index, overflow with two aeration systems was confirmed as the best option.

Citation: Mehdiabadi M, Arma A. Numerical Modeling of Flow and Aeration System of the AZAD Dam's Spillway Using ANSYS FLUENT Model. Water Resources Engineering Journal. 2021; 14 (48): 16- 28.

***Corresponding author:** Ali Arman
Address: Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran
Tell: 08338323727
Email: a.arman@razi.ac.ir

Extended Abstract

Introduction

Spillways and chutes are among the important hydraulic structures that play an essential role in the stability of dams. The most important factor that may endanger the stability of spillways is the cavitation phenomenon. Due to the high head, the flow on the spillways and chutes is very fast. The protrusions, curves, and imperfections of the concrete surfaces that occur during or after the construction of the dam cause the flow lines to deviate and the pressure to decrease in some places, and cavitation will happen. Cavitation is a process that is usually accompanied by deterioration of surfaces or is characterized by a loud noise. Most of the researches on the hydraulic performance of spillways using 3D software have been mainly in laboratory conditions. In this research, the flow pattern and cavitation index in the physical model are investigated and calculated using numerical software.

Materials and methods

Ansys Fluent software is one of the most popular industrial software in the field of computational fluid dynamics that has many capabilities in computational fluid dynamics analysis. This software has the ability to simulate two-dimensional and three-dimensional flows. The spillway used in the numerical solution of this research is based on the spillway of the Azad reservoir dam, which is modeled with a scale of 1: 33.33 in the laboratory of the Water Research Center of the Ministry of Energy. Initial conditions for flow simulation include average flow velocity in the channel, channel roughness height, and hydraulic diameter. A virtual wall was applied to the model to prevent overflow in the channel, simulation error and rapid advance of the model.

Findings

This study showed that the Ansys Fluent numerical model has a high capability in three-dimensional simulation of the flow through the dam spillway. Also, by placing different aerated pipes on the spillway, it was found that placing two aerated pipes has a very positive effect on increasing the pressure and decreasing the cavitation index.

Discussion

The results showed that the Ansys Fluent numerical model has a high ability to simulate the flow in the mentioned spillway. Analysis of the results in the model showed that the value of the cavitation index up to a distance of 160 meters from the spillway crest is within the allowable range and from a distance of 160 meters to the end of the spillway which is about 130 meters, the cavitation phenomenon on Azad reservoir dam spillway occurs for the studied discharges.

Conclusion

By examining the static pressure and calculating the cavitation index in each scenario, the spillway with two aeration systems became a suitable option to eliminate the cavitation phenomenon. By comparing the values of cavitation index, it was found that the number of aeration systems has little effect on the results and the same two aeration systems are sufficient for this spillway at specified intervals.

Ethical Considerations Compliance with ethical guidelines

The authors of the article state that they have followed the ethical principles of conducting and publishing research.

Funding

This article is sponsored by Razi University of Kermanshah in the form of a master's thesis of the first author, and thus the authors of the article express their gratitude to Razi University.

Authors' contributions

In this research, resource collection, software implementation, conclusion and discussion have been done by the first author and the second author has participated in all stages of writing the article, discussion and conclusion and

responding to the reviewers.

Conflicts of interest

There is no conflicts of interest between the authors.

مقاله پژوهشی

مدلسازی عددی جریان و سیستم هوادهی بر روی سرریز سد آزاد با استفاده از مدل ANSYS FLUENT

محیا مهدی‌آبادی [۱]، علی آرمان [۲*]
۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی، کرمانشاه
۲. استادیار سازه های آبی گروه مهندسی آب،دانشگاه رازی، کرمانشاه

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۲/۱۵
تاریخ داوری: ۱۳۹۸/۱۱/۲
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/٦

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید

DOI:10.30495/wej.2021.4586

واژه‌های کلیدی:
سرریز اوجی، سد آزاد، کاویتاسیون، سیستم هواده، مدل ANSYS FLUENT

چکیده

مقدمه: کاویتاسیون مهمترین مشکلی است که به سبب سرعت‌های زیاد جریان در مجراهای تخلیه‌کننده سدها ممکن است رخ دهد. به منظور بررسی و حصول اطمینان از عملکرد سرریز یک سد در دوران بهره‌برداری، مدل هیدرولیکی سازه سد آزاد در موسسه تحقیقات آب تهران مدل شده‌است.

مواد و روش‌ها: در این تحقیق از طریق دینامیک سیالات محاسباتی در قالب روش حجم محدود بکار رفته در نرم‌افزار ANSYS FLUENT، مدلسازی جریان در این مجراها و از مدل حجم سیال (VOF) در حالت سه بعدی شامل جریان دوفازی آب و هوا استفاده شده، که برای در نظر گرفتن آشفتگی‌های جریان نیز مدل $k-\varepsilon$ بکارگرفته شده‌است.

نتایج و بحث: برای تایید نتایج مدل، مقایسه‌ای با نتایج حاصل از مدل هیدرولیکی اجرا شده بدون سیستم هواده از سرریز سد آزاد انجام شده‌است. سپس به منظور تأیید مکان و تعداد سیستم هواده، از دو سناریو (دو و سه سیستم هواده) شامل پله (RAMP) در کف و دیواره مجرا با شیب مناسب و نیز تعبیه شیار هواده در دیواره استفاده شده‌است، که باعث فرستادن هوا به نزدیکی کف و دیواره‌ها خواهد شد.

نتیجه‌گیری: با بررسی پارامترهای جریان از قبیل سرعت، فشار و شاخص کاویتاسیون، سرریز با دو سیستم هواده به عنوان گزینه برتر مورد تایید قرار گرفت.

مقدمه

امروزه با توجه به پیشرفت تکنولوژی سدسازی، امکان ایجاد سدهای بلند، بر اساس نیاز، فراهم گردیده است. هر سد از تعداد زیادی سازه جانبی تشکیل شده‌است که یکی از مهمترین آن‌ها سرریزها می‌باشند. سرریزها و تنداب‌ها از جمله سازه‌های هیدرولیکی مهمی هستند که در پایداری سدها نقش اساسی را ایفا می‌نمایند. مهمترین عاملی که ممکن است پایداری سرریزها را به خطر بیاندازد پدیده خلاءزایی می‌باشد. به دلیل ارتفاع زیاد، جریان روی سرریزها و تنداب‌ها دارای سرعت زیادی می شود. برجستگی‌ها و قوس‌ها و ناصافی‌های سطوح بتنی که به هنگام ساخت سد و یا پس از آن ایجاد می‌گردد، باعث ایجاد انحراف خطوط جریان و کاهش فشار در بعضی نقاط می‌گردد که چنانچه این کاهش فشار در ازاء افزایش سرعت باشد شرایط آستانه یا آغاز خلاءزایی (خوردگی) پیش خواهد آمد. کاویتاسیون فرآیندی است که معمولاً با خرابشدگی سطوح همراه بوده و یا با ایجاد یک صدای شدید مشخص می‌شود. هر دو پدیده فوق ممکن است در اثر کاویتاسیون اتفاق بیافتد ولی کاویتاسیون هیچکدام از آن‌ها نیست.

* **نویسنده مسئول:** علی آرمان
نشانی: استادیار سازه های آبی گروه مهندسی آب،دانشگاه رازی،کرمانشاه
تلفن:
پست الکترونیکی: a.arman@razi.ac.ir

به طور کلی کاویتاسیون به صورت رخداد شکل‌گیری حباب یا حفره در یک مایع تعریف می‌شود. مشاهده محققان نشان می‌دهد که قبل از دیده شدن کاویتاسیون، معمولاً در یک محدوده کوچک از جریان، انبوهی از حباب‌های ریز به چشم می‌خورند که از آنان به عنوان هسته کاویتاسیون یاد می‌شود.

این حباب‌ها در ایجاد کاویتاسیون نقش مهمی را ایفا می‌کنند و تئوری کاویتاسیون بر اساس وجود این حباب‌ها شکل می‌گیرد. تجربه سه دهه اخیر نشان می‌دهد که مؤثرترین و اقتصادی‌ترین روش برای جلوگیری از کاویتاسیون، هوادهی است. وجود هوا در مجاورت مرزهای صلب، باعث کاهش تخریب می‌گردد (۲). در صورتی که هوادهی طبیعی برای تأمین مقدار لازم هوا در محل موردنظر کافی نباشد، می‌توان از سازه ساده‌ای بنام هواده استفاده کرد و اما پیش از آن باید محل‌هایی که احتمال خلاءزایی در آن‌ها وجود دارد شناسایی شوند. تعیین محل دقیق خلاءزایی و کاویتاسیون در نواحی مختلف سرریز، یکی از مواردی است که توجه بسیاری از محققان را به خود جلب نموده‌است. اوزتورک و آیدین در پژوهشی با شبیه‌سازی سه بعدی سرریزها، به مطالعه هوادهی برای جلوگیری از پدیده کاویتاسیون پرداختند.

این شبیه‌سازی به روش CFD و به کمک نرم‌افزار FLUENT انجام گرفت و نتایج آن با مدل هیدرولیکی همان سرریز مقایسه شد. نتایج نشان‌دهنده مطابقت مناسب با مدل هیدرولیکی بود (۵). صادق دهداربهبهانی و همکاران (۱۳۹۰)، به بررسی پدیده کاویتاسیون در طول پرتابه جامی شکل سرریز بالارود با استفاده از مدل Flow-3d پرداختند. جهت انجام آزمایشات، پارامترهای هیدرولیکی از قبیل سرعت، عمق آب و فشار در دبی‌های مختلف اندازه‌گیری شد و پدیده کاویتاسیون بر روی پرتابه جامی شکل سرریز مورد بررسی قرار گرفت. آنها در تحقیق خود از ۴ دبی (۱۶۰/۷، ۶۶، ۱۹۳ و ۳۷۸/۶ لیتربرثانیه) برای شبیه‌سازی استفاده کردند. بر مبنای نتایج اندازه‌گیری‌های صورت گرفته به این نتیجه رسیدند که احتمال رخ دادن پدیده کاویتاسیون در قسمت پرتابه بالارود وجود ندارد(۱). بردبار و همکاران، برای بررسی رژیم جریان و پدیده کاویتاسیون در سرریز نیلوفری پله‌ای از مدل فیزیکی استفاده کردند. آن‌ها برای مطالعه کاویتاسیون و رژیم جریان بر روی سرریز، پله‌ها با تعداد و ابعاد مختلفی را به کار گرفتند و از پنج مدل سرریز (یک مدل سرریز صاف و چهار مدل سرریز پله‌دار) استفاده کردند. با توجه به جریان ورودی به سرریز، پارامترهای فشار و سرعت جریان را اندازه‌گیری کرده و در نهایت پتانسیل کاویتاسیون را بررسی کردند (۶). آرامی فدافن و همکاران (۱۳۹۰)، امکان وقوع پدیده کاویتاسیون روی سرریز سد شهید عباسپور را در حالت بدون هواده و پس از نصب هواده اول با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها جهت صحت‌سنجی نتایج نرم‌افزار، از داده‌های سرریز سد WUSKWATIM استفاده کردند و نتیجه گرفتند که استفاده از این نرم‌افزار جهت تخمین غلظت هوای متوسط وارد شده به جریان مناسب می‌باشد (۲). ورجاوند و همکاران (۱۳۸۸) هیدرولیک جریان در مدل فیزیکی سازه کنترل سیلاب سد ونیار واقع در استان آذربایجان شرقی که شامل سرریز جانبی، کانال جمع آوری، تبدیل، سرریز اوجی و تندآب می باشد، به صورت سه‌بعدی و با استفاده از مدل عددی FLUENT شبیه‌سازی و نتایج شامل عمق جریان و فشار هیدرواستاتیکی در ۱۱۰ نقطه بین مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. از مدل آشفتگی k-ε و مدل شبیه‌سازی جریان چندفازی حجم سیال (VOF[1]) برای تحلیل جریان استفاده شد، سپس به تحلیل پارامترهای آشفتگی جریان در کانال جمع‌آوری و توسعه لایه مرزی برروی تندآب پرداخته شد. نتایج حاصل بیانگر تطابق مناسب نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی بخصوص مدل k-ε استاندارد برای فشار هیدرواستاتیکی و مدل RNG (k-ε)[2]برای پروفیل سطح آب می‌باشد(۳). لی و همکاران، شبیه‌سازی جریان سه‌بعدی را روی یک سرریز با استفاده از نرم‌افزارFLUENT انجام دادند. به این منظور از روش حجم مایع (VOF) برای حل سطح آزاد آب و مدل آشفتگی k -ε استفاده کردند. همچنین از الگوریتم حل PISO برای حل میدان سرعت و فشار استفاده کردند. نتایج نشان داد که تطابق خوبی بین شبیه‌سازی عددی با داده‌های آزمایشگاهی (شامل: سطح آزاد آب، مقدار و توزیع سرعت و فشار وارد بر کف سرریز) وجود دارد (۷). یردوگل کومکا مشخصات هیدرولیکی سد کاوسک و نیروگاه هیدرولیکی (HEPP) که در حال ساخت برای تولید انرژی در ترکیه است را، به صورت آزمایشی با مطالعات مدل فیزیکی با مقیاس ۱/۵۰ مورد بررسی قرارداد. مقایسه بین نتایج حاصل از مدل عددی FLOW 3D با داده‌های حاصل از مدل فیزیکی نشان داد که مدل عددی قابلیت بالایی در شبیه‌سازی دبی، الگوهای سرعت و فشار را داراست (۸). ایزدی‌نیا و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون در سرریز اوجی سد انحرافی گرمسار، با استفاده از نرم افزار FLUENT و به صورت دو بعدی پرداختند. شبیه‌سازی در نرم افزار FLUENT با استفاده از مدل آشفتگی k-ε و مدل چندفازی VOF انجام گرفت. نتایج نشان داد در سرریز اوجی با افزایش دبی، فشار مثبت افزایش و فشار منفی کاهش می‌یابد. همچنین مشخص شد با افزایش دبی محدوده فشار منفی افزایش و درنتیجه احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون بیشتر می‌گردد(۴).

بیشتر تحقیقات صورت گرفته در زمینه عملکرد هیدرولیکی سرریزها با استفاده از نرم‌افزارهای سه‌بعدی عمدتا در شرایط آزمایشگاهی بوده است. در این تحقیق به بررسی و محاسبه الگوی جریان و شاخص کاویتاسیون در مدل فیزیکی ۳۳/۳۳ :۱ سد آزاد با استفاده از نرم افزار ANSYS FLUENT پرداخته می‌شود.

مواد و روش‌ها

معرفی مدل عددی ANSYS FLUENT

[1]. Volume of fraction

[2]. Renormalization- group $k-\varepsilon$ model (RNG)

نرم افزار ANSYS FLUENT یکی از نرم‌افزارهای صنعتی مشهور در زمینهٔ دینامیک سیالات محاسباتی است که قابلیت‌های فراوانی در تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی دارد. این نرم‌افزار قابلیت مدلسازی جریان‌های دوبعدی و سه‌بعدی را داراست. برای استفاده از این نرم‌افزار، ابتدا با یک نرم‌افزار کمکی مانند نرم‌افزار AUTOCAD، هندسه مشخص می‌شود و مش‌بندی نیز در ANSYS WORKBENCH صورت می‌گیرد. از فایل‌های خروجی نمودارهای مدل برای مشاهده و بررسی الگوی جریان شبیه‌سازی شده استفاده می‌گردد.

معادلات حاکم

در این تحقیق از معادلات متوسط‌گیری شده زمانی ناویراستوکس[1] معروف به معادلات رینولدز استفاده شده است. برای حل مستقیم معادلات ناویراستوکس بدون متوسط‌گیری زمانی، به رایانه‌هایی با سرعتی بسیار زیادتر از رایانه‌های امروزی نیاز می‌باشد. متوسط‌گیری زمانی باعث اضافه شدن ترم‌های جدید به معادلات ناویراستوکس که بیانگر آشفتگی جریان هستند، شده است، لذا برای به دست آوردن ترم‌های آشفتگی در معادلات ناویراستوکس مدل‌های آشفتگی توسعه پیدا نموده‌اند. فرم کلی معادلات رینولدز به شرح ذیل می‌باشد:

معادله بقای جرم:

$$\frac{\partial \bar{U}_j}{\partial X_j} = 0 \qquad (۱)$$

معادلات ممنتوم در سه جهت:

$$\frac{\partial \bar{U}_j}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial X_j}(\bar{U}_i \bar{U}_j) = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \bar{P}}{\partial X_j} + \frac{\partial}{\partial X_j}\left(\vartheta \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial X_j} - \bar{U}_i \bar{U}_j\right) + f_{B_i} \qquad (۲)$$

در این معادلات $\bar{U}_i$ سرعت متوسط جریان، $\bar{P}$ فشار متوسط، ϑ و ρ به ترتیب ویسکوزیته سینماتیکی و چگالی سیال است، $\bar{U}_i \bar{U}_j$ تنش‌های رینولدز است که با استفاده از مدل‌های آشفتگی حل می‌شوند و تابعی از مکان، زمان، سرعت‌های متوسط جریان، انرژی جنبشی آشفتگی[2] (K) و میزان تلفات انرژی جنبشی اغتشاش[3] (ε) است. عبارت آخر در سمت راست معادله (۲)، نیروهای حجمی شامل نیروهای وزن و ... است.

در معادلات ذکر شده در این بخش، اندیس‌های i و j که می‌توانند ۱، ۲ یا ۳ باشند، به ترتیب نشان دهندهٔ راستای x,y و z هستند.

برای محاسبه تنش‌های رینولدز در معادلات مومنتوم از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$-\bar{U}_i \bar{U}_j = \vartheta_t \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial X_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial X_i}\right) - \frac{2}{3} K \delta_{ij} \qquad (۳)$$

که در آن δ_{ij} به صورت $\delta_{ij} = 0 \;\; if \;\; i \neq j$ و $\delta_{ij} = 1 \;\; if \;\; i = j$ تعریف می‌گردد.

برای محاسبه لزجت آشفتگی (ϑ_t) در معادله (۳)، مدل‌های آشفتگی باید بهره گرفت. در این تحقیق مدل استاندارد K-ε مورد استفاده قرار گرفته‌است. مقدار ϑ_t از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\vartheta_t = C_\mu \frac{K^2}{\varepsilon} \qquad (۴)$$

که در آن C_μ یک ضریب تجربی است و معمولاً برابر ۰/۰۹ در نظر گرفته می‌شود. انرژی جنبشی آشفتگی (K) و میزان تلفات انرژی جنبشی اغتشاش(ε) نیز از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$\frac{\partial K}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial K}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j}\left(\frac{\vartheta_t}{\sigma_k}\frac{\partial K}{\partial X_j}\right) - \bar{U}_i \bar{U}_j \bar{D}_{ij} - \varepsilon \qquad (۵)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j}\left(\frac{\vartheta_t}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial X_j}\right) + C_{\varepsilon 1}\frac{\varepsilon}{K}\left(-\bar{U}_i \bar{U}_j \bar{D}_{ij}\right) - C_{\varepsilon 2}\frac{\varepsilon^2}{K} \qquad (۶)$$

که در آن $\bar{D}_{ij}$ ، از رابطه $\bar{D}_{ij} = (\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial X_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial X_i})/2$ بدست می‌آید. ضرایب تجربی $C_{\varepsilon 1}$، $C_{\varepsilon 2}$، σ_ε و σ_k نیز به صورت معمول به ترتیب برابر ۱/۹۲، ۱/۴۴، ۱/۳ و ۱ در نظر گرفته می‌شوند.

معرفی مدل فیزیکی

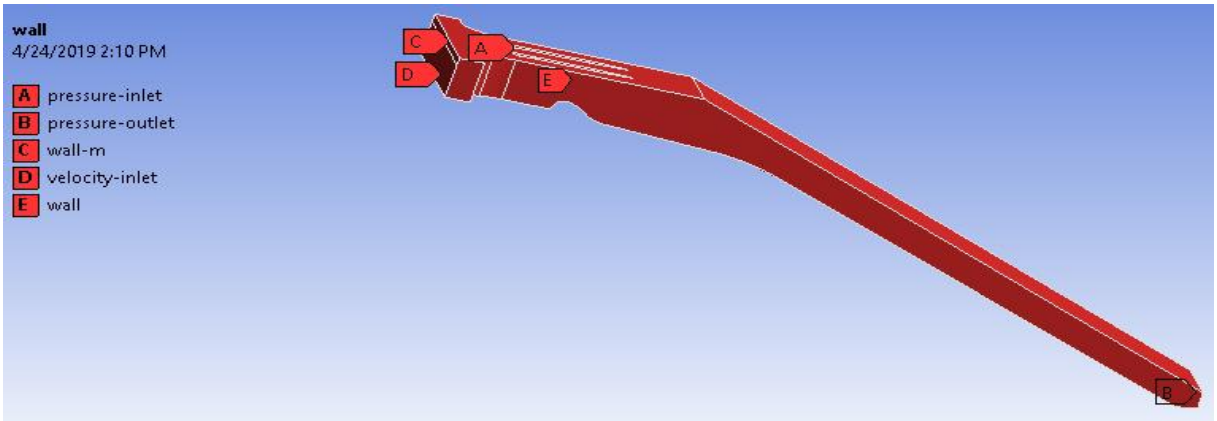
سرریز به کار رفته در حل عددی این تحقیق بر اساس سرریز سد مخزنی آزاد است که با مقیاس۱:۳۳/۳۳در آزمایشگاه مرکز تحقیقات آب وزارت نیرو مدل‌سازی شده‌است. پارامترهای متغیر در آزمایش های این تحقیق شامل دبی (Q)، عمق آب (y) و شعاع جام پرتابی (R) می‌باشد. سرریزدریچه‌دار سد مخزنی آزاد شامل یک آستانه به شکل اوجی آزاد به طول کل ۳۰ متر و تراز تاج ۱۴۶۵ متر از سطح دریا بوده که دو پایه به ضخامت هر کدام ۳ متر روی آن قرار دارد. رابطه سهمی سرریز اوجی به صورت $Y=0.05844\times X^{1.85}$ می‌باشد. به منظور استهلاک انرژی جریان عبوری از سرریز، انتهای تندآب پرتاب کننده جامی شکل با زاویه ۴۶ درجه و شعاع ۱۵ متر به طول افقی ۱۰/۵۸ متر نیز طراحی شده است. مشخصات سرریزاوجی در شکل ۱ آورده شده است.

1. Navier-Stokes equations
2. Turbulent Kinetic Energy
3. Dissipation rate of turbulent kinetic energy

شکل۱- شکل شماتیک مدل آزمایشگاهی از نمای بالا و نمای جانبی

شرایط اولیه و شرایط مرزی

شرایط اولیه برای شبیه‌سازی جریان، شامل سرعت متوسط جریان در کانال، ارتفاع زبری کانال و قطر هیدرولیکی است که بر اساس مشخصات مدل آزمایشگاهی و میزان دبی اعمال گردید. مرز ورودی به عنوان سرعت ورودی، مرز خروجی به عنوان فشار خروجی، مرز بالای کانال به عنوان فشار ورودی و دیواره‌ها به برنامه معرفی شدند و همچنین برای جلوگیری از سرریز شدن جریان در کانال، خطای شبیه‌سازی و پیشروی سریع مدل، یک دیواره مجازی در مدل اعمال شد. شرایط مرزی اعمال شده در ورودی مدل شامل سرعت ۰/۲۸۶ متر بر ثانیه و عمق آب برابر با ۰/۴۷۴ متر می‌باشد. ضمناً ارتفاع زبری با توجه به مصالح کف، برابر ۰/۰۰۰۱متر در نظر گرفته شد. شکل۲، شرایط مرزی به‌کار برده شده در مدل را نمایش می‌دهد:



شکل۲- نمای شماتیک شرایط مرزی

صحت‌سنجی مدل عددی

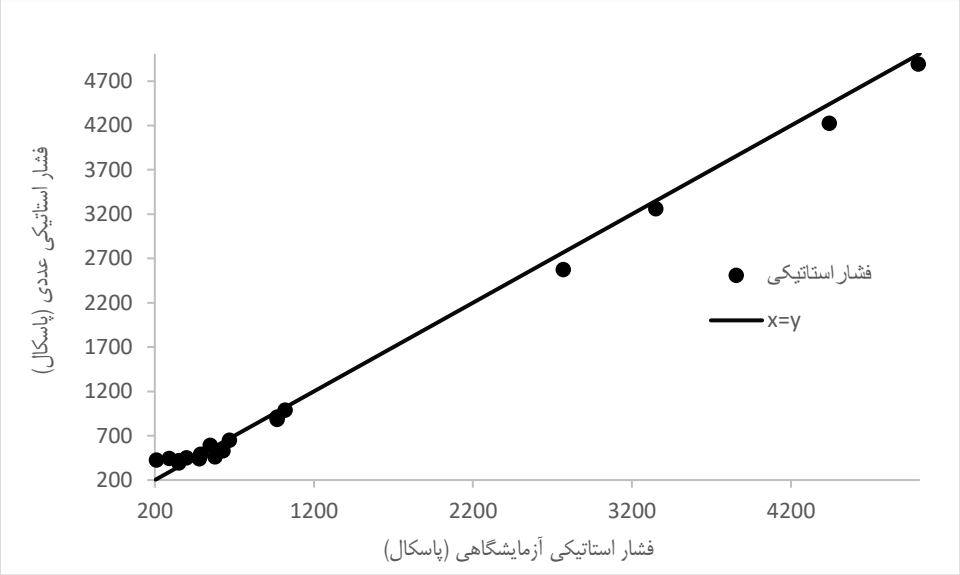
صحت‌سنجی مدل آشفتگی:

در سقوط سیال از روی سد همواره مقداری از سیال از فاز مایع به فاز گاز تغییر حالت می‌دهد. برای تحلیل تغییر فاز حاصل از سقوط سیال از بالای سرریز از مدل VOFو به صورت جریان کانال باز در نظر گرفته شده‌است. با توجه به اینکه در این جریان، آشفتگی بسیار زیاد بوده و همچنین جدایش جریان از لبه سرریز در تمام مدت تحلیل در حال رخ دادن می‌باشد، از مدل‌های آشفتگی $K\text{-}\varepsilon$ و $k\text{-}\omega$ ، در تحلیل جدایش جریان استفاده شده‌است.

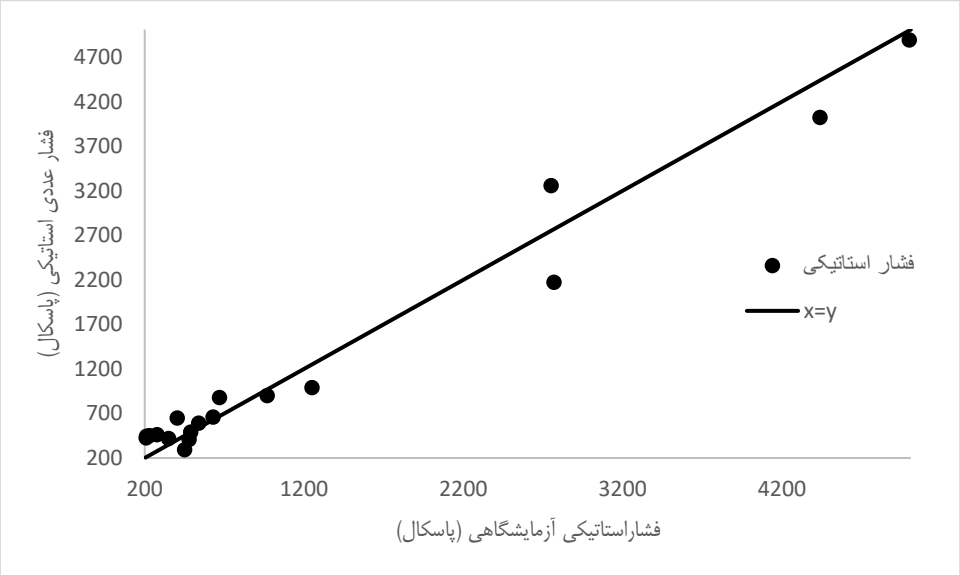
مدل‌های آشفتگی مورد استفاده در تحقیقات مشابه شامل مدل $k\text{-}\omega$ و $K\text{-}\varepsilon$ هستند. برای معرفی مدل آشفتگی برتر، به ازای یک شبکه مش‌بندی ثابت، سرریز مورد نظر با مدل‌های مذکور شبیه‌سازی شد که نتایج آن در جدول ۱ و نتایج حاصل از مقایسهٔ فشارهای استاتیک مدل عددی و مقادیر آزمایشگاهی در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده‌است.

جدول۱- مقایسهٔ مدل‌های آشفتگی

مدل	RMSE	R^2	مدت زمان شبیه سازی(ساعت)
k-ε	۰.۰۰۸	۰/۹۹۴	۶۴
k-ω	۰.۰۴	۰/۹۸۵	۱۲۸



شکل۳- مقایسهٔ نتایج حاصل از فشاراستاتیکی آزمایشگاهی و عددی با مدل آشفتگی k-ε



شکل٤- مقایسهٔ نتایج حاصل از فشار استاتیکی آزمایشگاهی و عددی با مدل آشفتگی k-ω

همانطور که مشاهده می‌شود، مدت زمان شبیه‌سازی و میزان خطای مدل آشفتگی k- ε کمتر است تا مدل آشفتگی k-ω و بنابراین از مدل آشفتگی k-ε به عنوان مدل برتر برای ادامهٔ شبیه‌سازی‌ها استفاده شد. میزان خطای محاسبه شده با پارامترهای آماری جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)[1] و ضریب تبیین (R^2)[2] سنجیده شد. برای بررسی صحت مدل، باید میزان پارامتر آماری RMSE به صفر و R^2 به یک نزدیک باشد. این پارامترها با رابطه ۷ و ۸ قابل محاسبه هستند:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n}[(y_0)_i - (y_i)]^2} \quad (۷)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_0 - y_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(\overline{y_0} - y_0)^2} \quad (۸)$$

1. Root Mean Square Error
2. Coefficient of Determination

صحت‌سنجی شبکه مش‌بندی:

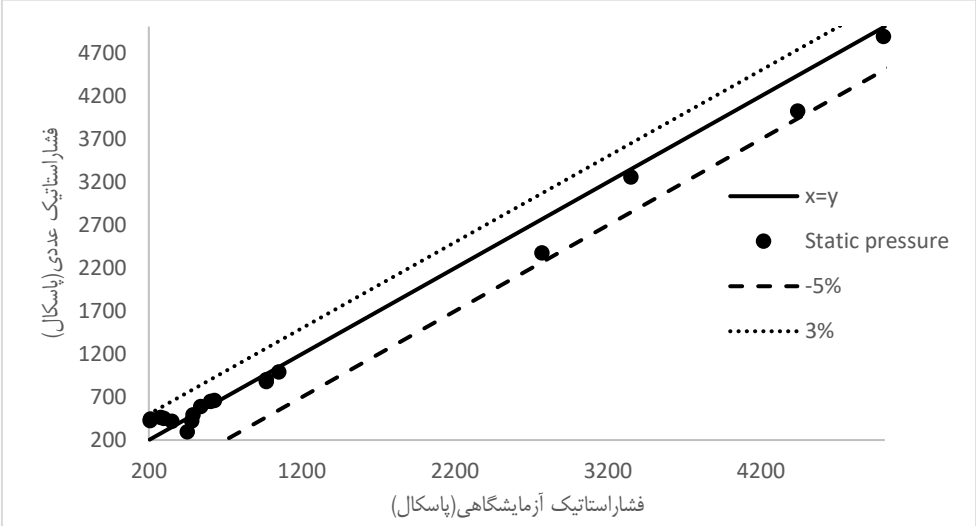
تشکیل شبکه

درستی و دقت نتایج شبیه‌سازی بستگی به کیفیت شبکهٔ تشکیل شده دارد. به‌منظور افزایش دقت، در نواحی نزدیک به جداره از شبکه‌بندی ریزتری استفاده شد. به منظور صحت‌سنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی در مدل، با دبی ۱۰۰۰۰ ساله سد که برابر ۱۵۴۵ مترمکعب برثانیه در واقعیت و برابر ۰/۲۴۱ مترمکعب برثانیه در مدل می‌باشد، عمق آب و فشارهای استاتیک در ۱۸ مقطع عرضی و در سه ردیف راست، مرکز و چپ سرریز (جمعا در ۵۴ نقطه مختلف) با سه طیف مش‌بندی درشت، ریز و متوسط و به ازای مدل آشفتگی k-ε ، با عمق آب و فشارهای استاتیک آزمایشگاهی که توسط پیزومترها و در نقاط مختلف مقایسه و متوسط درصد خطا برای هر مقطع محاسبه گردید. جدول ۲ مقایسهٔ شبکه‌های مش‌بندی مختلف را نشان می‌دهد.

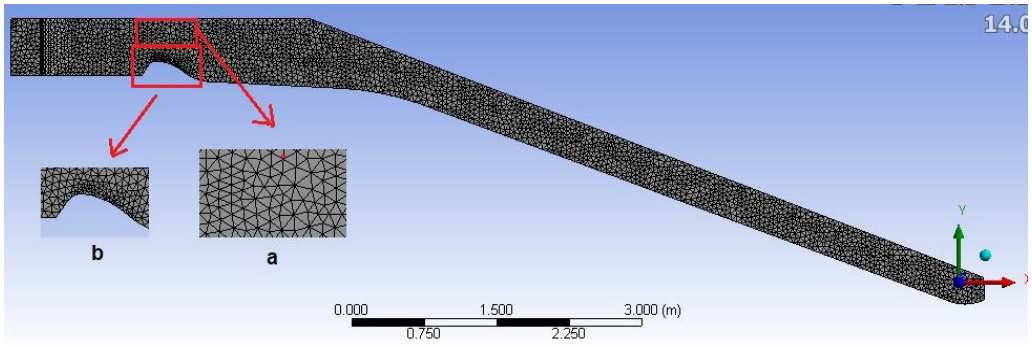
جدول۲- مقایسهٔ شبکه‌های مش‌بندی مختلف

تعداد المان‌ها	RMSE	R^2	مدت زمان شبیه‌سازی(ساعت)
۶۴۰۰۰۰	۰/۰۰۰۲۷۲	۰/۹۶۹	۶۵
۹۸۵۰۰۰	۰/۰۰۰۰۵۲۶	۰/۹۹۳	۱۵۵
۱۱۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۴۸۶	۰/۹۹۴	۲۱۵

با توجه به مطالب فوق و هچنین جدول ۲ ، مش یا سایز متوسط به عنوان مش بهینه انتخاب گردید، زیرا با مقایسهٔ شبکه‌های مش ریز و متوسط، مشخص شد که ریز شدن شبکه و افزایش مدت زمان شبیه‌سازی، تأثیر چندانی بر نتایج ندارد و نتایج مستقل از مدت زمان و اندازهٔ شبکه است. شکل۵، نمودار شبکهٔ مش بهینه در مدل آشفتگی برتر در سطح معناداری ۹۵ درصد و شکل۶، نمایی از شبکه تشکیل شده توسط نرم‌افزار را نشان می‌دهد.



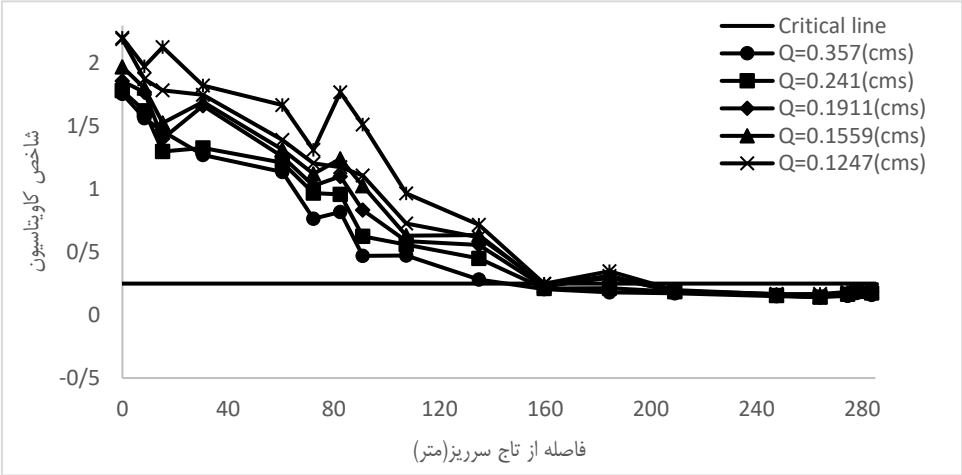
شکل۵- نمودار شبکهٔ مش بهینه در مدل آشفتگی برتر در سطح معناداری ۹۵ درصد



شکل ٦-شمایی از شبکه بکار رفته در نرم‌افزار a) مش در نواحی نزدیک به جداره سرریز b) مش در نواحی دور از سرری

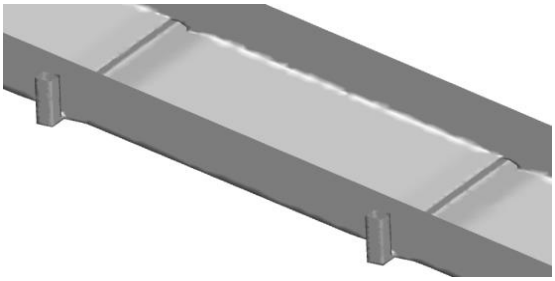
نتایج و بحث

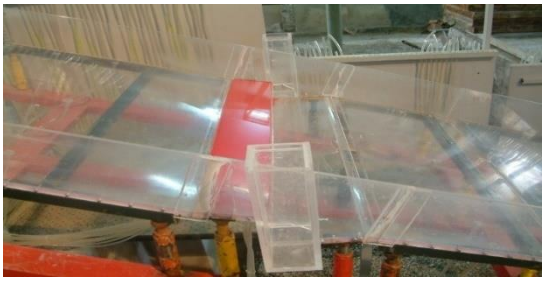
پس از صحت سنجی مدل با دبی ۱۰۰۰۰ساله، در مرحله بعد مدل عددی برای دبی‌های ۵۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰، ۱۲۲۶ و ۲۲۹۰ مترمکعب برثانیه (PMF) در واقعیت و برابر ۰/۰۷۷۹، ۰/۱۲۴۷، ۰/۱۵۵۹، ۰/۱۹۱۱ و ۰/۳۵۷ مترمکعب برثانیه در مدل است، اجرا شد و مقادیر فشارهای استاتیک و سرعت برداشت، و به دنبال آن شاخص کاویتاسیون در طول سرریز، محاسبه شد. چنانچه مقدار شاخص کاویتاسیون کمتر از ۰/۲۵ باشد (Falvey 1990) شود به معنی آن است که در آن نقطه کاویتاسیون رخ می‌دهد. شکل ۷ مقادیر شاخص کاویتاسیون به ازای دبی‌های مورد استفاده در مدل عددی را نشان می‌دهد.



شکل۷- مقادیر شاخص کاویتاسیون به ازای دبی‌های مورد استفاده در مدل عددی

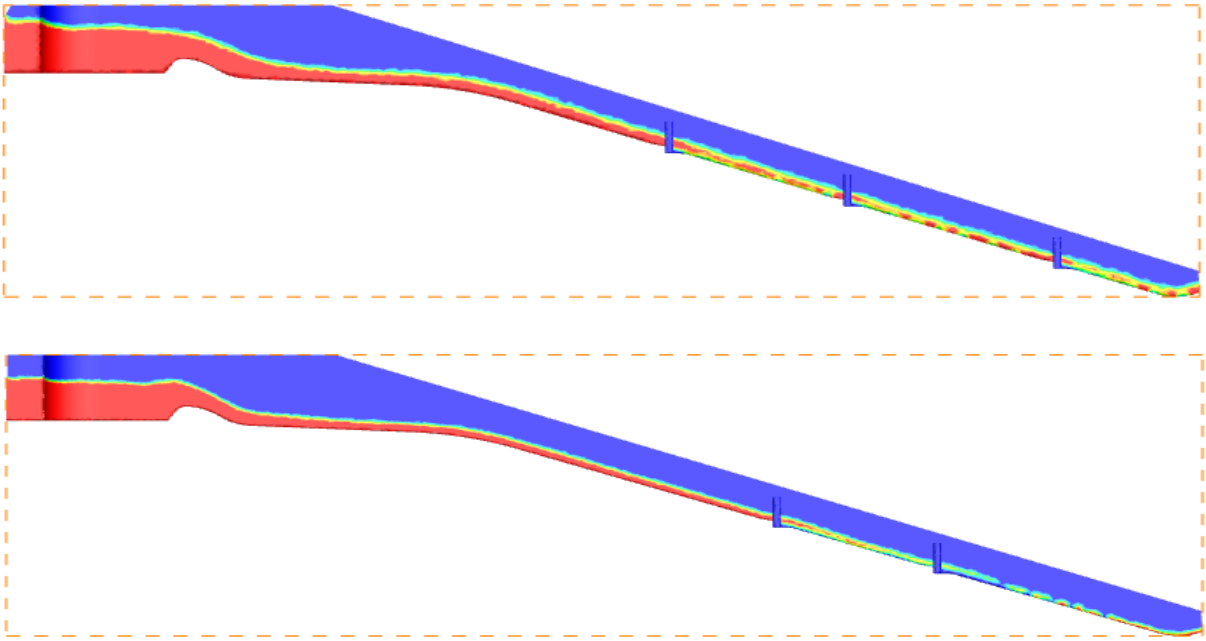
همانطور که از نمودار مشخص است، مقدار شاخص کاویتاسیون از فاصله ۱۶۰متری به بعد کمتر از ۰/۲۵ می‌باشد، در نتیجه پدیده کاویتاسیون بر روی سرریز سد مخزنی آزاد به ازای دبی‌های مورد مطالعه رخ می‌دهد. برای برطرف کردن کاویتاسیون بر روی سرریز سد آزاد، از سیستم هواده با ارتفاع رمپ ۰/۵ متر که تحت زاویه ۷ درجه و از لبه رمپ به کف افقی تونل هوارسان به ارتفاع ۶/۸۲ متر می‌باشد، استفاده شده است. شکل ۸ نمایی از سیستم هواده به کار برده شده در مدل آزمایشگاهی و عددی می‌باشد.





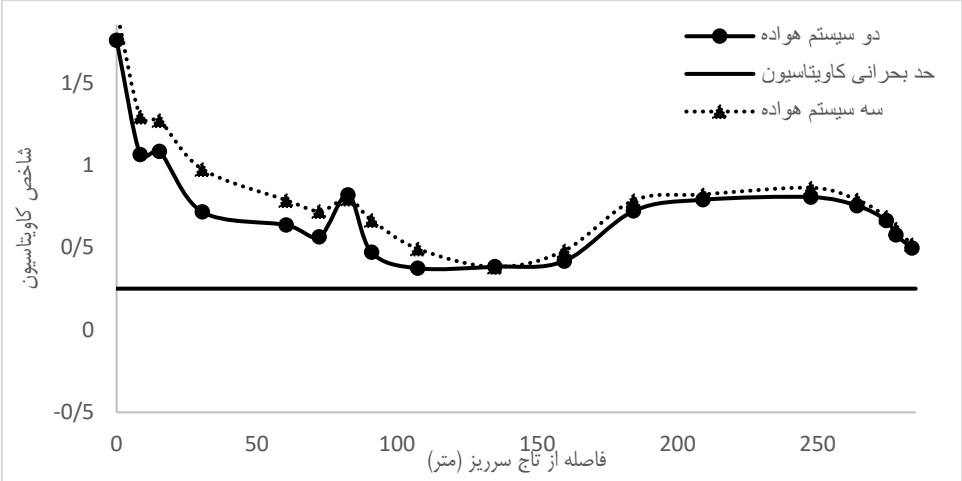
شکل۸- سیستم هواده به کار برده شده در مدل آزمایشگاهی و مدل عددی

برای جانمایی سیستم‌های هواده از دو سناریو استفاده شده‌است. در سناریو اول از سه سیستم هواده در فواصل ۱۳۵، ۱۸۵ و ۲۴۵ متر از آستانه سرریز و در سناریو دوم از دو سیستم هواده در فواصل ۱۶۵ و ۲۱۰ متری استفاده شد (مشخصات سیستم‌های هواده یکسان است). همانطور که ذکر شد، جهت تحلیل عددی جریان در این مطالعه، از نرم‌افزار ANSYS FLUENT استفاده شد. شکل ۹ نمایی از سرریز شبیه‌سازی شده و محل هواده‌ها در مدل عددی به ازای سه و دو سیستم هواده را نشان می‌دهد که نمایانگر شبیه‌سازی جریان بر روی سرریز در سناریوهای بیان شده می‌باشد، که نشانگر این است که پرش از روی رمپ هواده تشکیل و آب راکد یا برگشت آب از سطح زیرین پرش در تونل هوارسان در مدل رخ نخواهد داد. این موضوع بیانگر مناسب بودن ابعاد سیستم هواده انتخابی می‌باشد.



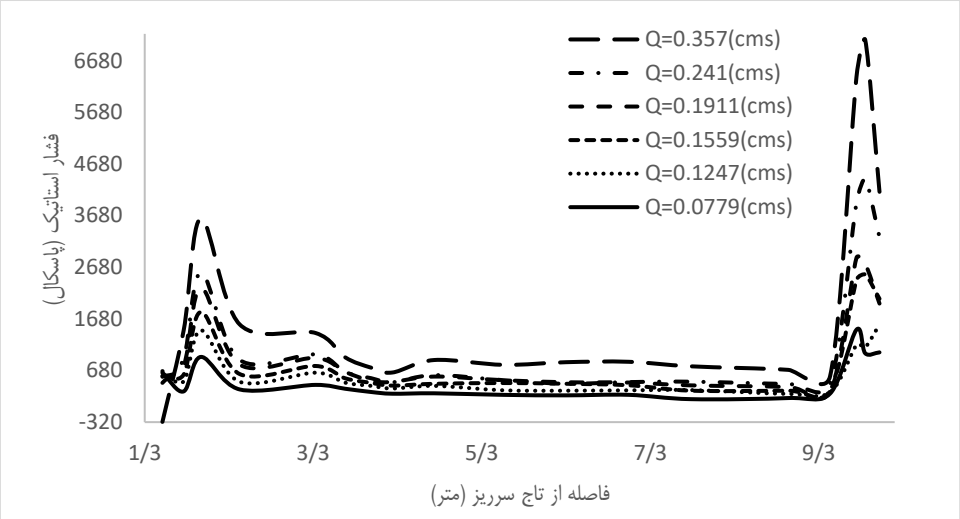
شکل۹- نمایی از سرریز شبیه‌سازی شده و محل هواده‌ها در مدل عددی به ازای سه و دو سیستم هواده

شکل ۱۰ شاخص کاویتاسیون به ازای سه و دو سیستم هواده را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل ۱۰ مشخص است، با کارگزاری سیستم هواده بر روی سرریز، مقدار شاخص کاویتاسیون نیز افزایش پیدا کرده که بیانگر افزایش فشار و کاهش سرعت در محدوه مورد نظر می‌باشد. با توجه به مطالب فوق و نمودار شکل ۱۰، سرریز با دو سیستم هواده به عنوان گزینه برتر انتخاب گردید، زیرا با مقایسهٔ مقادیر شاخص کاویتاسیون مشخص شد که تعدد سیستم هواده، تأثیر چندانی بر نتایج ندارد و همان دو سیستم هواده برای این سرریز در فواصل مشخص شده کافی می‌باشد.

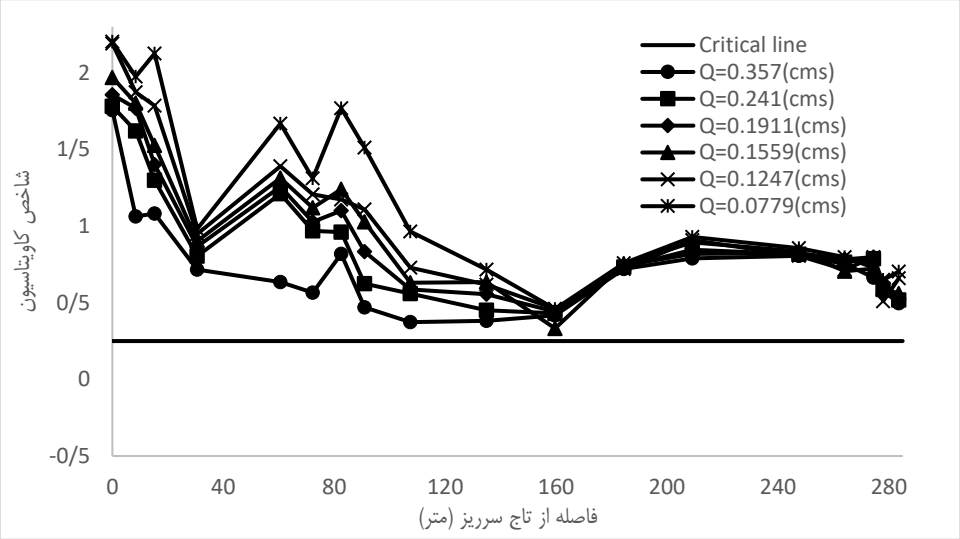


شکل۱۰- شاخص کاویتاسیون به ازای سه و دو سیستم هواده

پس از تایید دو سیستم هواده برای این سرریز، در مرحله بعد مدل عددی برای دبی‌های ۵۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰، ۱۲۲۶ و ۱۵۴۵ مترمکعب برثانیه در واقعیت و برابر ۰/۰۷۷۹، ۰/۱۲۴۷، ۰/۱۵۵۹، ۰/۱۹۱۱ و ۰/۲۴۱ مترمکعب برثانیه در مدل ، اجرا شد و مقادیر شاخص کاویتاسیون با توجه به سرعت متوسط و فشارهای استاتیک استخراج گردید. شکل ۱۱ مقادیر فشار استاتیک و شکل ۱۲ مقادیر شاخص کاویتاسیون بر روی سرریز با دو سیستم هواده به ازای دبی‌های مورد استفاده در مدل عددی را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل ۱۲ قابل مشاهده است، استفاده از دو سیستم هواده به خوبی توانسته موجب بهبود وضعیت جریان به ازای همه دبی‌های مورد مطالعه، از لحاظ کاویتاسیون شود، به طوری‌که مقادیر شاخص کاویتاسیون در محدوده سیستم هواده و پایین‌دست آن، به خوبی از مقدار بحرانی فاصله گرفته‌است.



شکل ۱۱- مقادیر فشاراستاتیک بر روی سرریز با دو سیستم هواده به ازای دبی‌های مورد استفاده در مدل عددی



شکل ۱۲- مقادیر شاخص کاویتاسیون بر روی سرریز با دو سیستم هواده به ازای دبی‌های مورد استفاده در مدل عددی

نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از مدل عددی ANSYS FLUENT، به شبیه‌سازی الگوی جریان و فشار استاتیک و شاخص کاویتاسیون در سرریز سد آزاد پرداخته شد. نتایج نشان می‌دهد که مدل عددی ANSYS FLUENT توانایی بالایی را در شبیه‌سازی جریان در سرریز مذکور را دارا است. صحت‌سنجی نتایج با استفاده از مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده سرریز سد بدون سیستم هواده توسط مدل با نتایج آزمایشگاهی صورت گرفت. بدین ترتیب که در مقاطع عرضی مختلف عمق آب و فشارهای استاتیک شبیه‌سازی شده با عمق آب و فشارهای استاتیک آزمایشگاهی مقایسه و متوسط درصد خطا برای هر مقطع

محاسبه گردید. تحلیل نتایج در مدل نشان می‌دهد که مقدار شاخص کاویتاسیون تا فاصله ۱۶۰ متری (در واقعیت) از تاج سرریز در محدوده مجاز بوده و از فاصله ۱۶۰ متری تا انتهای سرریز که حدود ۱۳۰ متر (در واقعیت) می باشد، پدیده کاویتاسیون بر روی سرریز سد مخزنی آزاد به ازای دبی‌های مورد مطالعه رخ می‌دهد. با توجه به این نتایج نیز جهت برطرف نمودن پدیده کاویتاسیون در محدوده مورد نظر از سیستم هواده در دو سناریو (سه سیستم هواده و دو سیستم هواده) استفاده شد. که با بررسی فشاراستاتیک و محاسبه شاخص کاویتاسیون در هر سناریو، سرریز با دو سیستم هواده گزینه مناسب برای برطرف کردن پدیده کاویتاسیون شد. زیرا با مقایسهٔ مقادیر شاخص کاویتاسیون مشخص شد که تعدد سیستم هواده، تأثیر چندانی بر نتایج ندارد و همان دو سیستم هواده برای این سرریز در فواصل مشخص شده کافی می‌باشد. انتخاب این سناریو نیز، باعث صرفه‌جویی در هزینه و همچنین وقت نیز خواهد شد.

ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان مقاله اعلام می نمایند که از اصول اخلاقی انجام و انتشار پژوهش پیروی نموده اند.

حامی مالی

حمایت مالی این مقاله در قالب پایان نامه کارشناسی ارشد نویسنده اول، توسط دانشگاه رازی کرمانشاه انجام شده و بدینوسیله نویسندگان مقاله، مراتب قدردانی خود را از دانشگاه رازی ابراز می دارند.

مشارکت نویسندگان

در این تحقیق، جمع آوری منابع، اجرای نرم افزار، نتیجه گیری و بحث توسط نویسنده اول انجام شده است و نویسنده دوم بر کلیه مراحل نگارش مقاله، بحث و نتیجه گیری و پاسخ به داوران مشارکت داشته است.

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد.

منابع

۱. دهدار بهبهانی، ص.،(۱۳۹۰)، بررسی هیدرولیک جریان سرریز بالارود با استفاده از مدل ریاضیFLOW 3D و مقایسه با مدل فیزیکی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
(https://scu.ac.ir/~fathi49)

۲. آرامی فدافن م. علوی مقدم م. اژدری مقدم م. اکبری غ. ۱۳۹۰. بررسی تاثیر هوادهی در کاهش کاویتاسیون به وسیله مدل‌سازی سه‌بعدی جریان، یازدهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر. کرمان.
(https://civilica.com/doc/157883/)

۳. ورجاوند،پ.فرسادی‌زاده،د.حسین‌زاده‌دلیر،ع.صدرالدینی،ع.۱۳۸۸، "شبیه‌سازی سه بعدی جریان در سرریز جانبی با استفاده از مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ و مقایسه نتایج با مدل فیزیکی "، مجله دانش آب و خاک،جلد۲۰/۱، شماره۳ ، دانشگاه تبریز.
https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.)(aspx?id=141150

٤. ایزدی‌نیا،ا.ریسمانی،ن.میرعلایی، ر.۱۳۹۵،"شبیه‌سازی تاثیر تغییرات جریان بر پدیده کاویتاسیون روی یک سرریز اوجی با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت"، نهمین کنگره ملّی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد.
(http://www.tpbin.com/article/49534)

5. Ozturk M. and Aydin M. c. 2009. Verification of a 3-D numerical model for spillway aerator. Mathematical and Compotational Applications. 14(1): 21-30.
(https://doi.org/10.3390/mca14010021)

6. Bordbar A. Mousavi-jahromi H. Shafaei Bajestan M. and Sedghi H. 2010. Step effects investigation on the flow regime and cavitation in stepped morning gloye spillways. World Applied Sciences journal. 10(9): 1024-1031.
(https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.390.3838&rep=rep1&type=pdf)

7. Li CH, gong J,li X, (2011). Numerical simulation of flow over a spillway with turbulence model. Mechanics and Materials volume 90-93 on pages 2511 to 2515.
(https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.90-93.2511)

8. Yurdagul Kumcu,S,(2016),Investigation of Flow Over Spillway Modeling and Comparison between Experimental Data and CFD Analysis. KSCE Journal of Civil Engineering (2017) 21(3):994-1003. Necmettin Erbakan University, Konya, Turkey.
(https://doi.org/10.1007/s12205-016-1257-z)