

## Research Paper

# Simulation and Optimization of Hydraulics parameter in Turbulence Flow of Dam Bottom Outlet Using OpenFOAM

Mehdi Ghobadi<sup>1</sup>, Sina Fard Moradina<sup>2,3\*</sup>

1. Master's Degree in Civil Engineering - Water and Hydraulic Structures, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

2. Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

3. Robotics and Soft Technologies Research Center, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

Received: 14/02/2023

Revised: 18/03/2023

Accepted: 14/08/2023

Use your device to scan and read the article online



DOI:

[10.30495/wej.2024.31570.2379](https://doi.org/10.30495/wej.2024.31570.2379)

### Keywords:

Dam bottom outlet, OpenFOAM, CFD, Genetic Algorithm, Discharge coefficient

### Abstract

**Introduction:** The use of numerical methods is widely used in diagnosing the performance of hydraulic systems and optimizing them. Numerical modeling is less expensive than experimental work. Numerical methods can be used to check the accuracy of the results and compare them. In this thesis, the fluid volume method is used to simulate the free surface flow of water inside the lower discharger of Kani Sib Dam. Since the flow inside the dischargers is turbulent, k- $\epsilon$ , k- $\epsilon$  RNG, k- $\omega$  SST, k- $\omega$  and also LES turbulence models have been used and compared. Also, the discharge coefficient inside the lower discharger and the aeration flow have been investigated and compared.

**Methods:** To simulate the turbulent flow inside the lower discharger, continuity equations, momentum, energy and equation of state along with equations related to the aforementioned turbulence models have been solved using OpenFoam software. The set of equations of conservation of mass, conservation of momentum and energy for turbulent flow, which are so-called Reynolds averaging equations, are the governing equations of the flow and are used to model the flow by solving them numerically.

**Findings:** The simulation and optimization of the hydraulic parameters of the turbulent flow in the lower dischargers of the Sib Mineral Dam has been completed using OpenFOAM. The results have been made on the parameters of the lower discharger of Sib mineral dam. And the optimization is done using genetic algorithm. In this research, it was found that with the increase of the hydraulic diameter, the discharge coefficient increases. Also, with the increase of the hydraulic diameter, the core of the water fluid jet inside the discharger undergoes a strong fluctuation, which can increase the shear stress. An excessive increase in shear stress can cause corrosion of the discharge walls. On the other hand, with a further decrease in shear stress, deposition inside the lower discharger increases. At the same time, with the increase in the length of the lower discharger, the discharge coefficient decreases. The optimal selection of the length of the lower drain depends on the height behind the dam. As the opening rate increases, the discharge coefficient also increases and the k- $\epsilon$  turbulence model gives more acceptable results to estimate the results. Finally, for each aeration flow rate, a set of optimal values for the discharge coefficient and the opening rate has been obtained.

**Citation:** Mehdi Ghobadi, Sina Fard Moradina. Simulation and Optimization of Hydraulics parameter in Turbulence Flow of Dam Bottom Outlet Using OpenFOAM. Water Resources Engineering Journal. 2024; 17(60): 53-71.

\***Corresponding author:** Sina Fard Moradina

**Address:** Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

**Tell:** +989143142619

## Extended Abstract

### Introduction

The proper design of dams' discharge valves from a hydraulic point of view can reduce possible damage to dams, such as vibration due to cavitation, vibration resonance, etc., and prevent accidents. Of course, considering the location and importance of dams, any error and mistake in its hydraulic design will cause irreparable accidents. For the proper and optimal design of the valves, accurate information on the hydraulic characteristics of the turbulent flow and their effect on these facilities is needed. Due to the high costs of collecting this information on a real scale, the use of numerical simulations based on the basic governing laws along with disturbance models has led to the facilitation of obtaining this information. In this research, the hydraulic characteristics of turbulent flow will be analyzed using the fluid volume method and OpenFoam open source software. The equations used in the simulation include the Navier-Stokes equations, the Reynolds equation and the continuity equations for the water and air phase. The spillway studied in this research is the spillway of Kani Sib Dam in West Azarbaijan province, which is located at a distance of about 10 km from Ashnoye city and the axis of the dam, about 700 meters upstream of Chaparabad village on the Kani Sib river. It seems that in this dam, the discharge valves occasionally vibrate when the discharge is high. Therefore, in this research, its hydraulic parameters will be investigated in order to prevent such problems in the future.

### Findings

The simulation and optimization of the hydraulic parameters of the turbulent flow in the lower dischargers of the Kani Sib Dam has been completed using OpenFOAM. The results have been made on the parameters of the lower discharger of Sib mineral dam. And the optimization is done using genetic algorithm. In this research, it was found that with the increase of the hydraulic diameter, the discharge coefficient increases. Also, with the increase of the hydraulic diameter, the core of the water fluid jet inside the discharger undergoes a strong fluctuation, which can increase the shear stress. An excessive increase

in shear stress can cause corrosion of the discharge walls. On the other hand, with a further decrease in shear stress, deposition inside the lower discharger increases. At the same time, with the increase in the length of the lower discharger, the discharge coefficient decreases.

The optimal selection of the length of the lower drain depends on the height behind the dam. As the opening rate increases, the discharge coefficient also increases and the  $k-\epsilon$  turbulence model gives more acceptable results to estimate the results.

Finally, for each aeration flow rate, a set of optimal values for the

### Discussion

In this research, the hydraulic modeling of the lower drain of the dam was done against the changes in the diameter and length of the lower drain. During this modeling, 60 states with different hydraulic and physical characteristics have been prepared for the lower discharger. This number of states have been modeled with the help of OpenFOAM and Salome software, and the discharge coefficient values have been obtained for each state, and the results have been presented and compared in the form of tables and graphs.

In this study, turbulence kinetic energy was used to calculate shear stress. As the hydraulic diameter of the lower discharger increases, the same amount of fluid flows through the lower discharger with a higher flow rate, but this increase in flow rate does not always mean that the function of the discharger is suitable. So that the discharge coefficient must be applied in a specific value by the designers for the lower discharger.

As the length of the discharger increases, the discharge coefficient also decreases. On the other hand, in hydraulic designs inside the dischargers, the height behind the dam has a direct relationship with the length of the discharger. And based on that, this length is chosen.

By increasing the length of the lower discharger, the pressure distribution in the valve opening decreases. This decrease in pressure can cause cavitation inside the lower discharger. The phenomenon of cavitation is caused by reducing the pressure below the atmosphere and creating bubbles inside the

lower dischargers, which can cause corrosion in the discharge valve over time and cause irreparable damage.

While turbulence models and shear stress prediction showed unacceptable results.

Turbulence models of the  $k-\varepsilon$  family show more acceptable results in RANS turbulence models and calculate the discharge coefficient more accurately.

By using the convergence of Pareto fronts, for each desired discharge coefficient, an aeration value and the opening rate of the discharge valve are optimally obtained. All the parameters on the convergence line of the Pareto front represent optimal values.

## Conclusion

In this research, the simulation and optimization of the hydraulic parameters of the turbulent flow in the lower dischargers of the Rash mineral dam using OpenFOAM has been studied. The results have been made on the parameters of the lower discharger of the Kani Sib dam. And the optimization has been done using the genetic algorithm. The results show that the numerical method used in open foam has a very good agreement with the experimental works, especially in the  $k-\omega$  turbulence model compared to  $k-\varepsilon$ . The results showed that the simulation error percentage for the discharge coefficient is about 7% and the optimal and simulation results for the aeration flow rate are 20 and 24 cubic meters per hour, respectively. It was also found that with the increase of the hydraulic diameter, the discharge coefficient increases and with the increase of the length of the lower discharger, the discharge coefficient decreases. The optimal selection of the length of the lower drain depends on the height behind the dam

## Funding

No funding.

## Authors' contributions

## Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

## مقاله پژوهشی

## شبیه‌سازی و بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی جریان آشفته در تخلیه کننده‌های تحتانی سد با استفاده از Open FOAM

مهدی قبادی<sup>۱</sup>، سینا فرد مرادی‌نیا<sup>۲\*</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران-آب و سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

۲- گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

۳- مرکز تحقیقات رباتیک و فناوری‌های نرم، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

## چکیده

**مقدمه:** استفاده از روش‌های عددی به طور گسترده در تشخیص عملکرد سیستم‌های هیدرولیکی و بهینه‌سازی آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل‌سازی عددی هزینه کمتری نسبت به کار تجربی دارد. روش‌های عددی می‌توانند برای بررسی صحت نتایج و مقایسه بین آن‌ها نیز مورد بهره‌برداری قرار بگیرند. در این پایان‌نامه روش حجم سیال برای شبیه‌سازی جریان سطح آزاد آب در داخل تخلیه کننده تحتانی سد کانی سبب مورد استفاده قرار گرفته است. از آنجاییکه جریان در داخل تخلیه کننده‌ها به صورت آشفته است، از مدل‌های توربولانسی  $k - \omega$ ،  $k - \omega SST$ ،  $k - \varepsilon RNG$ ،  $\varepsilon$  و همچنین LES استفاده و مقایسه شده‌اند. همچنین ضریب تخلیه در داخل تخلیه کننده تحتانی و دبی هوادهی نیز مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است.

**روش:** برای شبیه‌سازی جریان توربولانسی داخل تخلیه کننده تحتانی، معادلات پیوستگی، ممنتوم، انرژی و معادله حالت به همراه معادلات مربوط به مدل‌های آشفتگی مذکور با استفاده از نرم افزار این فوم حل شده‌اند. مجموعه معادلات بقای جرم، بقای ممنتوم و انرژی برای جریان آشفته که اصطلاحاً به آن‌ها معادلات متوسط گیری رینولدز گفته می‌شود، معادلات حاکم بر جریان بوده و با حل عددی آنها به مدل سازی جریان پرداخته می‌شود.

**یافته‌ها:** شبیه‌سازی و بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی جریان آشفته در تخلیه کننده‌های تحتانی سد کانی سبب با استفاده از این فوم (OpenFOAM) پرداخته شده است. نتایج بر روی پارامترهای تخلیه کننده تحتانی سد کانی سبب صورت گرفته است. و بهینه‌سازی نیز با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام پذیرفته است. در این تحقیق مشخص گردید که با افزایش قطر هیدرولیکی، ضریب تخلیه افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش قطر هیدرولیکی، هسته‌ی جت سیال آب داخل تخلیه کننده دچار نوسان شدیدی می‌گردد که می‌تواند افزایش تنش برشی را رقم بزند. افزایش بیش از حد تنش برشی از طرفی می‌تواند باعث خوردگی جداره‌های تخلیه کننده گردد. از طرف مقابل با کاهش بیشتر تنش برشی، رسوب‌گذاری در داخل تخلیه کننده تحتانی افزایش می‌یابد. در ضمن با افزایش طول تخلیه کننده تحتانی، ضریب تخلیه دچار کاهش می‌شود. انتخاب بهینه طول تخلیه کننده تحتانی وابسته به ارتفاع پشت سد می‌باشد. با افزایش میزان بازشدگی، ضریب تخلیه نیز افزایش می‌یابد و مدل توربولانسی  $k - \omega$  نتایج قابل قبول‌تری برای تخمین نتایج به دست می‌دهد. در نهایت برای هر دبی هوادهی، یک مجموعه مقادیر بهینه برای ضریب تخلیه و میزان بازشدگی به دست آمده است.

**نتیجه‌گیری:** در این تحقیق به شبیه‌سازی و بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی جریان آشفته در تخلیه کننده‌های تحتانی سد کانی سبب با استفاده از این فوم (OpenFOAM) پرداخته شده است. نتایج بر روی پارامترهای تخلیه کننده تحتانی سد کانی سبب صورت گرفته است. و بهینه‌سازی نیز با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام پذیرفته است. نتایج بیانگر این مطلب است که روش عددی استفاده شده در این فوم، با کارهای تجربی تطابقت بسیار خوبی دارد، مخصوصاً در مدل توربولانسی  $k - \omega$  نسبت به  $k - \varepsilon$ . نتایج بیان گر این مطلب بود که در درصد خطا شبیه‌سازی برای ضریب تخلیه چیزی در حدود ۷ درصد می‌باشد و نتایج بهینه و شبیه‌سازی برای دبی هوادهی نیز به ترتیب برابر مقدار ۲۰ و ۲۴ متر مکعب بر ساعت است. همچنین مشخص گردید که با افزایش قطر هیدرولیکی، ضریب تخلیه افزایش می‌یابد و با افزایش طول تخلیه کننده تحتانی، ضریب تخلیه دچار کاهش می‌شود. انتخاب بهینه طول تخلیه کننده تحتانی وابسته به ارتفاع پشت سد می‌باشد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۵

تاریخ داوری: ۱۴۰۱/۱۲/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۳

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



DOI:

10.30495/wej.2024.31570.2379

## واژه‌های کلیدی:

تخلیه کننده تحتانی سد، Open FOAM، دینامیک سیالات محاسباتی، الگوریتم ژنتیک، ضریب تخلیه

\* نویسنده مسئول: سینا فرد مرادی نیا

نشانی: گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

تلفن: ۰۹۱۴۳۱۴۲۶۱۹

پست الکترونیکی: fardmoradina@iaut.ac.ir

## مقدمه

پارامترهایی مانند بازشدگی دریچه‌ها، قطر لوله سیستم هوادهی بر روی ضریب تخلیه و دبی سیستم هوادهی پرداختند. آنها به این نتیجه دست یافتند که نسبت عمق جریان به قطر دهانه (نسبت عمق جریان) و بازشدگی دهانه‌ی سیستم، تاثیر بسیار زیادی در طراحی هیدرولیکی تخلیه کننده‌های تحتانی دارد. [۸] با استفاده از مدل‌سازی عددی به بررسی تاثیر بازشدگی شیر دریچه‌ی تخلیه کننده‌ی تحتانی بر ضریب تخلیه پرداختند. در کار آنها از مدل توربولانسی RNG استفاده شده بود. نتایج کار آنها تطابقت بسیار خوبی با کارهای تجربی داشت. [۹] با استفاده از روشی مشابه با کار [۱۰] به شبیه‌سازی پروفیل سطح آب، سرعت میانگین و مشخصه‌های کاویتاسیون قبل و بعد از هوادهی پرداختند. نتایج کار عددی آنها نشان دهنده‌ی کاهش کاویتاسیون با کاهش نسبی سرعت میانگین بود. تخلیه کننده تحتانی سدها می‌تواند به صورت جریان آزاد، تحت فشار و یا ترکیبی از هر دو حالت باشد. تحلیل جریان سطح آزاد در تخلیه کننده‌ها اعم از مجاری روباز یا سرپوشیده نیمه پر، بر اساس قانون بقای انرژی در جریان‌های غیریکنواخت دائمی صورت می‌گیرد و جریان پر در مجاری سرپوشیده از اصول جریان تحت فشار تبعیت می‌کند [۱۱]. [۱۲] به صورت عددی جریان دو فازی آب و هوا را در یک تخلیه کننده بررسی کردند و نتایج را با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه کردند. آنها همچنین شرایط جریان را با و بدون هوادهی مورد بررسی قرار دادند. [۱۳] با شبیه‌سازی هوادهی در تخلیه کننده سد چگین به این نتیجه رسیدند که ارتفاع مجرا تاثیر بسزایی بر هوای ورودی از هواده و توزیع غلظت هوا در عمق جریان دارد. [۱۴] نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی هوادهی به جریان را با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه کردند و نشان دادند که مدل‌های عددی به خوبی قادر به شبیه‌سازی این پدیده هستند. استفاده از مدل‌های عددی در کنار مدل‌های آزمایشگاهی در مسائل مختلف سازه‌های هیدرولیکی انجام شده است [۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹]. این تحقیقات نشان داده است که این دو روش می‌توانند به صورت موازی به حل مسائل پیچیده هیدرولیکی کمک کنند. [۲۰، ۲۱، ۲۲]. یکی از پارامترهای تاثیرگذار در میزان هوادهی جریان، شرایط استغراق خروجی تخلیه کننده تحتانی است. در این تحقیق با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی تخلیه کننده تحتانی سدهای قیزقلعه‌سی و به ترتیب تحت شرایط خروجی مستغرق و آزاد، تاثیر استغراق خروجی بر میزان هواگیری جریان با اندازه‌گیری ۴ کارون پارامتر ضریب هوادهی مورد بررسی قرار گرفته است. در مطالعه‌ای که توسط [۱۵-۱۹] به صورت آزمایشگاهی روی سازه هوارسان در سدهای کوتاه انجام گرفت بیان گردید روابط مربوط به میزان هوادهی به جریان در سدهای بلند قابل استفاده در سدهای کوتاه نیست. آنها همچنین ضریب دبی را برای یک تخلیه کننده در شرایط هوادهی و عدم هوادهی محاسبه و ارائه کردند. به موازات کارهای آزمایشگاهی صورت گرفته در خصوص این پدیده، مطالعات عددی نیز صورت گرفته است. با توجه به هزینه‌های بالای گردآوری این اطلاعات در مقیاس واقعی، استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی مبتنی بر قوانین اساسی حاکم به همراه مدل‌های آشفته‌گی، منجر به تسهیل دستیابی به این اطلاعات شده است. از بررسی پیشینه تحقیق می‌توان دریافت که مطالعه‌ی جامع در رابطه با بهینه‌سازی

سدها از اجزای مختلفی تشکیل می‌شوند. سرریزها و تخلیه کننده‌های تحتانی در اکثر سدهای بزرگ از جمله مهم‌ترین بخشهای یک سد محسوب می‌شوند. تخلیه کننده‌های تحتانی از سازه‌های مهم سدها می‌باشند که وظیفه مهم کنترل دبی بهره‌برداری و یا تخلیه مخزن و رسوبات آن را بر عهده دارند. دبی خروجی توسط دریچه سرویس کنترل می‌شود و در برخی موارد جهت شرایط خرابی (و یا طراحی نامناسب آنها) دریچه فوق از دریچه اضطراری بلافاصله بالادست آن استفاده می‌شود. برای طراحی مناسب و بهینه دریچه‌ها، به اطلاعات دقیق ویژگی‌های هیدرولیکی جریان آشفته و تاثیر آنها بر این تالیسات نیاز است. با توجه به هزینه‌های بالای گردآوری این اطلاعات در مقیاس واقعی، استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی مبتنی بر قوانین اساسی حاکم به همراه مدل‌های آشفته‌گی، منجر به تسهیل دستیابی به این اطلاعات شده است. پارامترهای مختلف هیدرولیکی از قبیل میزان دبی خروجی از مجرای تخلیه کننده تحتانی، میدان فشار، عمق جریان و سرعت جریان بر اساس شرایط هندسی پایین دست دریچه‌ها تغییر می‌کنند. بررسی اثر تغییر هندسه مجاری پایین دست این قبیل سازه‌ها می‌تواند دید بهتری به طراحان سازه‌های هیدرولیکی در تخلیه کننده‌های تحتانی سدها بدهد. از آنجاییکه ساخت مدل‌های فیزیکی و ایجاد تغییرات هندسی بر روی این قبیل مدل‌ها مستلزم صرف هزینه‌های گزافی است در این زمینه می‌توان از مدل‌های عددی استفاده نمود. رشد روزافزون استفاده از مدل‌های عددی در زمینه مهندسی آب، به دلایل مختلفی همانند قابلیت آنها در مدل‌سازی با مقیاس واقعی، وجود تعداد زیادی از مطالعات صحت سنجی شده خصوصاً در مورد جریان‌های سطح آزاد و تحت فشار است. همچنین توانایی این مدل‌ها در شبیه‌سازی پدیده‌های مهم از قبیل جریان جهش هیدرولیکی مستغرق، مدل‌های دو (مثلاً آب و هوا) و چند فازی همچون اختلاط آب و هوا ورود هوا به جریان به صورت سطحی یا همراه با هوادهی در زمره توانمندی این نرم افزارها قرار دارد [۱ و ۲]. بازشدگی اندک دریچه تنظیم جریان منجر به جریان‌های با سرعت بالا در پایین دست آن می‌شود که نتیجه آن کاهش شدید فشار در پایین دست دریچه می‌شود که حتی می‌تواند به زیر فشار اتمسفر نیز برسد. این کاهش فشارها باعث ایجاد حبابهایی در جریان و ایجاد پدیده کاویتاسیون می‌گردد که خود بسیار مخرب می‌باشد. برای حل این مشکل از سیستم‌های هوادهی برای بالا بردن فشار استاتیکی استفاده می‌شود [۳ و ۴]. [۵] به بررسی عددی و ساخت مدل هیدرولیکی تخلیه کننده‌های تحتانی سدها پرداخت. او از مدل توربولانسی k-epsilon برای کارشان استفاده کرده بود. ضریب تخلیه و دبی سیستم هوادهی در تخلیه کننده‌های تحتانی سدها، مدل‌سازی و مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج کار آنها بیانگر وجود حداکثر درصد خطای ۹ و ۳ درصد به ترتیب برای ضریب تخلیه و دبی سیستم هوادهی بین مدل ساخته شده و کار عددی بود. [۶] به بررسی خسارات ایجاد شده توسط کاویتاسیون در تونل تخلیه کننده‌های تحتانی سدها پرداختند. آنها مجموعه اطلاعات کاملی در رابطه با ارتباط بین طول تونل و ایجاد کاویتاسیون گزارش نمودند. [۷] نیز به صورت تجربی به بررسی تاثیر

دینامیک سیالات محاسباتی معرفی شد. در ضمن نمونه‌هایی از روش RANS در آن سالها مورد تحلیل قرار گرفت ولی چندان محبوبیت نداشت. از سال ۱۹۷۳ تا دهه ۱۹۹۰ به دلیل کمبود امکانات و سختی محاسباتی برای روش‌های LES و DNS، روش RANS مورد رغبت بسیاری از محققان قرار گرفت. از نظر سیالات محاسباتی، روش LES بین روش RANS و DNS در نظر گرفته می‌شود. روش RANS با متوسط گیری زمانی از سرعت و شتاب سیال، مقادیر متوسط آنها را محاسبه می‌کند. در روش DNS بدون مدل‌سازی و فقط با استفاده از شبکه‌بندی به بررسی جزئیات جریان، با دقت بسیار بالا پرداخته می‌شود. در روش RANS، پارامترهایی مانند سرعت به دو جمله نوسانی و متوسط که شامل تمامی مقادیر نوسان جریان است مدل‌سازی می‌گردند. مزیت LES نسبت به RANS در این می‌باشد که ابتدا مقیاس‌های بزرگ از مقیاس‌های کوچک جدا گردیده و بعد از نوسان موجود در مقیاس‌های کوچک، مدل‌سازی کامل می‌شود. روش LES نسبت به روش RANS دقیق‌تر و زمان‌برتر می‌باشد. در روش LES هرگونه حرکتی در مقیاس‌های بزرگ، به صورت مستقیم، مثل روش DNS<sup>۲</sup> محاسبه و کامل می‌شود [۲۳].

### مدل‌های توربولانسی

معادلات RANS، معادلاتی هستند که با متوسط‌گیری زمانی برای سرعت و شتاب سیال به پیش‌بینی رفتار سیال می‌پردازد. در بخش قبل به صورت مختصر در رابطه با این معادلات توضیحاتی داده شد، ایده‌ی اصلی این معادلات، این می‌باشد که مقدار لحظه‌ای سرعت به مقادیر متوسط زمانی و نوسانی خود تجزیه می‌شود. این معادلات با استفاده از ویژگی جریان توربولانس، حل تقریبی از متوسط زمانی پارامترها را برای معادلات ناویر استوکس ارائه می‌دهد

این مدل در گرادین‌های فشار معکوس بزرگ عملکرد چندان مطلوبی ندارد. مدل  $k - \epsilon$  یک مدل دو معادله‌ای از نوع RANS است و دارای دو معادله‌ی انتقال رینولدز برای محاسبه خواص توربولانسی جریان سیال است. برای محاسبه اثرات جابجایی و پخش در انرژی جنبشی آشفتگی می‌توان از نوع مدل استفاده کرد. انرژی آشفتگی جنبشی  $k$  و اتلاف آشفتگی  $\epsilon$  با استفاده از معادلات پایه‌ای انتقال رینولدز حل می‌گردند. به عبارتی می‌توان گفت که  $k$ ، انرژی را در آشفتگی و  $\epsilon$  مقیاس آشفتگی را مشخص می‌کند. معادلات مربوط به مدل توربولانسی  $k - \epsilon$  استاندارد مطابق رابطه ۲ است [۲۳]. این مدل توربولانسی از نوع دو معادله‌ای می‌باشد. بطوریکه یک معادله برای حل انرژی جنبشی توربولانس  $k$  معادله‌ی دیگر برای تلفات توربولانس  $\epsilon$  در نظر گرفته شده است.

$$\rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon \quad (2)$$

که در عبارت بالا

$$\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \epsilon$$

پارامترهای هیدرولیکی و همچنین اتفاق نظر کلی در رابطه با انتخاب مناسب‌ترین مدل توربولانسی صورت نگرفته است. در این تحقیق با استفاده از روش حجم سیال و در نرم افزار این سورس این فوم به تجزیه و تحلیل خصوصیات هیدرولیکی جریان آشفته مبادرت شده است. معادلات مورد استفاده در شبیه‌سازی شامل معادلات ناویر استوکس، معادله رینولدز و معادلات پیوستگی برای فاز آب و هوا می‌باشد. سرریز مورد مطالعه در این تحقیق سرریز سد اشنویه در استان آذربایجان غربی می‌باشد که در فاصله حدوداً ۱۰ کیلومتری شهرستان اشنویه و محور سد در حدود ۷۰۰ متری بالادست روستای چپرآباد بر روی رودخانه کانی سیب واقع گردیده است. به نظر می‌رسد که در این سد، درپچه‌های تخلیه‌کننده‌ی در مواقع دبی بالای خود گهگاه دچار لرزش‌هایی می‌شود. لذا در این تحقیق به بررسی پارامترهای هیدرولیکی آن پرداخته خواهد شد تا در آینده از مشکلات این چنینی جلوگیری به عمل آید.

### مواد و روش‌ها

#### معادلات حاکم بر جریان آشفته

#### مدلهای آشفتگی

اغلب جریانات سیال در طبیعت به صورت توربولانس است. جریان آرام در اعداد رینولدز پایین و جریان آشفته در اعداد رینولدز بالا حاصل می‌شود. در جریان آشفته، یک کاملاً حالت تصادفی از حرکت سیال در محل‌هایی که سرعت و فشار مدام در آن قسمت نسبت به زمان متغیر است، رخ می‌دهد.

#### معادله‌ی ممنتوم برای جریان آشفته

معادله مومنوم برای جریان تراکم پذیر و آشفته به صورت رابطه ۱ معرفی می‌شود.

$$\left( \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left( 2S_{ij} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \quad (1)$$

که در آن  $\rho u_i u_j$  تانسورهای تنش رینولدز می‌باشد. این تنش در جریان‌های توربولانس، باعث طولانی‌تر شدن حل معادلات جریان می‌شوند

#### مدل‌های دو معادله‌ای توربولانسی

در مدل‌های دو معادله‌ای، از معادله‌ی پایه‌ای انتقال رینولدز استفاده می‌شود. به طوری یکی از معادلات برای حل یک پارامتر و دیگری نیز برای حل استهلاك آن پارامتر به کار می‌رود. این معادلات پایه و اساس تحقیقات مربوط به مدل‌سازی جریان‌های توربولانس است. حل جداگانه-ی دو معادله‌ی انتقال رینولدز، باعث تعیین جداگانه‌ی سرعت، شدت-آشفتگی و طول آشفتگی می‌شوند در دهه‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ میلادی پیشرفت‌های زیادی در روش‌های محاسباتی اتفاق افتاد و روش‌هایی مختلفی نیز برای در نظر داشتن آشفتگی سیال، اتخاذ شد. اولین آنها LES<sup>۱</sup> بود که به وسیله دردورف در سال ۱۹۷۰ معرفی شد. به دنبال این روش، DNS به وسیله اورساگ و پترسون در سال ۱۹۷۲ به علم

<sup>2</sup> Direct Numerical Simulation

<sup>1</sup> Large eddy simulation

ضرایب ظاهر شده در معادلات بالا برابرند با [۲۳].

$$C_1 = 1/44 \quad C_2 = 1/92 \quad C_\mu = 0/09 \quad \sigma_k = 1 \quad \sigma_\varepsilon = 1/3$$

### مدل توربولانسی $k - \varepsilon$ RNG

مدل  $k - \varepsilon$  برای مدل‌سازی جریان سیال در مقیاس کوچک و اثر آن با استفاده از نرمال‌سازی دوباره معادلات ناویر استوکس، توسعه داده شده‌است (روابط ۳ و ۴). در مدل استاندارد  $k - \varepsilon$  لزجت‌گردابی به وسیله یک مقیاس طول توربولانسی منفرد مشخص می‌گردد. مدل توربولانسی RNG وسیله‌ای برای حل جریان آشفته شبیه به مدل  $k - \varepsilon$  استاندارد است، ولی با این تفاوت که حل آن منجر به ایجاد یک قالب اصلاح شده از معادلات  $\varepsilon$  می‌گردد که برای در نظر گرفتن مقیاس‌های متفاوتی از حرکت جریان سیال، می‌بایست تغییراتی در ضرایب معادله  $\varepsilon$  اعمال نمود [۲۴].

$$\rho(U_j \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 P_k \frac{\varepsilon}{k} \quad (4)$$

که در عبارت بالا

$$C_2^* = C_2 + \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \frac{\eta}{\eta_0})}{1 + \beta \eta^3}$$

$$\eta = \frac{S K}{\varepsilon} \quad \text{and} \quad S = (2 S_{ij} S_{ji})^{0.5}$$

ضرایب نشان داده شده در معادلات ۳ و ۴ به شرح زیر می‌باشند [۲۳].

$$C_1 = \frac{1}{42} \quad C_\mu = \frac{0}{0845} \quad C_2 = \frac{1}{68} \quad \sigma_k = \frac{0}{7194}$$

$$\sigma_\varepsilon = 0/7194$$

$$\eta_0 = 4/38 \quad \beta = 0/012$$

### مدل توربولانسی $k - \omega$ استاندارد

در این قسمت به معرفی معادلات توربولانسی  $k - \omega$  استاندارد پرداخته شده است. معادلات ۵ و ۶ مربوط به مدل توربولانسی  $k - \omega$  است [۲۴].

$$\rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho k \omega \quad (5)$$

$$\rho U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + C_{\omega 1} \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \omega - \rho C_{\omega 2} \omega^2 \quad (6)$$

که در عبارت بالا داریم:

$$v_t = \frac{k}{\omega}$$

مقادیر ضرایب ظاهر شده در معادلات بالا برابرند با [۲۵].

$$C_{\omega 1} = \frac{0}{555} \quad C_{\omega 2} = \frac{0}{833} \quad C_\mu = \frac{0}{09} \quad \sigma_k = 2 \quad \sigma_\omega = 2$$

مدل آشفته‌گی  $k - \omega$  SST یک مدل دو معادله‌ای لزجت‌گردابی است که مانند مدل استانداردش بسیار کاربردی و متداول است. استفاده از روابط  $k - \omega$  در بخش داخلی لایه مرزی منجر به این می‌شود که این مدل در تمام زیر لایه لزج نزدیک دیواره بسیار مناسب‌تر از سایر مدل‌ها باشد. مدل SST به عنوان یک مدل توربولانسی با رینولدز پایین و بدون اتلافات اضافی می‌تواند مورد بهره‌برداری قرار گیرد. روابط SST در جریان آزاد سیال به رفتار  $k - \varepsilon$  نزدیک می‌باشد و رفتار آن در نزدیکی‌های دیواره به رفتار مدل توربولانسی  $k - \omega$  استاندارد شبیه است (روابط ۷ تا ۹). در جدایش جریان سیال و ایجاد گردان فشار معکوس می‌توان از این مدل استفاده نمود. دلیل آن هم این می‌باشد که این مدل سطح آشفته‌گی وسیعی را در نواحی با تنش عمودی بالا (شبیه نواحی سکون و یا نواحی با شتاب زیاد) ایجاد می‌کند. این باعث ایجاد برتری نسبت به مدل  $k - \varepsilon$  می‌شود.

$$U_j \frac{\partial k}{\partial x_i} = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + \sigma_k v_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (7)$$

$$U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_i} = \alpha S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + \sigma_\omega v_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (8)$$

$$v_T = \frac{\alpha_1 K}{\max(\alpha_1 \omega, S F_2)} \quad (9)$$

برخی ضرایب معادلات بالا عبارت‌اند از [۲۶]:

$$F_2 = \tanh \left[ \left[ \max \left( \frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right]$$

$$P_k = \min(\tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}, 10 \beta^* k \omega)$$

$$F_1 = \tanh \left\{ \left[ \min \left( \max \left( \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500}{y^2 \omega} \right), \frac{4 \sigma_{\omega 2} k}{C D_{\omega k} y^2} \right) \right]^4 \right\}$$

$$C D_{\omega k} = \max(2 \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10})$$

ضرایب ظاهر شده در معادلات بالا به شرح زیر می‌باشند [۲۶].

$$\varphi = \varphi_1 F_1 + \varphi_2 (1 - F_1)$$

$$\beta^* = \frac{0}{09} \quad \beta_2 = \frac{0}{0828} \quad \sigma_{k1} = \frac{0}{85}$$

$$\beta_1 = \frac{3}{40} \quad \sigma_{k2} = 1$$

$$\alpha_1 = \frac{5}{9} \quad \sigma_{\omega 1} = \frac{0}{5} \quad \alpha_2 = \frac{0}{44}$$

$$\sigma_{\omega 2} = 0/856$$

### مدل توربولانسی LES

در این تحقیق از مدل توربولانسی LES نیز برای شبیه‌سازی و مقایسه با سایر مدل‌های دو معادله‌ای استفاده شده است. در روش LES، متغیر جریان  $\varphi$ ، به دو بخش مقیاس بزرگ  $\varphi$  و مقیاس زیر شبکه  $\varphi'$  تقسیم می‌شود. عملگر فیلتر به صورت زیر تعریف می‌شود (رابطه ۱۰).

$$\bar{\varphi} = \int_D \varphi(x') G(x, x') dx' \quad (10)$$

که در آن D دامنه حل و G تابع فیلتر می‌باشد که تعیین کننده مقیاس گردابه‌های فیلتر شده است و به صورت رابطه ۱۱ تعریف می‌گردد:

از انتگرال بر روی حجم به انتگرال بر روی سطح نگاشت می‌شوند. سپس جمله پخش با استفاده از روش تفاضل محدود و روش‌های گوناگون برای جمله جابجایی، معادلات به معادله جبری تبدیل می‌گردند. این معادلات جبری به صورت ماتریس‌هایی تعبیه می‌شوند که می‌بایست به وسیله روش‌های عددی تکراری حل شوند. شکل کلی معادله بقا برای کمیت  $\phi$  در یک جریان به صورت رابطه ۱۴ است [۲۴]:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi u) = \text{div}(\Gamma \text{grad} \phi) + s_\phi \quad (14)$$

در این رابطه  $\Gamma$  ضریب پخش خاصیت  $\phi$  می‌باشد و  $S_\phi$  جمله چشمه برای تولید آن است. نرخ افزایش کلی  $\phi$  با نرخ کاهش آن بر اثر خروج جریان به صورت جابجایی با نرخ افزایش  $\phi$  در اثر پخش به علاوه نرخ تولید آن در اثر وجود چشمه برابری می‌کند. همانطور که از خاصیت معادله انتقال رینولدز مشخص است، اگر در رابطه ۱۴ به جای پارامتر  $\phi$  مقدار یک گذاشته شود، معادلات پیوستگی حاصل می‌شود و با قرار دادن بردار سرعت، معادلات ناویر استوکس دست می‌آیند. و می‌بایست به جای  $\Gamma$ ، ضریب پخش پارامتر  $\phi$  قرار داده شود. برای مثال ضریب پخش سرعت، ویسکوزیته است. حالت انتگرال‌گیری شده معادله بالا به صورت رابطه ۱۵ نمایش داده می‌شود [۲۴]:

$$(15)$$

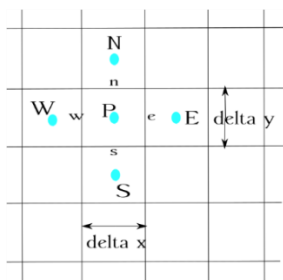
$$\int_{c.v} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dv + \int_{c.v} \text{div}(\rho\phi u) dv = \int_{c.v} \text{div}(\Gamma \text{grad} \phi) dv + \int_{c.v} s_\phi dv$$

و سپس با روش گاوس معادله انتگرالی زیر به انتگرال سطح تبدیل می‌گردد (رابطه ۱۶).

$$(16)$$

$$\int_{c.v} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dv + \int_{c.s} n \cdot (\rho\phi u) dA = \int_{c.s} n \cdot (\Gamma \text{grad} \phi) dA + \int_{c.v} s_\phi dv$$

اگر مش‌بندی به صورت دوبعدی باشد، جمله پخش با استفاده از رابطه ۱۷ و شکل ۱ به یک عبارت جبری تبدیل می‌گردد.



شکل ۱- حجم کنترل سیال در نمای دوبعدی.

$$\int_A n \cdot (\Gamma \text{grad} \phi) dA = \int_A n \cdot \left[ \Gamma \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) \right] dA = \left[ \Gamma_e A_e \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e - \Gamma_w A_w \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w \right] + \left[ \Gamma_n A_n \left( \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_n - \Gamma_s A_s \left( \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_s \right] \quad (17)$$

$$G(x, x') = \begin{cases} \frac{1}{\Delta^3}, & x' \in V \\ 0 & x' \notin V \end{cases} \quad (11)$$

که در آن  $\Delta = V^{1/3}$  اندازه فیلتر (مقیاس موضعی شبکه) و  $V$  حجم ناحیه محاسباتی می‌باشد. با اعمال این فیلتر در سه معادله پیوستگی، مومتوم و حجم سیال، از لحاظ ابعادی دچار تغییراتی می‌شوند.

### مدل توربولانسی $k - \varepsilon$ استاندارد

این مدل توربولانسی یکی از متداول‌ترین مدل‌ها می‌باشد، این مدل در گرادین‌های فشار معکوس بزرگ عملکرد چندان مطلوبی ندارد. مدل  $k - \varepsilon$  یک مدل دو معادله‌ای از نوع RANS است و دارای دو معادله‌ی انتقال رینولدز برای محاسبه خواص توربولانسی جریان سیال است. برای محاسبه اثرات جابجایی و پخش در انرژی جنبشی آشفتگی می‌توان از نوع مدل استفاده کرد. انرژی جنبشی  $k$  و اتلاف آشفتگی  $\varepsilon$  با استفاده از معادلات پایه‌ای انتقال رینولدز حل می‌گردند. به عبارتی می‌توان گفت که  $k$ ، انرژی را در آشفتگی و  $\varepsilon$  مقیاس آشفتگی را مشخص می‌کند.

معادلات مربوط به مدل توربولانسی  $k - \varepsilon$  استاندارد به شرح زیر است [۲۷]. این مدل توربولانسی از نوع دو معادله‌ای می‌باشد. بطوریکه یک معادله برای حل انرژی جنبشی توربولانسی  $k$  معادله‌ی دیگر برای تلفات توربولانس  $\varepsilon$  در نظر گرفته شده است (روابط ۱۲ و ۱۳).

$$\rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu_t + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (12)$$

$$\rho U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu_t + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - \rho \varepsilon + C_1 \mu_t \frac{\varepsilon}{k} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (13)$$

که در عبارت بالا

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

ضرایب ظاهر شده در معادلات بالا برابرند با (لاندرو و سپلادینگ ۱۹۸۳).

$$C_1 = \frac{1}{44} \quad C_2 = \frac{1}{92} \quad C_\mu = \frac{0}{09}$$

$$\sigma_k = 1 \quad \sigma_\varepsilon = 1/3$$

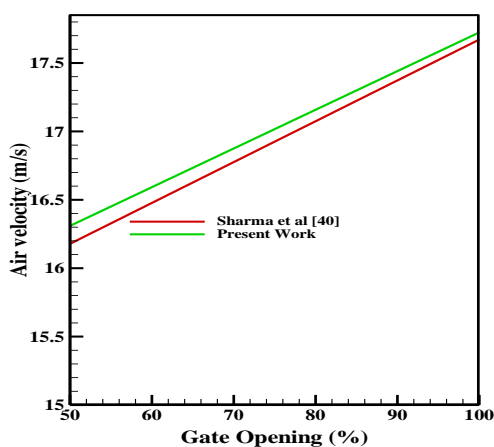
### روش‌های عددی

بعد از معرفی معادلات توربولانسی حاکم بر جریان سیال در داخل تخلیه کننده تحتانی، می‌بایست معادلات را گسسته‌سازی و حل نمود. این حل به دو صورت خطی و غیرخطی صورت می‌گیرد. در نرم‌افزار OpenFOAM، برای حل معادلات جریان سیال، از روش حجم محدود استفاده می‌شود. روندی که طی آن معادلات حاکم بر جریان سیالات، طبق روش حجم محدود حل می‌گردند به شرح زیر هستند:

در ابتدا بر روی حجم کنترل‌های ایجادشده در شبکه، از معادلات حاکم انتگرال گرفته می‌شود. پس از آن معادلات انتگرالی حاصله گسسته‌سازی می‌گردند. قبل از ادامه کار می‌بایست انتگرال‌های حجم بر روی انتگرال‌های سطح نگاشت شوند و این کار به وسیله قانون گاوس صورت می‌پذیرد. جملات جابجایی و پخش معادلات حاکم در این تبدیل



دیواره کانال (افزایش  $m$ )، شدت جریان‌های ثانویه کاهش می‌یابد. در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار *OpenFoam* به صحت‌سنجی جریان‌های ایجاد شده هنگام انتشار جریان سطح آزاد سیال داخل تخلیه‌کننده تحتانی سد کانی سیب پرداخته شده است. نتایج به دست آمده با کار عددی انجام شده به وسیله شارما و همکاران [۲۸] تطابق بسیار خوبی دارد و درصد خطای مشاهده شده ۷ درصد می‌باشد. یکی از دلایل این درصد خطای مشاهده شده، تفاوت در روش‌های عددی این دو می‌باشد. به طوری که در *OpenFOAM* با استفاده از روش حجم محدود (اختلاف مشاهده شده) استفاده از روش گسسته‌سازی گاوس *Upwind* برای جمله انتشار در کد حل گر *InterFOAM* باشد. شکل ۳ نشان دهنده‌ی مقایسه‌ی نتایج بین کار عددی فعلی و کار تجربی شارما و همکاران [۲۸] می‌باشد.



شکل ۳- صحت‌سنجی کار فعلی با کار [۲۸]

برای جایگزین نمودن مشتق موجود در رابطه بالا، یکی از روش‌های تفاضل (بالادست، پایین‌دست و یا مرکزی) استفاده می‌شود. برای روش تفاضل مرکزی از رابطه ۱۸ استفاده می‌شود [۲۴].

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_w = \frac{\phi_p - \phi_w}{\delta x_{wp}} \quad (18)$$

جمله جابجایی معادله بقاء در حالت جریان یک‌بعدی، به صورت رابطه ۱۹ می‌باشد:

$$\frac{d}{dx}(\rho u \phi) \quad (19)$$

بعد از انتگرال‌گیری از رابطه ۱۹ داریم (رابطه ۲۰):

$$\int_A \frac{d}{dx}(\rho u \phi) dA = (\rho u \phi A)_e - (\rho u \phi A)_w \quad (20)$$

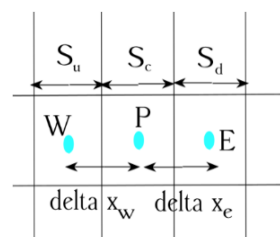
مقدار سرعت  $u$  با توجه به شرایط مرزی، جزء معلومات اکثر مسائل دینامیک سیالات محاسباتی می‌باشد. در رابطه بالا  $\phi$  در نقاط مرزی  $m$  و  $n$  حجم کنترل مجهول می‌باشد. برای محاسبه این مجهول‌ها از روش‌های *Power low*, *Quick Second order upwind*، و *First order upwind* می‌توان استفاده نمود [۲۵]. با مرتب کردن دو بعدی معادلات جهت به دست آوردن  $\phi$  در مرکز المان حجمی رابطه ۲۱ به دست می‌آید:

$$a_p \phi_p = a_w \phi_w + a_E \phi_E + a_N \phi_N + S_u \quad (21)$$

با نوشتن معادله بالا برای تمامی المان‌های حجمی، یک دستگاه معادلات  $n$  معادله و  $n$  مجهول به دست می‌آید. که این دستگاه با استفاده از روش‌های محاسبات عددی تکراری مانند روش گوس سایدل، مقدار  $\phi$  در مرکز تمامی المان‌ها مشخص می‌گردد (رابطه ۲۲) [۲۵]. شکل سه بعدی معادله مطابق شکل ۲ می‌باشد [۲۵].

(۲۲)

$$a_p \phi_p = a_w \phi_w + a_E \phi_E + a_N \phi_N + a_s \phi_s + a_\phi \phi_\phi + a_B \phi_B + S_u$$



شکل ۲- حجم کنترل سیال در فضای یک‌بعدی.

### اعتبارسنجی حل مسئله

ایجاد جریان سطح آزاد آب پشت سد در داخل تخلیه‌کننده تحتانی با استفاده از *OpenFOAM* و صحت‌سنجی و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی و عددی انجام گرفته است [۲۵]. لازم به تذکر است که تمامی مراحل مدل‌سازی در محیط سه بعدی انجام شده است؛ صحت‌سنجی دارای درصد خطای کار زیر ۷ می‌باشد. شارما و همکاران، ۱۹۷۶ به بررسی برخی پارامترهای مهم مانند شکل سطح مقطع کانال تخلیه‌کننده سد بر روی الگوی جریان و گردابه‌ها پرداختند و توانستند نشان دهند که در سطح مقطع دوزنقه‌ای شکل با افزایش شیب جانبی

در فرمول ۱۴ مخرج کسر عبارت است از:  $N = t/dt$ ، و در این عبارت،  $dt$  گام زمانی مد نظر برای استخراج داده‌های شبیه‌سازی شده جهت مقایسه می‌باشد و  $t$  نیز کل زمان شبیه‌سازی شده می‌باشد. محققین و داده‌های عددی کار فعلی می‌باشند. بعد از انجام صحت سنجی با دقت قابل قبول، در ابتدا به بررسی پارامترهای هندسی از جمله قطر تخلیه کننده تحتانی پرداخته می‌شود و در انتها نیز به بررسی مدل‌های توربولانسی RANS پرداخته شده است.

### الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک، الهام گرفته شده از نظریه تکامل داروین می‌باشد. این الگوریتم طبق بقای برترین‌ها یا انتخاب‌های طبیعی ژنتیکی استوار است. یکی از موارد رایج استفاده از آن، به عنوان تابع بهینه می‌باشد. الگوریتم ژنتیک ابزار مفیدی در بازیابی الگو، درک تصویر، انتخاب ویژگی و همچنین یادگیری ماشینی است. در الگوریتم‌های ژنتیکی، نحوه تکامل ژنتیکی موجودات زنده، مدل‌سازی و یا به عبارت بهتر، شبیه‌سازی گردد.

در این الگوریتم، مجموعه‌ای از پارامترهای مسئله توسط رشته‌هایی با طول ثابت یا متغیر کدگذاری می‌شود که به آن‌ها کروموزوم اطلاق می‌شود. هر یک از رشته‌ها یا کروموزوم‌ها یک نقطه از پاسخ را در فضای جستجو نشان می‌دهد. الگوریتم ژنتیک یک فرآیند تکراری می‌باشد. هر مرحله تکرار را نسل و مجموعه‌هایی از پاسخ‌ها در هر نسل را جمعیت می‌گویند.

### تابع هدف

تابع هدف، هدف و خواسته ما از طرح مساله است. نحوه یعنی، تابع هدف، شاخصی از عملکرد افراد در فضای مساله می‌باشد. مسلماً در این تحقیق هدف یافتن تابع هدف اول به صورت بیشینه و تابع هدف دوم به طور کمینه است. در این تحقیق تابع هدف چند گانه عبارت است از:

تابع هدف اول: ضریب تخلیه (رابطه ۲۴)

$$C_d = \frac{Q}{A\sqrt{2gH}} \quad (24)$$

تابع هدف دوم: درصد بازشدگی (رابطه ۲۵)

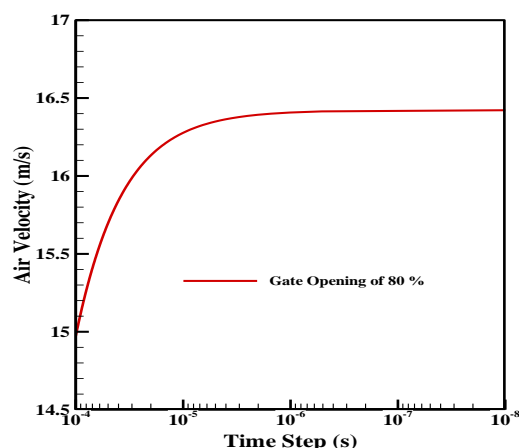
$$\% = \frac{A}{A_0} \quad (25)$$

### شکل کلی میدان و شرایط مرزی و خواص

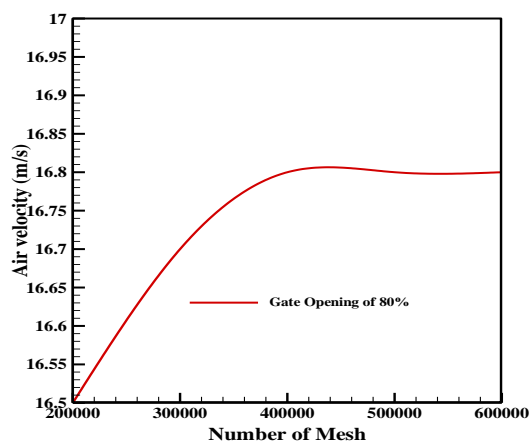
شکل کلی میدان مطابق با سد کانی رش در نظر گرفته شده است. سیالات مورد استفاده شامل آب و هوا می‌باشد که خواص ترموفیزیکی آنها در جدول ۱ نشان داده شده است:

### استقلال نتایج از شبکه و گام زمانی

برای بررسی مستقل بودن نتایج از شبکه‌بندی و همچنین گام زمانی، در ابتدا یک شبکه‌بندی با تعداد مشخص مش انتخاب گردیده است. سپس تعداد شبکه‌ها با دو الی سه برابر کردن، ریزتر نموده و به محاسبه جریان باد تخلیه کننده تحتانی سد پرداخته شده است. برای استقلال نتایج از گام زمانی نیز همین روش برای مقدار گام زمانی صورت پذیرفته است. همانطور که از شکل ۴ و شکل ۵ مشاهده می‌شود، بعد از شبکه‌بندی ۴۵۰۰۰ و گام زمانی ۰/۰۰۰۰۰۱ ثانیه تغییری در سرعت هوادهی مشاهده نمی‌شود. لذا این دو مقدار، مقادیر بهینه و مناسب برای کار عددی فعلی می‌باشند.



شکل ۴- استقلال نتایج از گام زمانی



شکل ۵- استقلال نتایج از شبکه

ذکر این نکته مهم می‌باشد که، برای نشان دادن درصد خطای گزارش شده مابین روش عددی فعلی با کارهای تجربی که برای صحت سنجی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، از روش خطای جذر میانگین مربعات RMSE استفاده شده است که در رابطه ۲۳ نشان داده شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\xi_{Num,i} - \xi_{Exp,i})^2}{N}} \quad (23)$$

ورود خروج (inletOutlet): سرعت و فشار مابین شرایط مرزی مقدار ثابت و گرادیان صفر، مطابق با تغییرات جهت سرعت تغییر می‌کند. فشار ورودی سرعت (pressureInletVelocity): زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد که فشار در ورودی مشخص باشد و سرعت نیز از مقدار شار عمودی در مرز محاسبه شود.

### مشخصات هندسی و شرایط مرزی

مرز ورودی: در این مرز جریان تولیدی به همراه جریان رونده، باید ایجاد شود. شرط مرزی مقدار ثابت و گرادیان صفر از جمله شروط مرزی بسیار پرکاربرد در OpenFOAM می‌باشد. این شرط مرزی به ترتیب برای سرعت و حجم سیال می‌باشد. شرط مرزی گرادیان صفر برای فشار در این مرز اعمال شده است.

مرز خروجی: از این مرز جریان رونده سطح آزاد ایجاد شده عبور می‌کند و از میدان حل خارج می‌شود. مشکلی که بسیاری از مطالعات صورت گرفته، با آن مواجه هستند، بازگشت جریان رونده سطح آزاد در تخلیه‌کننده تحتانی از مرز خروجی و انعکاس آن به داخل میدان می‌باشد. برخی از روش‌های پیشنهاد شده جهت جلوگیری از بازگشت جریان رونده سطح آزاد عبارت است از:

- اصطکاک عددی که با اصلاح کردن معادله مومنتوم حل‌گر صورت می‌پذیرد، که این اصلاح توسط اضافه کردن یک ضریب انجام می‌شود.
- ساحل که سازه‌های ثانویه می‌باشد که در انتهای تخلیه‌کننده نصب می‌شود و انرژی جریان رونده سطح آزاد را جذب می‌کند.
- لایه‌های اسفنجی که مواد متخلخل می‌باشند که در انتهای تخلیه‌کننده تحتانی نصب می‌شود و انرژی جریان سطح آزاد را جذب می‌کند.

۴- افزایش اندازه شبکه در انتهای تخلیه‌کننده تحتانی که منجر به تلف شدن انرژی رونده جریان سیال می‌شود.

در مطالعه فعلی نیز از ناحیه ساکن برای جلوگیری از انعکاس جریان رونده سطح آزاد در تخلیه‌کننده‌ی تحتانی استفاده شده است. در خروجی برای سرعت و حجم سیال از شرط مرزی گرادیان صفر استفاده می‌شود. کف و دیواره: شرط مرزی کف به آن قسمت از میدان حل اطلاق می‌شود که در پایین‌ترین قسمت در تماس با آب قرار گرفته است و برای سرعت مقدار ثابت صفر و عدم لغزش (noSlip) در نظر گرفته شده است. برای فشار و حجم سیال گرادیان صفر در نظر گرفته شده است.

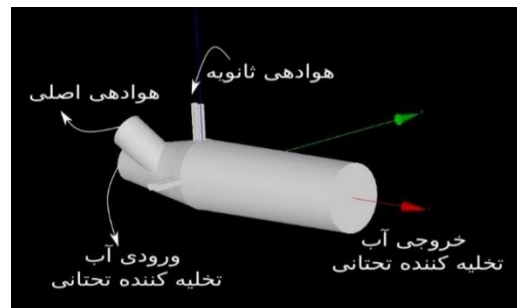
مرز اتمسفر: مرزی که با هوا در تماس است تحت عنوان مرز اتمسفر شناخته می‌شود.

خلاصه‌ای از انواع شرایط مرزی برای تمام مرزها در این تحقیق در جدول ۲ نشان داده شده است.

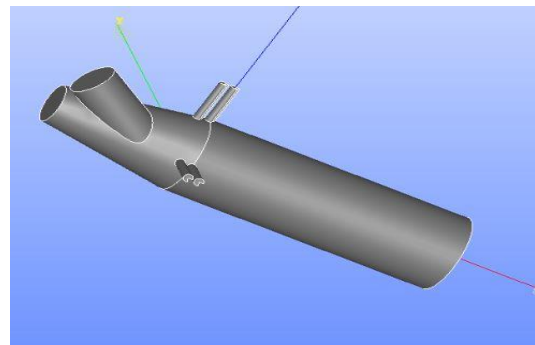
### جدول ۱- جدول خواص مورد استفاده

مقدار	خواص
۱۰۰۰	چگالی آب ( $\text{kg/m}^3$ )
۱/۲	چگالی هوا ( $\text{kg/m}^3$ )
$10^{-6}$	ویسکوزیته سینماتیکی آب ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
$10^{-5} \times 1/48$	ویسکوزیته سینماتیکی هوا ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
۰/۰۷	کشش سطحی ( $\text{N/m}$ )
۹/۸۱	شتاب گرانش ( $\text{m/s}^2$ )

در شبیه‌سازی‌های عددی مخصوصاً در شبیه‌سازی‌های مرتبط با سطح آزاد سیال انتخاب بهترین و مناسب‌ترین شرایط مرزی جزء لزومات می‌باشد. تخلیه تحتانی سد در نظر گرفته شده دارای چهار مرز به نام‌های ورودی، خروجی، ورودی هوادهی، دیواره و می‌باشد که در شکل ۶ و ۷ نشان داده شده است.



شکل ۶- شرایط مرزی مورد استفاده برای تخلیه‌کننده تحتانی سد



شکل ۷- هندسه ترسیم شده تخلیه‌کننده تحتانی کانی رش در نرم افزار سالومه

معنی و مفهوم انواع شرایط مرزی که در OpenFOAM بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند به شرح زیر است.

مقدار ثابت (fixedValue): مقدار پارامتر مشخص می‌باشد.

گرادیان صفر (zeroGradient): گرادیان عمودی پارامتر صفر می‌باشد.

فشار مجموع (totalPressure): مقدار مجموع فشار  $P_0$  ثابت است و با توجه به تعریف فشار مجموع، یعنی  $P_0 = P + 1/2\rho u^2$  تغییرات مقادیر سرعت و فشار مطابق با شروط مرزی انجام می‌گیرد.

سطح مقطعی با کمترین ارتفاع است. با این تفاسیر ضریب تخلیه به صورت رابطه ۲۸ خواهد بود.

$$C_d = \frac{Q}{A \sqrt{2gH}} \quad (28)$$

بیشترین، کمترین و عادی‌ترین ارتفاع سد کانی سیب در رابطه ۲۹ آمده است:

$$\begin{aligned} H_{\max} &= 98.5m \\ H_{\text{nomd}} &= 70.5m \\ H_{\min} &= 38.5m \end{aligned} \quad (29)$$

با توجه به مشخصه فیزیکی سد، افت فشار محاسبه شده برابر است با ۱/۵ متر آب. با توجه به این مقادیر اصلاح شده به صورت رابطه ۳۰ می‌باشد.

$$\begin{aligned} H_{\max} &= 97m \\ H_{\text{nomd}} &= 69m \\ H_{\min} &= 37m \end{aligned} \quad (30)$$

براساس مشخصه فیزیکی سد کانی سیب،  $A_0$  و بیشترین دبی جریان گذرنده از تخلیه کننده تحتانی سد به ترتیب ۴ متر مربع و ۲۰۰ متر مکعب بر ثانیه است. مسلماً برای بیشترین دبی،  $A_0$  برابر با  $A$  است. بنابراین اعداد بی بعد بر اساس این مقادیر عبارت است از (رابطه ۳۱):

$$\begin{aligned} \frac{A}{A_0} &= 1, A_0 = 4m^2 \\ C_d &= \frac{Q}{A \sqrt{2gH}} = 0.807 \\ \frac{A}{H^2} &= 2.04 \times 10^{-4} \\ \frac{\rho Q}{\mu H} &= 1.5 \times 10^6 \end{aligned} \quad (31)$$

با توجه به مقدار  $\frac{A}{H^2}$ ، این مقدار نسبت به سایر پارامترها کم تر است و در مقایسه با دیگر پارامترها قابل چشم پوشی است. با توجه به مقدار بالای رینولدز به دست آمده می‌توان دریافت که، تاثیر قطر هیدرولیکی تخلیه کننده تحتانی از همه موارد بیشتر است.

### تاثیر قطر هیدرولیکی تخلیه کننده تحتانی

بیشترین تنش برشی اغلب در سطح تماس آب داخل تخلیه کننده تحتانی ایجاد می‌شود. به طور مستقیم تنش برشی قابل محاسبه نیست و روش‌های محاسباتی متعددی برای محاسبه تنش برشی به همراه سایر پارامترها مورد استفاده قرار می‌گیرد، مانند شعاع هیدرولیکی. انرژی جنبشی توربولانسی (TKE) کمترین تاثیرپذیری از خطوط جریان دارد و برای مساحت‌های با قطر هیدرولیکی کمتر بسیار مناسب می‌باشد. در این مطالعه نیز از انرژی جنبشی توربولانسی برای محاسبه تنش برشی استفاده شده است. به هر میزان قطر هیدرولیکی تخلیه کننده تحتانی افزایش یابد به همان اندازه سیال با دبی بیشتری از داخل تخلیه کننده تحتانی جریان می‌یابد، ولی این افزایش دبی همواره به منزله‌ی مناسب بودن عملکرد تخلیه کننده نیست. به طوری که ضریب تخلیه می‌بایست در مقداری مشخص توسط طراحان برای

### جدول ۲- انواع شروط مرزی برای تخلیه کننده تحتانی

سرعت	فشار	حجم سیال (VOF)	مرز
سرعت ثابت	گرادیان صفر	آلفا (Alpha=1)	ورودی
گرادیان صفر	مقدار ثابت	گرادیان صفر	خروجی
مقدار ثابت	گرادیان صفر	گرادیان صفر	کف و دیواره
فشار ورود خروج سرعت	فشار مجموع	ورود خروج	اتمسفر

### انتخاب نوع مش بندی

در این تحقیق شبکه بندی از نوع غیر سازمان یافته می‌باشد. شبکه در اطراف دیواره‌ها به حد کافی ریز شدند تا گرادیان مربوط به سرعت و فشار با دقت بیشتری حل شوند. برای استقلال نتایج از شبکه بندی یک تعداد مش انتخاب گردیده و مدلسازی انجام و مقادیر سرعت و فشار به دست می‌آیند. در ادامه تعداد شبکه بندی افزایش داده و مجدد مقادیر سرعت و فشار به دست می‌آید. بعد از یک تعداد شبکه بندی مقدار سرعت و فشار مسئله تغییر محسوس نمی‌کند که این شبکه بندی، پهنه بوده و نتایج مستقل از شبکه بندی خواهد بود.

### Solid مسئله و نحوه تولید آن

در این تحقیق هندسه مسئله در یک نرم افزار Cad (در این تحقیق از نرم‌افزار سالومه استفاده شده است) ترسیم گردید. تمام مرزهای ورود و خروج جریان به صورت Patch در نظر گرفته شده است. مابقی موارد به صورت مرز دیواره (Wall) بوده و داخل دیواره‌ها دامنه محاسبات محسوب شده است.

### نتایج و بحث

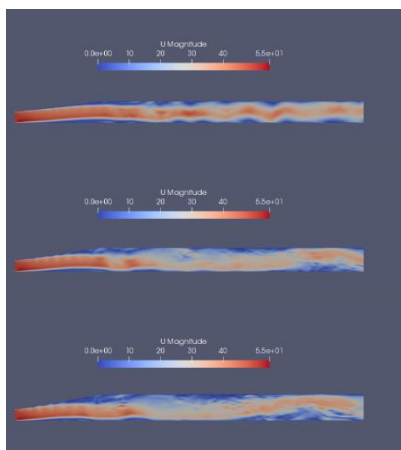
در این تحقیق مدلسازی هیدرولیکی تخلیه کننده تحتانی سد در مقابل تغییرات قطر و طول تخلیه کننده تحتانی انجام گرفت. در جریان این مدل سازی تعداد ۶۰ حالت، با مشخصه‌های مختلف هیدرولیکی و فیزیکی، برای تخلیه کننده تحتانی تهیه شده است. این تعداد حالت به کمک نرم‌افزار OpenFOAM و Salome مدل سازی شده‌اند و برای هر حالت مقادیر ضریب تخلیه بدست آمده‌اند و نتایج در قالب جداول و نمودارهایی ارائه و مقایسه شده است. دبی جرمی گذرنده از تخلیه کننده تحتانی سدها، تابعی از پارامترهای فیزیکی رابطه ۲۶ است:

$$Q = F(A, A_0, g, H, \mu, \rho, H_e, z_c) \quad (26)$$

که در رابطه بالا  $H$  ارتفاع پشت سد،  $A_0$  بیشترین مساحت،  $A$  سطح مقطع خروجی شیر تخلیه کننده،  $H_e$  افت ارتفاع قبل از روی دادن کمترین ارتفاع پشت سد و  $z_c$  نیز ارتفاع برای کمترین سطح مقطع است. با استفاده از تئوری پی باکینگهام می‌توان نوشت (رابطه ۲۷):

$$Q = F\left(\frac{\rho Q}{\mu H}, \frac{Q}{A \sqrt{2g(H - H_e - z_c - H_c)}}, \frac{A}{A_0}, \frac{A_0}{H^2}\right) \quad (27)$$

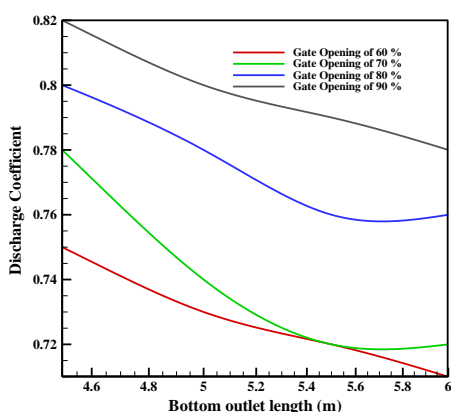
که در رابطه ۱۶  $\frac{A}{A_0}$  میزان بازشدگی شیر،  $\frac{A_0}{H^2}$  نیز مشخصه شیر می‌باشد.  $H_c$  موجود در فرمول بالا نیز ارتفاع ناشی از سرعت سیال در



شکل ۹- تغییرات کانتور سرعت با افزایش قطر هیدرولیکی از بالا به پایین

### تأثیر طول تخلیه‌کننده تحتانی

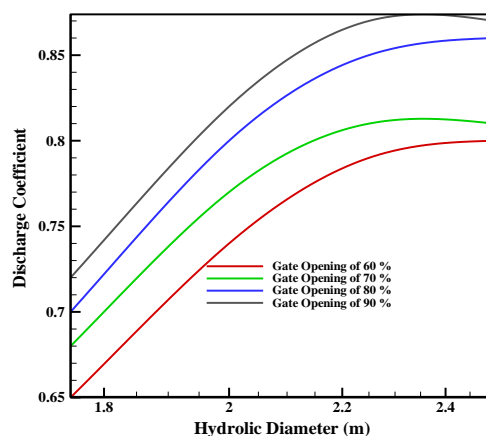
طول تخلیه‌کننده تحتانی سد، یکی از پارامترهای مهم در طراحی آن می‌باشد. با توجه رینولدز بالا در داخل تخلیه‌کننده تحتانی سد، می‌توان دریافت که این طول همواره از طول توسعه یافتگی در داخل لوله‌های کمتر می‌باشد. هر چند در برخی مواقع با ضرایب تخلیه کمتر، طول تخلیه‌کننده تحتانی، از طول توسعه یافتگی بیشتر می‌باشد. با افزایش طول تخلیه‌کننده ضریب تخلیه نیز دچار کاهش نسبی می‌گردد. از طرفی در طراحی‌های هیدرولیکی در داخل تخلیه‌کننده‌ها، ارتفاع پشت سد رابطه مستقیمی با طول تخلیه‌کننده دارد. و بر اساس آن این طول انتخاب می‌گردد. همچنین تنش برشی نیز با افزایش طول تخلیه‌کننده، افزایش ملموسی دارد و این خود دلیل دیگری برای کاهش ضریب تخلیه است. در شکل ۱۰ تغییرات ضریب تخلیه با طول تخلیه‌کننده تحتانی نشان داده شده است. بیانگر این مطلب است که با افزایش طول تخلیه‌کننده، ضریب تخلیه نیز کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۱۰- تغییرات ضریب تخلیه بر حسب انواع طول تخلیه‌کننده تحتانی

در شکل ۱۱ مشاهده می‌گردد که با افزایش طول تخلیه‌کننده تحتانی، توزیع فشار در دهانه شیر کاهش می‌یابد. این کاهش فشار

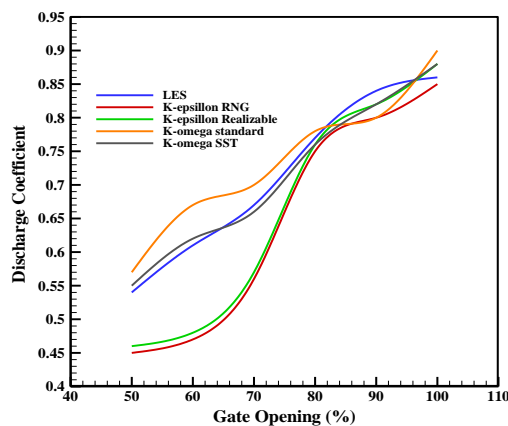
تخلیه‌کننده تحتانی اعمال گردد. تا علاوه بر اینکه میزان رسوبات ته نشین شده به کمترین مقدار خود برسند، از لرزش‌های شدید سدها نیز جلوگیری به عمل آید. تنش برشی از جمله ی این پارامترهاست که می‌بایست مورد توجه قرار بگیرد و رابطه‌ی مناسبی بین قطر هیدرولیکی و تنش برقرار شود. در شکل ۸ تغییرات قطر هیدرولیکی تخلیه‌کننده تحتانی با ضریب تخلیه بر حسب انواع بازشدگی‌ها نشان داده شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود برای میزان بازشدگی ۹۰ درصدی، ضریب تخلیه دارای بیشترین مقدار خود می‌باشد. و با افزایش قطر هیدرولیکی نیز این مقدار افزایش می‌یابد. میزان تغییرات ضریب تخلیه با قطر هیدرولیکی برای بازشدگی ۸۰ و ۹۰ درصدی، نسبت به حالت‌های ۶۰ و ۷۰ درصدی، بیش‌تر است. همچنین از این شکل می‌توان دریافت که ضریب تخلیه بعد از یک مقدار مشخصی از قطر هیدرولیکی ثابت باقی می‌ماند و تغییر چندانی نمی‌کند. لذا می‌توان دریافت که مقدار بهینه ضریب تخلیه برای هر حالت از میزان بازشدگی متفاوت است.



شکل ۸- تغییرات ضریب تخلیه بر حسب انواع قطر هیدرولیکی

در شکل ۹ نیز تغییرات کانتور سرعت برحسب انواع قطرهای هیدرولیکی برای سد کانی سیب را نشان می‌دهد، از این شکل نیز می‌توان دریافت که هسته جت سیال موجود در داخل تخلیه‌کننده‌ی تحتانی سد، با افزایش قطر هیدرولیکی تخلیه‌کننده، نوسان شدیدی می‌گردد یا به نحوی از هم گسسته می‌شود و حالت پیوستگی خود را از دست می‌دهد. این افزایش یا کاهش در سرعت تخلیه‌کننده سد، باعث افزایش تنش برشی نیز می‌گردد.

از مقایسه نتایج شکل ۱۳ نیز می‌توان دریافت که مدل‌های توربولانسی خانواده  $k-\omega$  نتایج قابل قبول‌تری در مدل‌های توربولانسی RANS از خود نشان می‌دهند و ضریب تخلیه را با دقت بیشتری محاسبه می‌نمایند.

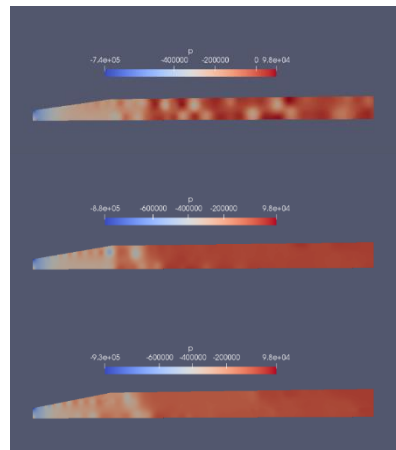


شکل ۱۳- مقایسه انواع مدل‌های توربولانسی با ضریب تخلیه

### نتایج بهینه‌سازی

هنگامی که در مقایسه دو جواب، هیچ یک از دو جواب به ازای تمامی اهداف بهتر از دیگری نباشد، گفته می‌شود که آن دو، جواب‌های نامغلوب هستند. اگر اهداف به یک اندازه اهمیت داشته باشند نمی‌توان گفت کدام یک از این دو جواب به ازای تمامی اهداف بهتر از دیگری است. به مجموعه چنین جواب‌هایی، جواب‌های بهینه پارتو گفته می‌شود. تمام جواب‌های بهینه پارتو در یک مسئله چند هدفه مجموعه بهینه پارتو و بردارهای هدف متناظر با آن، لبه یا جبهه بهینه پارتو نامیده می‌شوند. در اشکال ۱۴ و ۱۵ برای پنج دبی هوادهی تخلیه کننده تحتانی سد کانی سبب مورد بحث در این تحقیق، نحوه‌ی حذف و همگرایی جواب‌های نامغلوب به سمت جبهه‌ی پرتو نشان داده شده است. مقدار هوادهی ۱۶، ۱۸، ۲۰، ۲۲ و ۲۴ متر مکعب بر ساعت برای تخلیه کننده تحتانی مورد بررسی در این تحقیق استفاده شده است. با استفاده همگرایی جبهه‌های پارتو برای هر ضریب تخلیه مورد نظر یک مقدار هوادهی و میزان بازشدگی شیر تخلیه کننده به طور بهینه به دست می‌آید. تمام پارامترهای موجود بر روی خط همگرایی جبهه پارتو بیانگر مقادیر بهینه می‌باشند.

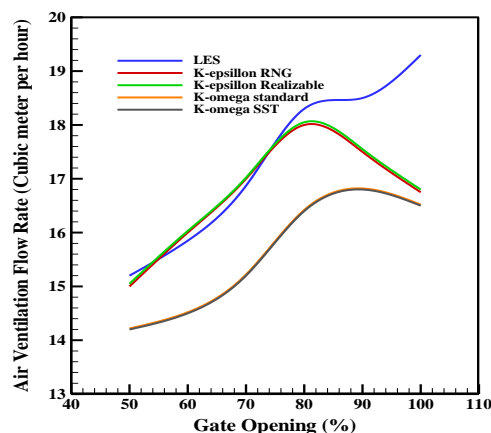
خود می‌تواند باعث بروز کاویتاسیون در داخل تخلیه کننده تحتانی باشد. پدیده کاویتاسیون ناشی از کاهش فشار به زیر اتمسفر و ایجاد حباب در داخل تخلیه کننده‌های تحتانی باشد. که می‌تواند به مرور زمان باعث خوردگی در شیر تخلیه کننده شود و خسارات جبران‌ناپذیری به وجود آورد.



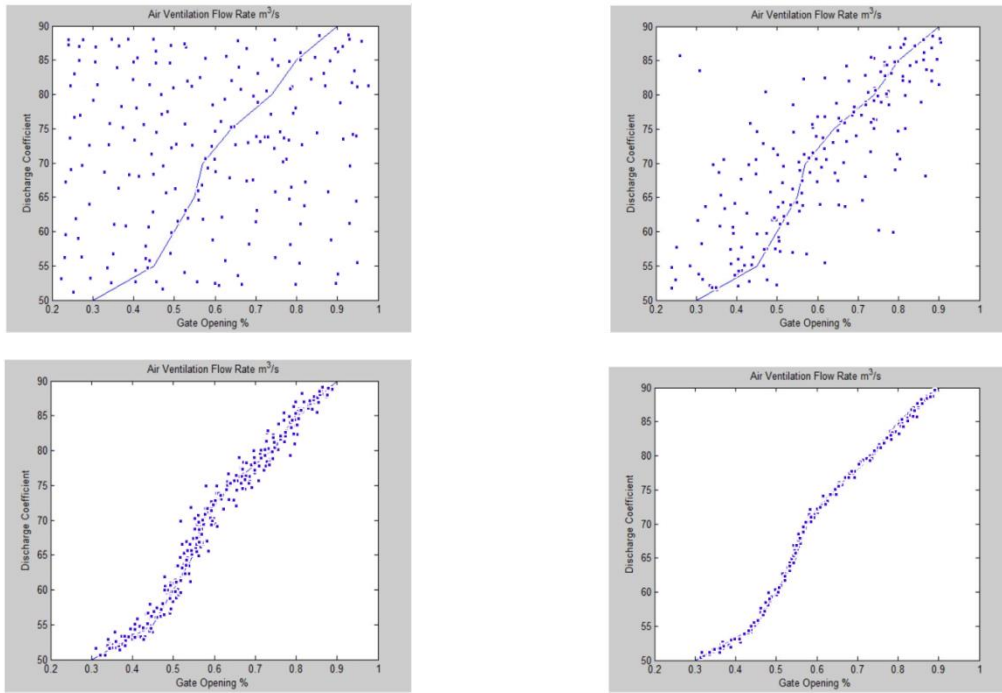
شکل ۱۱- تغییرات کانتور فشار با طول تخلیه کننده

### مقایسه بین مدل‌های توربولانسی

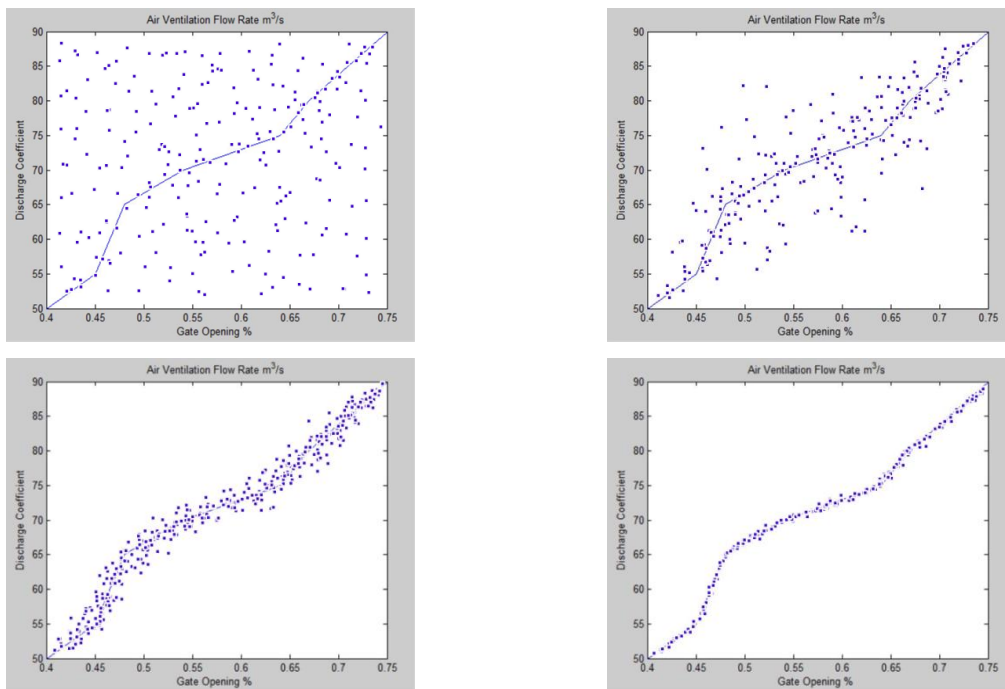
با بررسی شکل می‌توان دریافت که مدل توربولانسی  $k-\omega$  و  $k-\omega SST$  مقدار دبی هوادهی را به خوبی پیش‌بینی می‌کند. معیار مناسب بودن این مدل‌های توربولانسی کار شارما و همکاران، ۱۹۷۶ می‌باشد. به طوریکه میزان هوادهی به تخلیه کننده تحتانی به دست آمده توسط هر دو تحقیق، رفتار یکسانی از خود نشان می‌دهند. درحالی که مدل‌های توربولانسی  $k-\epsilon RNG$  و  $k-\epsilon$  پیش‌بینی تنش برشی نتایج غیر قابل قبولی را از خود نشان داد. شاید یکی از دلایل بهتر بودن نتایج گروه  $k-\omega$  برای کار فعلی، کیفیت کافی Mesh و استفاده از روش گسسته‌سازی محدود شده خطی (LimitedLinearV) می‌باشد.



شکل ۱۲- مقایسه انواع مدل‌های توربولانسی با دبی هوادهی



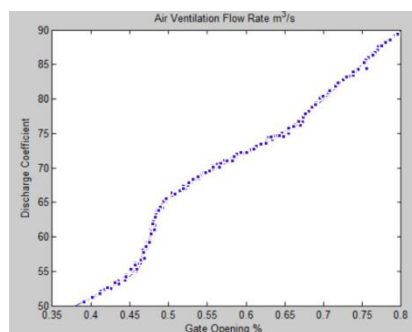
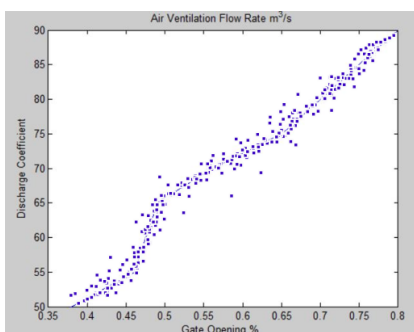
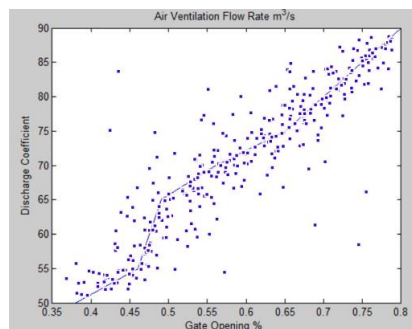
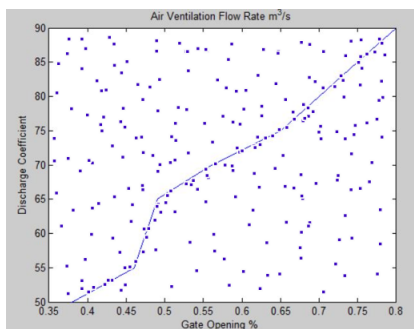
شکل ۱۴- همگرایی جبهه پارتو برای دبی هوادهی ۱۶ متر مکعب بر ساعت



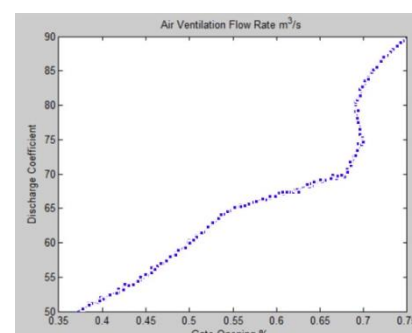
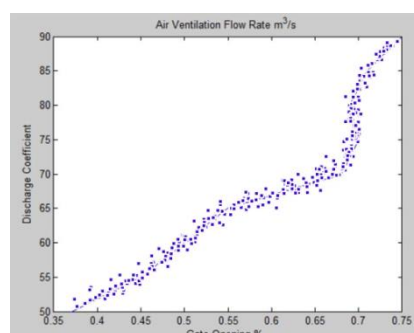
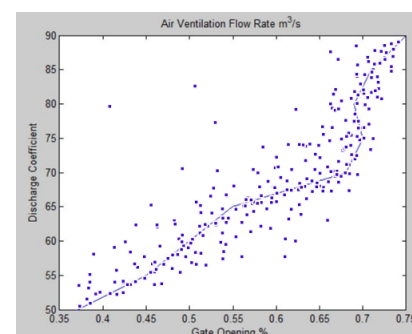
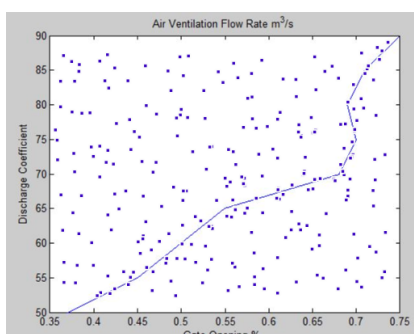
شکل ۱۵- همگرایی جبهه پارتو برای دبی هوادهی ۱۸ متر مکعب بر ساعت

کمینه کردن میزان بازشدگی شیر تخلیه‌کننده بر اساس هر دبی هوادهی به دست آمده است. مناسب‌ترین دبی هوادهی با دبی ۲۰ متر مکعب بر ساعت به دست آمده است (اشکال ۱۵ تا ۱۷).

محدوده ضریب تخلیه در تخلیه‌کننده‌ی تحتانی سد کانی سبب، بین ۰/۴ الی ۰/۷۵ بر اساس مشخصه فیزیکی در نظر گرفته شده است. همچنین با توجه به مقادیر بهینه به دست آمده، ضریب تخلیه بهینه با

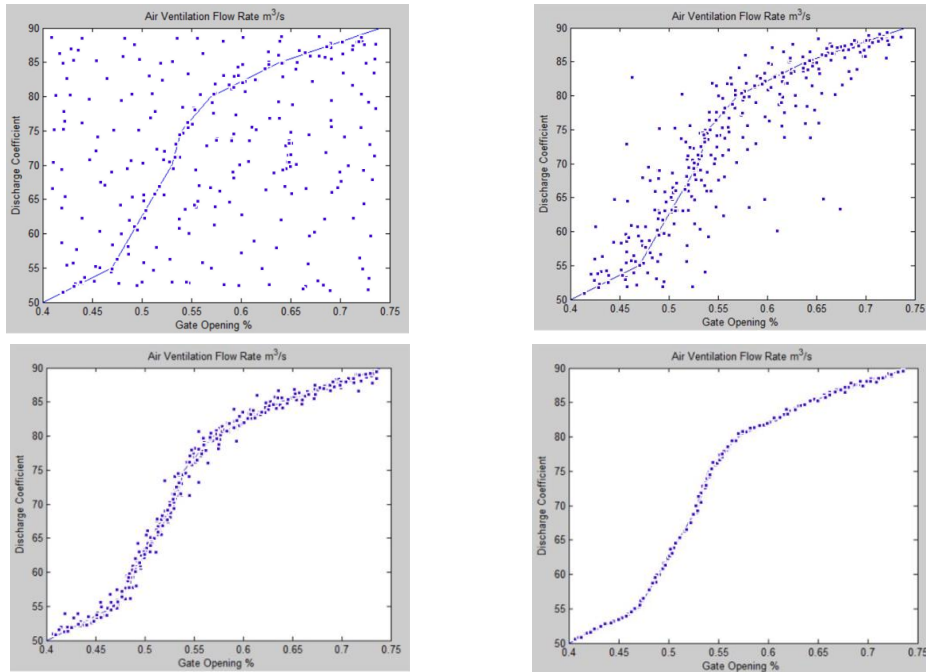


شکل ۱۵- همگرایی جبهه پارتو برای دبی هوادهی ۲۰ متر مکعب بر ساعت



شکل ۱۶- همگرایی جبهه پارتو برای دبی هوادهی ۲۲ متر مکعب بر ساعت





شکل ۱۷- همگرایی جبهه پارتو برای دبی هوادهی ۲۴ متر مکعب بر ساعت

### ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

همکاری مشارکت‌کنندگان در تحقیق حاضر به صورت داوطلبانه و با رضایت آنان بوده است.

### حامی مالی

هزینه تحقیق حاضر توسط نویسندگان مقاله تامین شده است.

### مشارکت نویسندگان

؟؟؟؟

### تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

### نتیجه گیری کلی

در این تحقیق به شبیه‌سازی و بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی جریان آشفته در تخلیه کننده‌های تحتانی سد کانی سیب با استفاده از اپن فوم (FOAM Open) پرداخته شده است. نتایج بر روی پارامترهای تخلیه کننده تحتانی سد کانی سیب صورت گرفته است. و بهینه‌سازی نیز با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام پذیرفته است. خلاصه‌ای از نتایج به دست آمده عبارت‌اند از:

- ۱- با افزایش قطر هیدرولیکی، ضریب تخلیه افزایش می‌یابد.
- ۲- با افزایش قطر هیدرولیکی، هسته‌ی جت سیال آب داخل تخلیه کننده دچار نوسان شدیدی می‌گردد که می‌تواند افزایش تنش برشی را رقم بزند. افزایش بیش از حد تنش برشی از طرفی می‌تواند باعث خوردگی جداره‌های تخلیه کننده گردد. از طرف مقابل با کاهش بیشتر تنش برشی، رسوب‌گذاری در داخل تخلیه کننده تحتانی افزایش می‌یابد.
- ۳- با افزایش طول تخلیه کننده تحتانی، ضریب تخلیه دچار کاهش می‌شود. انتخاب بهینه طول تخلیه کننده تحتانی وابسته به ارتفاع پشت سد می‌باشد.
- ۴- با افزایش میزان بازشدگی، ضریب تخلیه نیز افزایش می‌یابد
- ۵- مدل توربولانسی  $k-\omega$  نتایج قابل قبول تری برای تخمین نتایج به دست می‌دهد.
- ۶- برای هر دبی هوادهی، یک مجموعه مقادیر بهینه برای ضریب تخلیه و میزان بازشدگی به دست آمده است.
- ۷- بهینه‌ترین مقدار هوادهی ۲۰ متر مکعب بر ساعت است. با کمینه کردن میزان بازشدگی و بیشینه نمودن ضریب تخلیه

## References

1. Ghazali, F., Salehi Neishabouri, A.A., and Kavianpour. 2014. Numerical analysis of the effect of channel geometry on flow aeration in the lower discharger of the dam. *Hydroelectric dam and power station journal*, 1(1): 33-39.
2. Zounemat-Kermani, M., Rajaei, T., Ramezani-Charmahineh, A., and Adamowski, J.F. 2017. Estimating the aeration coefficient and air demand in bottom outlet conduits of dams using GEP and decision tree methods. *Flow Measurement and Instrumentation*, 54: 9-19.
3. Xie, Q., Liu, J., Han, B., Li, H., Li, Y., and Li, X. (2019). Experimental and Numerical Investigation of Bottom Outlet Leakage in Earth-Fill Dams. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 33(3), 04019037.
4. Khurshidi, H., Taleb Bidakhti, N., and Nik Sarasht A. H. 2008. Numerical modeling of flow and aeration system in the lower discharger of Sefidroud Dam. *Journal of civil Engineering Islamic Azad university*, 1(2): 37-45.
5. Moghimi, M. 2019. Experimental and numerical investigation of bottom outlet hydraulic model. *Journal of Computational & Applied Research in Mechanical Engineering (JCARME)*, 8(2): 153-164.
6. Kenn, M. J., Garrod, A. D., BALDASSARRINI, M., BINNIE, G., BURGESS, J., PALMER, M., and ACKERS, P. 1981. DISCUSSION. CAVITATION DAMAGE AND THE TARBELA TUNNEL COLLAPSE OF 1974. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 70(4): 779-810.
7. Safavi, K., Zarrati, A. R., and Attari, J. 2008, April. Experimental study of air demand in high head gated tunnels. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management Vol. 161, No.2*: 105-111. Thomas Telford Ltd.
8. Dargahi, B. 2010. Flow characteristics of bottom outlets with moving gates. *Journal of Hydraulic Research*, 48(4): 476-482.
9. Kolachian, R., Abbaspour, A., and Salmasi, F. 2012. Aeration in bottom outlet conduits of dams for prevention of cavitation Aeration in bottom outlet conduits of dams for prevention of cavitation. *Urbanism*, 2(5): 196-201.
10. Yazdi, J., and Zarrati, A.R. 2011. An algorithm for calculating air demand in gated tunnels using a 3D numerical model. *Journal of Hydro-environment Research*, 5(1): 3-13.
11. Daneshmand, F., Adamowski, J., and Liaghat, T. 2014, March. Bottom outlet dam flow: physical and numerical modelling. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management, Vol. 167, No.3*: 176-184. Thomas Telford Ltd.
12. Shamsai, A., Soleymanzadeh, R. 2006. Numerical simulation of Air-Water flow in bottom outlet, *International Journal of Civil Engineering*, 4(1): 14-33.
13. Ghazali, F., Salehi Nishabouri, A.A., and Kavianpour, 2010. Numerical analysis of the effect of channel geometry on flow aeration, M.R.-80 in the dam's lower drain. *The first international conference and the third conference National dam and power plants Blue p. 20th and 19th of Bahman, Tehran, Iran, Tehran*, 62.
14. Najafi, M.R., and Zarrati, A.R. 2010. Numerical simulation of air-water flow in gated tunnels, *Water Management*, 163: 289-295.
15. Mardani, M., Rahimzadeh, H. and Sarkardeh H. 2015. analysis and investigation of the use of blocks in the operation of Houzchek. *8 Madras Mechanical Engineering Scientific-Research Journal*: 15(6): 31-41.
16. Khanarmoui, M. Rahimzadeh, H. and Sarkardeh, H. 2015. Investigating the effect of intake withdrawal direction on critical submergence and strength of vortices. *Modares Mechanical Engineering*, 14(10): 35-42.
17. Roshan, R., Azamathulla, H.M.D., Marosi, M., Sarkardeh, H., Pahlavan, H. and Ghani, A.B. 2010. Hydraulics of Stepped Spillways with Different Numbers of Steps, *Journal of Dams and Reservoirs (ICE)*, 20, 3: 131-136.
18. Khodashenas, S.R., Sarkardeh, H., Marosi, M., and Safavi, K.H. 2010. Vortex Study at

- Orifice Spillways of Karun III Dam, Journal of Dam Engineering, 2:131-142.
19. Rahimzadeh, H., Abdolahpour, M., Roshan, R. and Sarkardeh, H. 2012. Hydraulic Optimization of Flow Over a Gated Spillway, Journal of Dam Engineering, 22(4): 1.
  20. Taghvaei, S.M., Roshan, R., Safavi, K.H., and Sarkardeh, H. 2012. Anti-Vortex Structures at Hydropower Dams, International Journal of the Physical Sciences, 7(28): 5069-5077.
  21. Jorabloo, M., Maghsoodi, R. and Sarkardeh, H. 2011. 3D Simulation of Flow over Flip Buckets at Dams, Journal of American Science, 7(6): 931-936.
  22. Maghsoodi, R., Roozgar, M.S., Chau, K.W. and Sarkardeh, H. 2012. 3D Simulation of Dam Break Flows, Journal of Dam Engineering, 2: 1-17.
  23. Launder, B.E., and Spalding, D.B. 1983. The numerical computation of turbulent flows. In Numerical prediction of flow, heat transfer, turbulence and combustion, pp. 96-116.
  24. Menter, F. 1993. Zonal two equation kw turbulence models for aerodynamic flows. In 23rd fluid dynamics, plasmadynamics, and lasers conference, pp. 2906.
  25. Moukalled, F., Mangani, L., and Darwish, M. 2016. The finite volume method in computational fluid dynamics. An advanced introduction with OpenFoam® and Matlab®. Nueva York: Springer.
  26. Doan, M.N., Alayeto, I.H., Kumazawa, K., and Obi, S. 2019, July. Computational fluid dynamic analysis of a marine hydrokinetic crossflow turbine in low Reynolds number flow. In Fluids Engineering Division Summer Meeting, Vol. 59032: V002T02A067. American Society of Mechanical Engineers.
  27. Tullis, B.P., and Larchar, J. 2011. Determining air demand for small- to medium-sized embankment dam low-level outlet works. Journal of Irrigation and Drain Engineering, 137: 793-800.
  28. Sharma, H.R. 1976. Air-entrainment in high head gated conduits. Journal of Hydraulic Division, 102, 11:1629-1646.