



Comparison of the boundary conditions of inlet velocity and inlet pressure in the simulation of the bottom outlet gate of the dam

Mohamad Masoud Vaseti¹ , Ali Akbar Akhtari^{2✉} , Reza Tarinejad³ 

1.Civil Engineering Dept., Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: mm_vaseti@yahoo.com

2.Corresponding Author, Civil Engineering Dept., Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: akhtari@razi.ac.ir

3.Civil Engineering Dept., Faculty of Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran. E-mail: r_tarinejad@tabrizu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received

2025-11-17

Received in revised form

2026-12-29

Accepted

2026-03-18

Available online

2026-06-22

Keywords:

Inlet boundary conditions,
Velocity boundary condition,
Pressure boundary condition,
Bottom outlet gate,
Computational fluid dynamics,
Fluent,
Volume fraction

ABSTRACT

Nowadays, the use of numerical models has become highly prevalent due to the substantial increase in computer memory capacity and processing speed. The growth in computational power, paralleled by remarkable advancements in numerical models—particularly owing to their cost-effectiveness compared to laboratory models—indicates that numerical modeling and computational simulations will see even wider application in the future. However, commercial numerical models are highly sensitive to boundary and initial conditions; without a proper understanding of the governing physics of these conditions, this invaluable tool can lead to inaccurate and misleading results. This study presents an analytical and numerical comparison between pressure-inlet and velocity-inlet boundary conditions in computational fluid dynamics (CFD) simulations, with a focus on the significant numerical and physical consequences arising from a common yet incorrect choice of inlet boundary condition. For this purpose, a 1/15-scale model of the bottom outlet gate of the Diyaraba Dam (located in Sri Lanka) was employed. Simulations were conducted in ANSYS Fluent software using the standard k-ε turbulence model, corresponding to operating conditions with 10% gate opening. The computational domain mesh size was determined through sensitivity analysis and grid independence studies. To enhance the accuracy of simulating real flow behavior, a two-phase water–air model was utilized. The results reveal that applying a velocity-inlet boundary condition leads to excessively high velocity and pressure fields within the computational domain, resulting in order-of-magnitude discrepancies compared to the physically realistic case. Examination of the mass flow rate in the domain, compared with measurements from the laboratory model, demonstrates that the pressure-inlet boundary condition provides a more physically appropriate representation of the flow. In contrast, the velocity-inlet condition, in this specific model, yields unrealistic and engineering-wise inaccurate results.

Cite this article: Vaseti, Mohamad Masoud., Akhtari, Ali Akbar., & Tarinejad, Reza. (2026). Comparison of the boundary conditions of inlet velocity and inlet pressure in the simulation of the bottom outlet gate of the dam. *Advanced Modeling in Civil Engineering*, 3(1), 1-18.

DOI:10.22126/amcen.2025.13173.1049



© The Author(s).

DOI:10.22126/amcen.2025.13173.1049

Publisher: Razi University

Introduction

The bottom outlet is considered one of the most important components of the dam, which is responsible for the flow management and sediment discharge, so the correct design and modeling of this part can play a significant role in the overall design of the dam structure. Due to the high cost of laboratory models and because all the parameters of a flow field cannot be measured physically, computational fluid dynamics (CFD) is used to investigate the hydraulic behavior. The accuracy of CFD simulations is strongly influenced by the choice of boundary conditions in steady flows and initial conditions in non-steady flows. In fact, by correctly choosing the boundary conditions, the computational domain interacts with the boundaries. Among the various boundary conditions used in CFD, pressure inlet and velocity inlet conditions are two of the most common, each presenting unique advantages and challenges. Choosing the right and effective boundary conditions is one of the most important challenges in numerical modeling. The pressure inlet boundary condition specifies the static pressure at the inlet and allows the calculation of the fluid velocity based on the defined pressure and fluid properties. This approach is particularly beneficial in scenarios where pressure is a critical parameter, such as in compressible flow conditions or when managing specific hydraulic conditions. The boundary condition of certain speed at the inlet applies the speed of the inlet fluid in the numerical model. This condition is used when the flow rate at the inlet boundary is known. These conditions facilitate the initialization process of the model and tend to provide more stability during the simulation. By specifying the velocity profile at the inlet, scenarios where the flow rate is directly controlled or measured can be easily modeled. However, the velocity input conditions may not adequately capture the complex velocity profiles resulting from varying upstream pressures or turbulent flow conditions, or may require a longer length of flow development in the numerical model, increasing the computation volume and increasing the time to convergence. The consequences of choosing a boundary condition go beyond computational efficiency. They can affect predictions about flow rate, pressure within the system, and overall performance metrics of the computational domain. In the studies conducted by Shah et al., it has been shown that changes in the inlet boundary conditions can lead to fundamental differences in the modeled flow patterns in gas-solid systems. In this research, the behavior of the Diabara dam's lower discharge valve model is modeled by applying the boundary conditions of pressure and velocity proportional to the pressure. The results of the numerical model show that the inlet pressure boundary condition leads to more realistic hydraulic responses than the inlet velocity boundary condition.

Method

The present research was conducted using a laboratory model built in the hydraulic laboratory of Tabriz University's Faculty of Civil Engineering. This set-up is the model 1/15 of the bottom outlet gate of the Diabara Dam. Dayaraba Dam is part of the large and multi-purpose Uma Oya project, which is located in the southeast of Sri Lanka with the purpose of transferring water, irrigating fields and generating electricity. In the physical model, the width of the emergency valve is 24 cm and its height is 20 cm. The service valve is a sector type with a width of 24 cm and a height of 22 cm. The total length of the modded setup from the location of the emergency valve to the flow outlet is 2.08 meters. The sector valve is

placed in a fully closed position at a distance between 20 and 28 cm from the emergency valve. The maximum head on the emergency valve at 10% opening of the valve is 2.2 meters. The overall length of the physical model from the emergency valve to the outlet is 2.08 meters with a floor slope of 5%. The results of this research are based on the opening of the service gate equal to 10%. The 2D numerical model was drawn based on the dimensions of the laboratory model in the Design modeler environment and implemented in the Fluent module of the Ansys2024R2 software. Incompressible and two-phase fluid (water and air) is considered. The disturbance model is of standard type. According to the turbulence model, 30 is chosen. Based on this, the height of the first border layer is 1.1 mm. The number of 9 boundary layers is considered. The grid size is selected using sensitivity analysis based on mesh independence. Based on this, the optimal size in the computational domain is equal to 6 m.

Results

The pressure value at the inlet is considered constant pressure in the numerical model due to the constant height of 2.2 meters. the constant inlet velocity scenario, the pressure head equivalent velocity value is considered equal to 6.56 meters per second. By examining the changes of static pressure in the calculation domain in two states of inlet velocity and inlet pressure, it is clear that in the condition of inlet velocity, the pressure in the range increases significantly compared to the condition of inlet pressure. Also, the fluctuations of the pressure before the gate in the condition of the inlet velocity are more than the pressure at the inlet. Also, by examining the velocity distribution profile in the computational domain, it can be seen that the maximum velocity in the boundary condition of the inlet velocity increases about 80 times compared to the pressure inlet condition. Examining the volume fraction of water along the computational domain in two modes of velocity inlet and pressure inlet boundary condition also shows that the volume fraction does not change appreciably before the gate. But downstream of the gate, we see a 1% increase in the volume fraction of water in the case of inlet velocity compared to the inlet pressure. After the flow passes through the area affected by the downstream gate, we see a slight decrease in the water volume fraction in the case of inlet velocity compared to the inlet pressure. The investigation of the turbulent kinetic energy also shows an increase of about 180 times of this parameter in the case of inlet velocity compared to inlet pressure.

Conclusions

In this research, with the aim of comparing the boundary conditions of constant velocity at the inlet and constant pressure at the inlet in the numerical model of the lower discharge valve, a numerical model resulting from the physical model of the valve and the lower discharge channel of the Diabara Dam was prepared after checking the independence and sensitivity of the grid and determining the optimal size of the grid in the computational domain. The numerical model was implemented in two states of constant velocity in the inlet boundary condition and constant pressure in the inlet boundary condition and the results were analyzed. By examining the results, it was found that in the boundary condition of constant speed at the inlet, the maximum pressure in the calculation domain is about 140 times the pressure in the domain compared to the boundary condition of pressure at the inlet.

by examining the results and comparing the mass flow rate in the two aforementioned cases, the boundary condition of the speed at the fixed inlet is not suitable at all in the bottom outlet that have a gate in the middle. This is due to the proximity of the pressure range upstream and downstream of the emergency gate. In fact, the speed in the model with the condition of constant input speed is affected by the energy loss during the unloaded, which is not affected by the simulation in this model, and this issue will lead to the generation of errors. The special point of this review is the control of the continuity relationship in the conditions of running the numerical model, which was addressed from the review of the continuing relationship and mass flow control.

Author Contributions

author participated in writing and revising the article.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.



مقایسه شرایط مرزی سرعت ورودی و فشار ورودی در شبیه‌سازی دریچه تخلیه کننده تحتانی سد

محمد مسعود واسطی^۱، علی اکبر اختری^۲، رضا تازی نژاد^۳

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: mm_vaseti@yahoo.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: akhtari@razi.ac.ir

۳. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: r_tarinejad@tabrizu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۸/۲۶

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۴/۱۰/۰۸

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۱۲/۲۷

تاریخ انتشار:

۱۴۰۵/۱۰/۰۱

کلیدواژه‌ها:

شرایط مرزی ورودی،

شرط مرزی سرعت،

شرط مرزی فشار،

دریچه تخلیه کننده تحتانی،

دینامیک سیالات محاسباتی،

فلوئنت،

نسبت حجمی

امروزه استفاده از مدل‌های عددی به دلیل افزایش قابل توجه حجم حافظه و سرعت رایانه‌ها بسیار پرکاربرد شده است. رشد توان محاسباتی رایانه‌ها و به موازات آن توسعه چشمگیر مدل‌های عددی، به‌ویژه به دلیل کم‌هزینه بودن نسبت به مدل‌های آزمایشگاهی، نشان می‌دهد که در آینده استفاده از مدل‌های عددی و محاسبات نرم با گسترش بیشتری همراه خواهد بود. با این حال، مدل‌های عددی تجاری به‌شدت وابسته به شرایط مرزی و شرایط اولیه هستند و در صورت عدم درک صحیح فیزیک حاکم بر این شرایط، این امکان بی‌بدیل می‌تواند به نتایج نادرست و گمراه‌کننده منجر شود. در این تحقیق، یک مقایسه تحلیلی و عددی بین شرایط مرزی فشار ورودی و سرعت ورودی در شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) ارائه شده است، با تمرکز بر پیامدهای عددی و فیزیکی بسیار بزرگ ناشی از یک انتخاب رایج اما نادرست در تعیین شرط مرزی ورودی. برای این منظور، مدل مقیاس ۱۵/۱ دریچه تخلیه‌کننده تحتانی سد دیارابا (واقع در سریلانکا) مورد استفاده قرار گرفته است. شبیه‌سازی‌ها در محیط نرم‌افزار ANSYS Fluent، با استفاده از مدل آشفتگی استاندارد و مطابق با شرایط بهره‌برداری متناظر با بازشدگی ۱۰ درصدی دریچه انجام شده است. سائز شبکه‌بندی دامنه محاسباتی با استفاده از تحلیل حساسیت و مطالعه استقلال مش تعیین شده و به‌منظور افزایش دقت در شبیه‌سازی رفتار واقعی جریان، از مدل دوفازی آب-هوا استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در صورت اعمال شرط مرزی سرعت در ورودی، میدان سرعت و فشار مقادیر بسیار بالایی را در دامنه محاسباتی نشان می‌دهد، به‌گونه‌ای که اختلاف‌های مرتبه‌بزرگی نسبت به حالت فیزیکی واقعی ایجاد می‌شود. بررسی دبی جرمی جریان در میدان و مقایسه آن با دبی اندازه‌گیری‌شده در مدل آزمایشگاهی نشان می‌دهد که شرط مرزی فشار در ورودی بازنمایی فیزیکی مناسب‌تری از جریان ارائه می‌دهد، در حالی که شرط مرزی سرعت در ورودی، در این مدل خاص، منجر به نتایج غیرواقع‌بینانه و نادرست از دیدگاه مهندسی می‌شود.

استناد: واسطی، محمد مسعود؛ اختری، علی اکبر؛ تازی نژاد، رضا. (۱۴۰۵). مقایسه شرایط مرزی سرعت ورودی و فشار ورودی در شبیه‌سازی دریچه

تخلیه کننده تحتانی سد. *مجله مدل‌سازی پیشرفته در مهندسی عمران*، ۳(۱)، ۱۸-۱.

DOI:10.22126/amcen.2025.13173.1049



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی.

۱. مقدمه

تخلیه کننده تحتانی، یکی از مهم‌ترین اجزا سد محسوب می‌شود که وظیفه مدیریت جریان و تخلیه رسوب را بر عهده دارد، بنابراین طراحی و مدل‌سازی درست این بخش می‌تواند نقش بسزایی در طراحی کلی سازه سد داشته باشد [۱]. به دلیل گرانی مدل‌های آزمایشگاهی و به دلیل آن که تمام پارامترهای یک میدان جریان بطور فیزیکی قابل اندازه‌گیری نیست، جهت بررسی رفتار هیدرولیکی از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD¹) استفاده می‌شود. در واقع CFD به ابزاری ضروری در تحلیل و طراحی سازه‌های هیدرولیکی، به ویژه در شبیه‌سازی جریان سیال از طریق هندسه‌های پیچیده مانند دریچه‌های تخلیه کننده تحتانی تبدیل شده است [۲-۳].

دقت شبیه‌سازی‌های CFD به شدت تحت تاثیر انتخاب شرایط مرزی در جریان‌های دایمی و شرایط اولیه در جریان‌های غیر دایمی است. در واقع با انتخاب صحیح شرایط مرزی دامنه محاسباتی با مرزها اندرکنش پیدا می‌کند. در میان شرایط مرزی مختلف به کار رفته در CFD، شرایط ورودی فشار و سرعت ورودی دو مورد از رایج‌ترین شرایط هستند که هر کدام مزایا و چالش‌های منحصر به فردی را ارائه می‌کنند [۴-۶].

انتخاب شرایط مرزی درست و موثر، یکی از چالش‌های مهم در مدل‌سازی‌های عددی می‌باشد [۷]. شرایط مرزی ورودی فشار، فشار استاتیکی در ورودی را مشخص می‌کند و امکان محاسبه سرعت سیال را بر اساس فشار تعریف شده و خواص سیال فراهم می‌کند. این رویکرد به ویژه در سناریوهایی که فشار یک پارامتر حیاتی است، مانند شرایط جریان تراکم پذیر یا هنگام مدیریت شرایط هیدرولیکی خاص، سودمند است. توانایی کنترل مستقیم فشار ورودی می‌تواند به نمایش دقیق تری از رفتار جریان در سیستم منجر شود. هر گونه خطا در فشار مشخص شده می‌تواند از طریق شبیه‌سازی منتشر شده و منجر به انحراف قابل توجهی از الگوهای جریان مورد انتظار و معیارهای عملکرد شود [۸-۹].

شرایط مرزی سرعت معین در ورودی، سرعت سیال ورودی را در مدل عددی اعمال می‌نماید. از این شرط در مواقعی که نرخ جریان

در مرز ورودی مشخص باشد استفاده می‌شود. این شرایط فرآیند شروع اولیه مدل را تسهیل نموده و تمایل به ارائه پایداری بیشتر در طول شبیه‌سازی دارد. با تعیین مشخصات سرعت در ورودی، می‌توان سناریوهایی را که در آن نرخ جریان مستقیماً کنترل یا اندازه‌گیری می‌شود را براحتی مدل نمود. با این وجود، شرایط ورودی سرعت ممکن است به اندازه کافی پروفیل‌های سرعت پیچیده را که از فشارهای بالادست متغیر یا شرایط جریان آشفته ناشی می‌شوند، ثبت نکنند یا به طول بیشتری جهت توسعه یافتگی جریان در مدل عددی نیاز باشد که افزایش طول حجم محاسبات را بالا برده و زمان رسیدن به همگرایی را افزایش می‌دهد [۳].

پيامدهای انتخاب یک شرط مرزی فراتر از کارایی محاسباتی است. آن‌ها می‌توانند بر پیش بینی‌های مربوط به نرخ جریان، فشار درون سیستم و معیارهای عملکرد کلی دامنه محاسباتی تأثیر بگذارند. در مطالعات انجام شده توسط شاه و همکاران نشان داده شده که تغییرات در شرایط مرزی ورودی می‌تواند منجر به تفاوت‌های اساسی در الگوهای جریان مدل شده در سیستم‌های گاز-جامد شود [۱۰].

غزالی و همکاران به بررسی تأثیر تغییر ابعاد مجرا بر خصوصیات هیدرولیکی جریان در تخلیه کننده تحتانی سد جگین به صورت عددی پرداختند و نتایج آن با مقادیر اندازه‌گیری شده از مدل آزمایشگاهی مقایسه شد. به منظور حفاظت درمقابل پدیده کاویتاسیون، دو هواده بلافاصله در پایین دست دریچه‌های سرویس و اضطراری پیش بینی شده است. بیشینه ارتفاع آب در پشت تخلیه کننده ۳۸/۶ متر بوده که در این پژوهش نیز همین میزان بار آبی استفاده شده است. مدل عددی در حالت ۷۰ درصد بازشدگی دریچه اضطراری و ۱۰۰ درصد بازشدگی دریچه سرویس با حذف مجرای پایین دست از مدل به علت اهمیت مجرای بالادست، در نرم افزار گمبیت شبیه‌سازی شد. برای مرز ورودی از شرط فشار معلوم استفاده شده است به گونه‌ای که هد همواره برقرار باشد. در مرز ورود هواده و خروجی مجرا شرط فشار صفر وجود دارد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش عمق و عرض مجرا، نرخ جریان ورودی و میزان هواده‌ی جریان افزایش می‌یابد [۱۱].

¹ Computational fluid dynamics

فشار اتمسفریک در تمام طول تونل تخلیه کننده تحتانی اعمال گردید. نتایج نشان داد نیروهای وارده بر دریچه قادر به تخریب دریچه نخواهد شد [۱].

همانگونه که ملاحظه شد شروط مرزی فشار و سرعت در مطالعات دریچه تخلیه کننده تحتانی استفاده شده است. در هیچ یک از مطالعات انجام شده تاثیر شرایط مرزی سرعت و فشار بر نتایج نهایی و رفتار مدل عددی ارائه نشده است. در این تحقیق با اعمال شرایط مرزی فشار و سرعت متناسب با فشار، رفتار مدل دریچه تخلیه کننده تحتانی سد دیابارا مدل می‌شود. نتایج حاصل از مدل عددی نشان می‌دهد، شرط مرزی فشار در ورودی منجر به پاسخهای هیدرولیکی واقعی تری نسبت به شرط مرزی سرعت در ورودی می‌شود.

۲. مشخصات مدل فیزیکی مورد استفاده

تحقیق حاضر با استفاده از مدل آزمایشگاهی ساخته شده در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده عمران دانشگاه تبریز انجام شده است. این ست آپ، مدل ۱/۱۵ تخلیه کننده تحتانی سد دیابارا می‌باشد. سد دیابارا (Dayaraba) قسمتی از پروژه بزرگ و چند منظوره اوما اويا (Uma Oya) است که با هدف انتقال آب، آبیاری مزارع و تولید برق در جنوب شرقی کشور سریلانکا واقع شده است. کل جریان عبوری از دریچه در حداکثر هد روی دریچه (۴۵ متر) برابر ۱۸۰ میلیون متر مکعب می‌باشد. در شکل ۱. نمایی از دریچه تخلیه کننده تحتانی ارائه شده است. در مدل فیزیکی عرض دریچه اضطراری ۲۴ سانتی‌متر و ارتفاع آن ۲۰ سانتی‌متر است. دریچه سرویس از نوع قطاعی با عرض ۲۴ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۲ سانتی‌متر است. طول کلی ست آپ مد شده از محل دریچه اضطراری تا خروجی جریان، ۲۰۸ متر است. دریچه قطاعی در حالت کاملاً بسته در فاصله بین ۲۰ تا ۲۸ سانتی‌متر نسبت به دریچه اضطراری قرار می‌گیرد. حداکثر هد روی دریچه اضطراری در باز شدگی ۱۰٪ دریچه ۲/۲ متر است. طول کلی مدل فیزیکی از دریچه اضطراری تا خرجی ۲/۰۸ متر با شیب کف ۵٪ است. چنانچه گام‌های بازشدگی ۱۰٪ باشد، باز شدگی ۱۰٪ منجر به ایجاد بیشترین سرعت در زیر دریچه می‌شود. بنابراین این بازشدگی به عنوان بحرانی‌ترین حالت

استوکوسکی و همکاران مدل عددی دریچه تخلیه کننده تحتانی سد راما در بوسنی و هرزگوین را در فلوئنت مدل نمودند. ارتفاع، عمق و دهنه دریچه مورد مطالعه بترتیب ۴/۳، ۳/۳ و ۰/۷ متر می‌باشد. آن‌ها مدل دو فازی آب و هوا (VOF^2) با کمک شرط مرزی فشار در ورودی و فشار اتمسفریک در خروجی استفاده کردند در این تحقیق نرخ دبی تخلیه در ترازهای مختلف مخزن و نیروهای هیدرودینامیکی در مدل عددی و مشاهدات و اندازه‌گیری‌های در محل سد با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج تطابق قابل قبولی با هم داشتند [۱۲].

هادیان و همکاران نیز به بررسی شرایط مرزی ورودی در شبیه‌سازی جریان‌های با سطح آزاد پرداختند. آن‌ها مدل‌سازی را در محیط نرم افزار OpenFOAM و با استفاده از مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ realizable و روش VOF انجام دادند. ست آپ آزمایشگاهی یک کانال مستقیم با مقطع مستطیلی شکل، شیب کف صفر، طول ۵۱ متر، عرض ۳ متر، ارتفاع ۱ متر بود. ضریب زبری مانینگ ۰/۰۱۱۴ و دبی ورودی ۳ متر مکعب بر ثانیه در نظر گرفته شد. نتایج مدل و داده‌های آزمایشگاهی همبستگی خوبی با یکدیگر داشتند [۱۳].

نجفی و همکاران با هدف مشخص نمودن منحنی دبی خروجی از دریچه، دبی هوا و مشخصات هیدرولیکی در بالادست و پایین دست دریچه تخلیه کننده تحتانی مطالعاتی را روی مدل عددی و ست آزمایشگاهی ۱:۱۷ سازه اصلی در مرکز تحقیقات آب در تهران، انجام دادند. مدل عددی دو بعدی و سه بعدی در محیط نرم افزار Fluent با استفاده از مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ و روش VOF و در بازشدگی‌های مختلف دریچه ساخته شد. برای این منظور ۷۰ متر بالادست و ۱۱۰ متر پایین دست دریچه مدل گردید. نتایج مدل و آزمایشگاه تطابق قابل قبولی داشتند [۱۴].

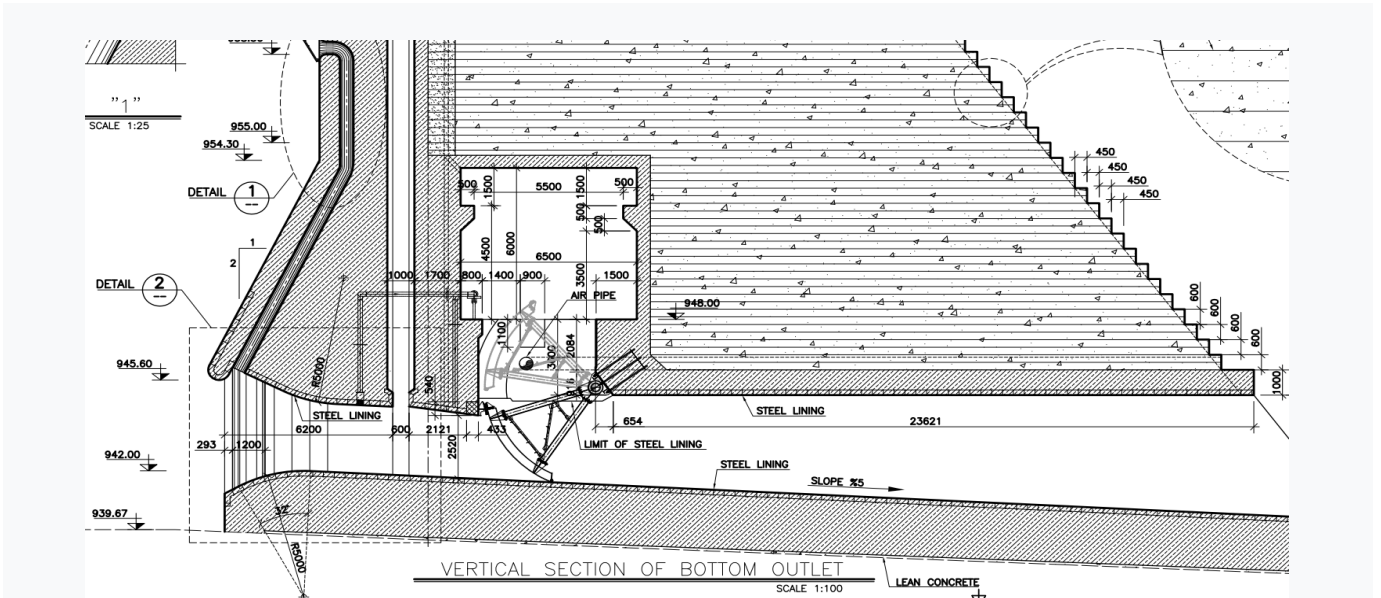
محد رزوی و همکاران با هدف بررسی رفتار متقابل سازه-سیال (FSI^3) در دریچه تخلیه کننده تحتانی سد چندوره، مدل عددی با مقیاس واقعی در محیط نرم افزار Fluent را تحلیل نمودند. آن‌ها از شرط مرزی سرعت در ورودی و با مقدار ثابت ۱ متر در ثانیه استفاده نمودند. شرط مرزی خروجی فشار اتمسفریک بود. شرط

² Volume of fraction

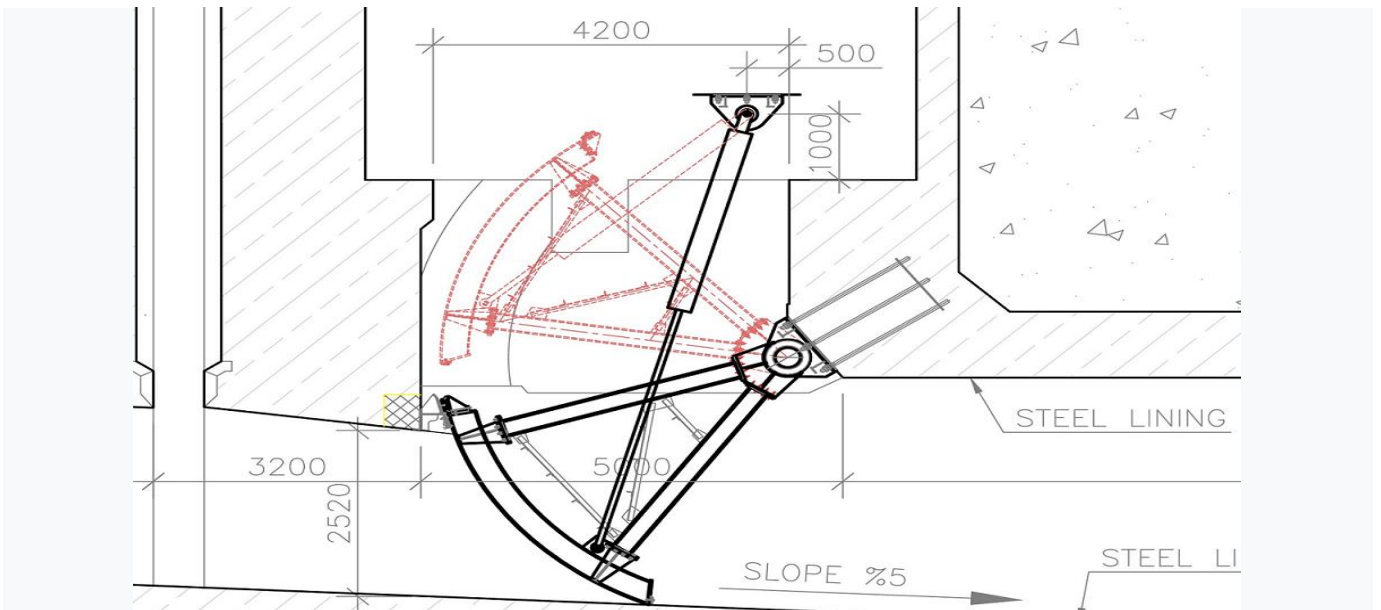
³ Flued-Structure interaction

کل جریان عبوری از دریچه در حداکثر هد روی دریچه (۴۵ متر) برابر ۱۸۰ میلیون متر مکعب می‌باشد. در شکل ۱ نمایی از دریچه تخلیه کننده تحتانی ارائه شده است.

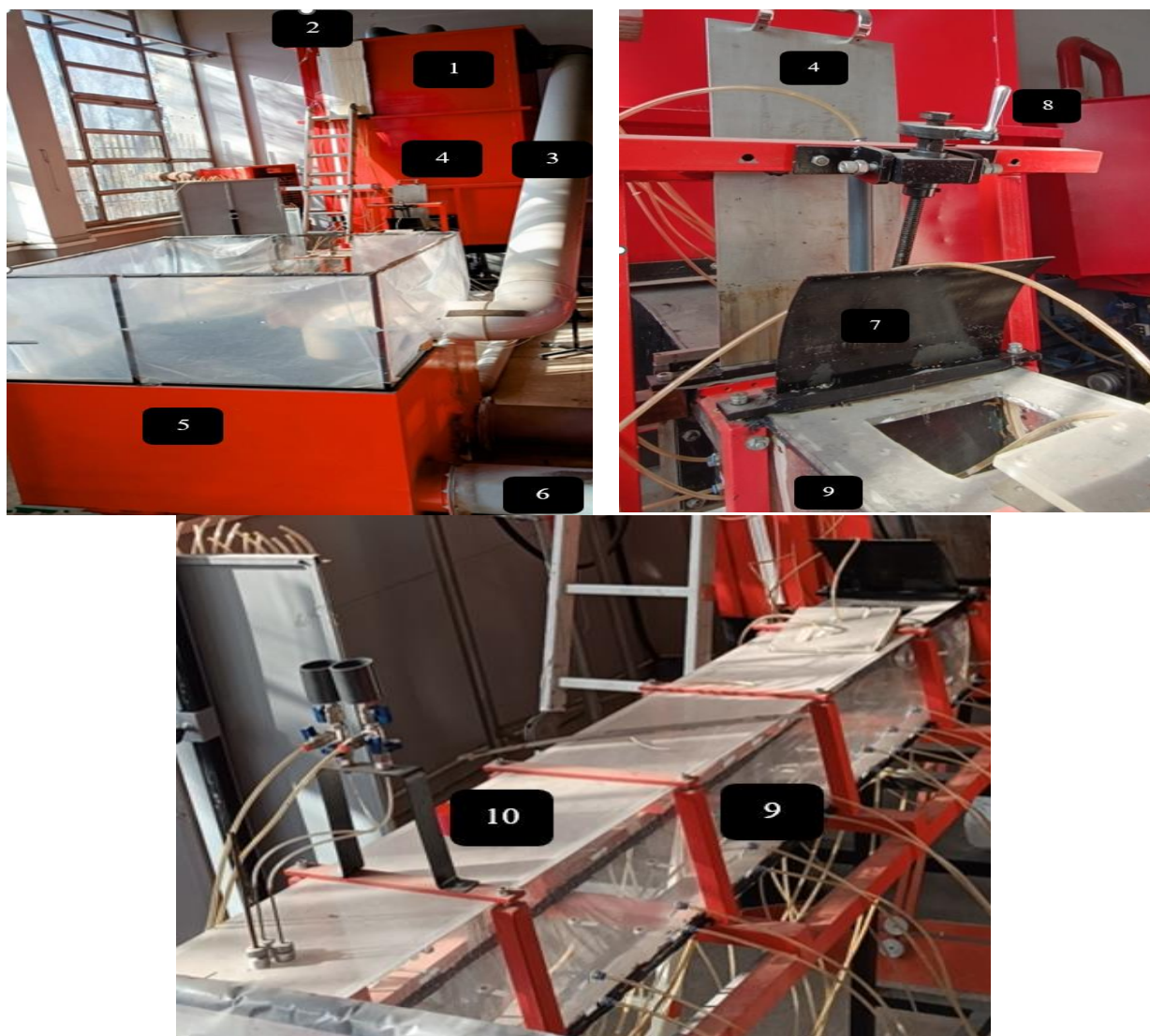
در نظر گرفته شده و تحقیق حاضر بر روی این مقدار از بازشدگی انجام شده است. با اعمال مخزن فشار ورودی، ارتفاع آب برابر ۲/۲ متر ثابت باقی خواهد ماند. در شکل ۲ قسمت‌های مختلف مدل فیزیکی نشان داده شده است.



الف. برشی طولی از دهانه ورودی تونل تا خروجی (شامل دریچه اضطراری و سرویس)



ب. مقطع بین دریچه اضطراری و دریچه سرویس و تکیه‌گاه آن
شکل ۱. دریچه اضطراری و دریچه تخلیه کننده سد اوما اوپا



شکل ۲. مدل فیزیکی دریچه تخلیه کننده تحتانی

شرح قسمت‌های نشان داده شده در شکل ۲ عبارتند از:

- ۱ مخزن تامین هد (شبیه‌سازی مخزن سد)
- ۲ لوله‌های تامین آب مخزن تامین هد
- ۳ سرریز آب مخزن تامین هد
- ۴ دریچه اضطراری
- ۵ مخزن مکش سیستم تحت فشار
- ۶ لوله مکش سیستم تحت فشار
- ۷ دریچه سرویس

- ۸ چرخ دستی کنترل باز شدگی دریچه سرویس
- ۹ مجرای تخلیه کننده تحتانی
- ۱۰ لوله پرستو نصب شده روی مجرای تخلیه کننده تحتانی
از لوله پرستو که در فاصله ۰/۴۵ نسبت به انتهای کانال تخلیه
کننده نصب شده است، جهت اندازه‌گیری دبی آب در مجرا استفاده
می‌شود.

Fluent نرم افزار Ansys2024R2 فراخوانی می‌شود. سیال تراکم ناپذیر و دو فاز (آب و هوا) در نظر گرفته شده است. مدل آشفتگی از نوع $k-\epsilon$ استاندارد می‌باشد. γ^+ با توجه به مدل آشفتگی برابر ۳۰ انتخاب شده است. بر این اساس ارتفاع اولین لایه مرزی ۱/۱ میلی‌متر می‌باشد. تعداد ۹ لایه مرزی در نظر گرفته شده است. سائز شبکه‌بندی با استفاده از آنالیز حساسیت بر مبنای استقلال مش انتخاب شده است. برای این منظور سناریوهای مختلف شبکه‌بندی دارای ساختار (Structure) مطابق جدول ۱ زیر تعریف شده است. مشخصه هیدرولیکی جهت بررسی استقلال مش مقدار سرعت در طول خطی می‌باشد که سراسر دامنه محاسباتی را طی کرده و از مرکز بازشدگی ۱۰٪ دریچه سرویس عبور نماید.

جدول ۱. سائز، تعداد المان و گره در سناریوهای مختلف شبکه‌بندی

| تعداد گره | تعداد المان | سائز مش در دامنه (میلیمتر) |
|-----------|-------------|----------------------------|
| ۳۴۱۴۱ | ۳۳۵۴۳ | ۴ |
| ۱۵۲۸۸ | ۱۴۸۸۳ | ۶ |
| ۸۷۲۰ | ۸۴۱۳ | ۸ |
| ۵۶۴۰ | ۵۳۹۵ | ۱۰ |
| ۳۶۸۶ | ۳۴۸۸ | ۱۲/۵ |

در شکل ۵ پروفیل توزیع سرعت در سناریوهای مختلف مش و در طول دامنه محاسباتی ترسیم شده است. همانگونه که در شکل دیده می‌شود در تمام سناریوها در حوالی قبل و بعد از دریچه الگوی سرعت در تمام سناریوها بر هم انطباق دارد. اما در ناحیه پس از دریچه، مشاهده می‌شود که شبکه با مش ۶ میلی‌متر رفتار مستقل تری را از خود نشان می‌دهد. در این تحقیق فاصله ۰ تا ۲۰ سانتی‌متر به عنوان قبل از دریچه، ۲۰ تا ۸۰ سانتی‌متر زیر دریچه و از ۸۰ تا انتهای مسیر بعد از دریچه فرض شده است. برای نمایش بهتر این موضوع و نیز قضاوت تا فاصله ۰/۴ متر، منحنی‌های سرعت در سه ناحیه قبل از دریچه، زیر دریچه و بعد از دریچه ترسیم شده است.

۳. معادلات حاکم بر جریان

معادلات حاکم بر جریان ذیلا ارائه شده است [۱۵].

$$\rho = \sum_{i=1}^n \rho_i c_i \quad (۱)$$

$$\mu = \sum_{i=1}^n \mu_i c_i \quad (۲)$$

$$c_i = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (۳)$$

$$c_n = 1 - \sum_{i=1}^{n-1} c_i \quad \sum_{i=1}^n c_i = 1 \quad (۴)$$

$$\frac{Dc_i}{Dt} = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial c_i}{\partial t} + v \cdot \nabla c_i = 0 \quad i = 1, \dots, n-1 \quad (۵)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho v) = 0 \quad (۶)$$

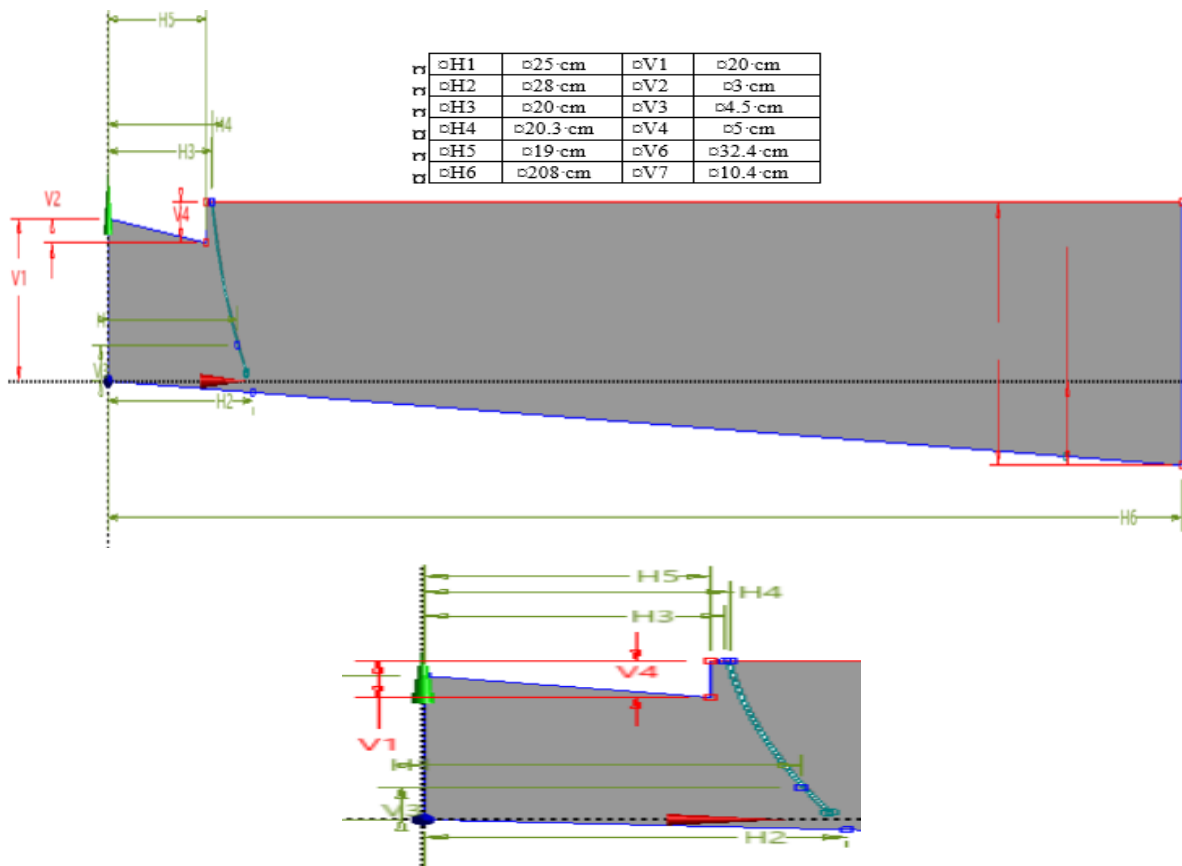
$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \text{div}(\rho u_i v) = -(\nabla p)_i + \text{div}(\sigma_i) + \rho g_i \quad i = 1, 2, 3 \quad (۷)$$

در این معادلات:

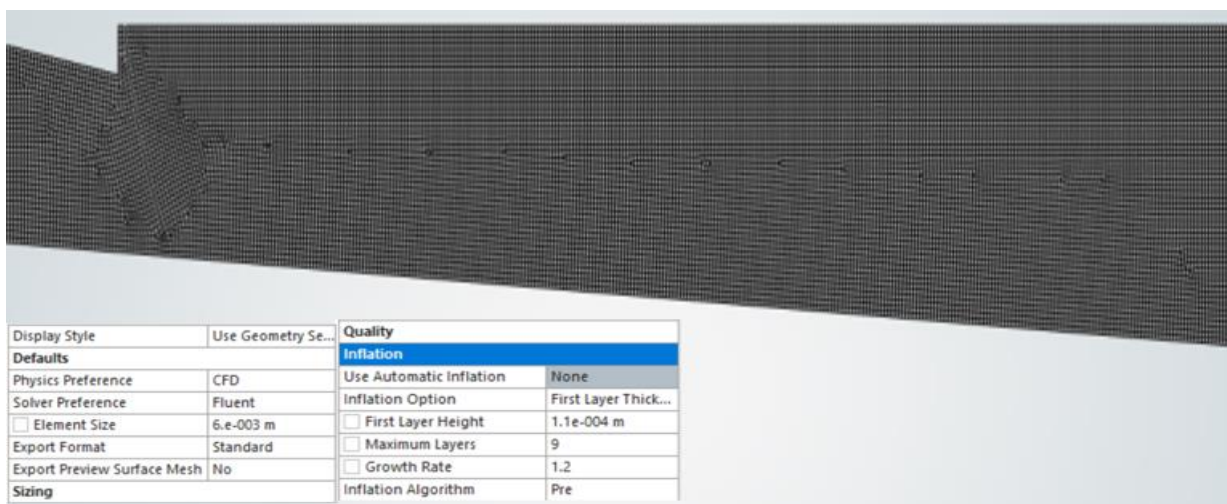
| | |
|----------|--|
| ρ | چگالی |
| μ | ویسکوزیته |
| C | نسبت حجمی (عددی بدون بعد و بین ۰ تا ۱) |
| V | حجم |
| n | تعداد فاز در دامنه محاسباتی |
| v | سرعت |
| p | فشار |
| u_i | i امین مولفه v |
| σ | جزء ویسکوز تانسور تنش |

۴. مدل عددی

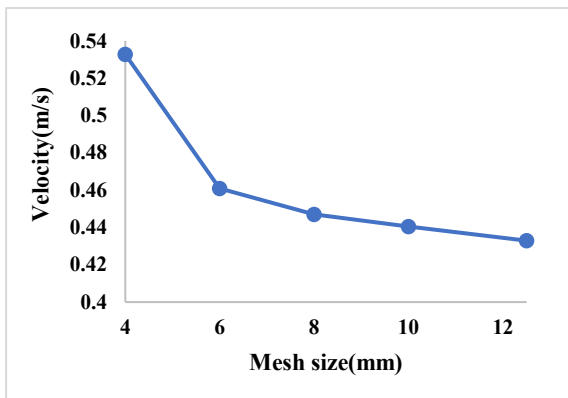
مدل عددی ۲ بعدی بر اساس ابعاد مدل آزمایشگاهی و در محیط Design modeler ترسیم شده است. در شکل ۳ هندسه دو بعدی مدل عددی نمایش داده شده است. ارتفاع کلی مجرا در مرز خروجی ۳۲/۴ سانتی‌متر و اختلاف ارتفاع آن نسبت به مبدا مختصات ۱۰/۴ سانتی‌متر است. این هندسه در محیط مازول



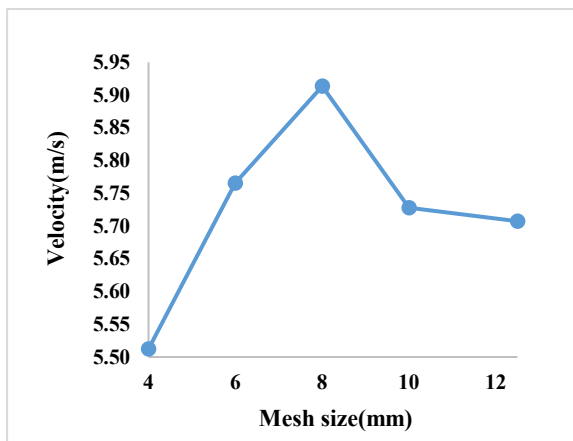
شکل ۳. هندسه مدل عددی دریچه تخلیه کننده تحتانی



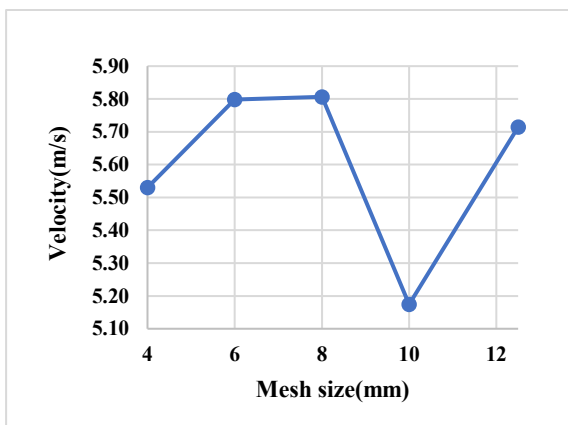
شکل ۴. دامنه شبکه‌بندی شده به همراه مشخصات مش



الف. قبل از دریچه



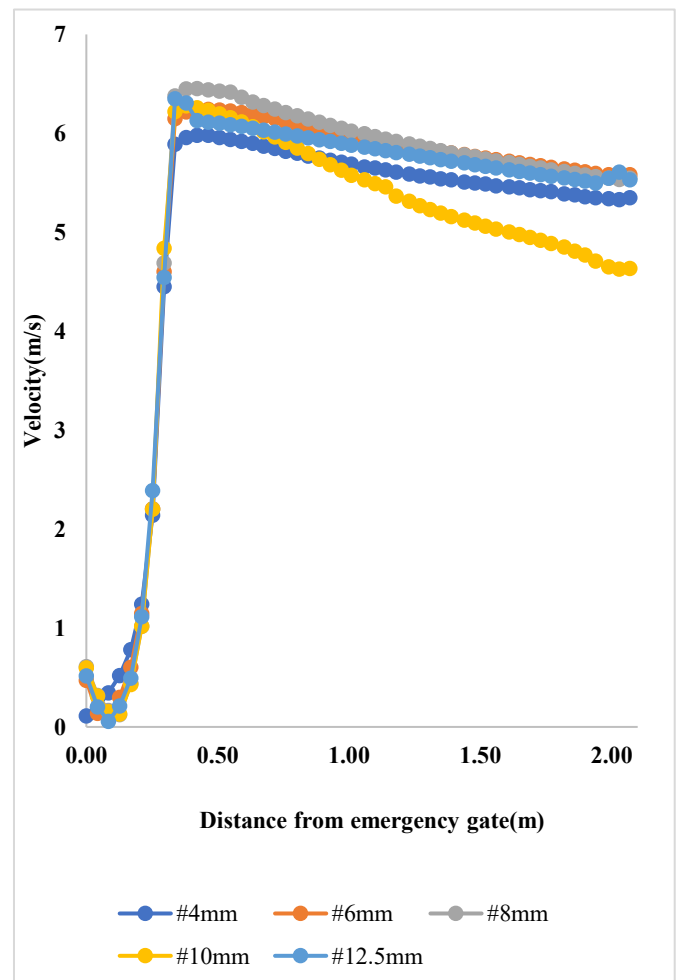
ب. زیر دریچه



ج. بعد از دریچه

شکل ۶. تغییر سرعت طولی در برابر اندازه شبکه‌بندی

این مطلب در شکل ۶ نشان داده شده است. لازم بذکر است که در دسته‌بندی با فواصل غیر از این نیز، تغییری در نتیجه ایجاد نمی‌شود. بر این، حداقل سایز در تمام دامنه محاسباتی ۶ میلی‌متر بدست می‌آید. بنابراین مدل عددی بر اساس این سایز شبکه‌بندی می‌شود. در شکل ۴ دامنه شبکه‌بندی شده با سایز مستقل از مش به همراه تعداد لایه‌ها متورم^۴ و ضخامت لایه اولین لایه نشان داده شده است.



شکل ۵. مقدار سرعت طولی در طول لوله

⁴ Inflation

۵. نتایج تحقیق و تحلیل آن‌ها

در ابتدا فرض می‌شود دریچه اضطراری (شروع دامنه محاسباتی) بسته و فضای مدل توسط هوا پر شده است. دریچه اضطراری باز شده و جریان با کسر حجمی آب برابر یک (هوایی وجود ندارد) وارد دامنه محاسباتی می‌شود که با عملکرد مدل فیزیکی انطباق کامل دارد. دریچه قطاعی در ۱۰٪ بازشدگی خود قرار دارد. حال با دو سناریوی کاملاً مجزا در حالت فشار در ورودی و سرعت در ورودی مدل عددی آماده و اجرا می‌گردد.

قبل از اجرا مدل می‌بایست ذکر شود که اعمال شرط مرزی سرعت مبتنی بر رابطه برنولی در مقطعی که جریان تحت فشار قابل توجه قرار دارد، از نظر فیزیکی دقیق نیست، زیرا این رابطه تنها برای جریان‌های با فشار اتمسفریک معتبر است [۱۶-۱۷]. در پژوهش حاضر، دامنه محاسباتی از مقطع دریچه کشویی آغاز می‌شود، نه از مخزن آزاد؛ مقطعی که در شرایط واقعی تحت فشار قابل توجه قرار دارد و فشار آن برابر فشار اتمسفریک نیست. این موضوع از ابتدای کار مورد توجه بوده است.

هدف این تحقیق، بررسی درستی یا نادرستی رابطه برنولی یا مقایسه شرط مرزی فشار و سرعت نبوده است، بلکه تمرکز اصلی بر تبیین پیامدهای عددی و فیزیکی بسیار بزرگ ناشی از یک اشتباه رایج در انتخاب شرط مرزی ورودی در شبیه‌سازی‌های CFD است؛ اشتباهی که اگرچه در ادبیات به آن اشاره شده، اما به‌ندرت به‌صورت کمی و مقایسه‌ای گزارش شده است. در شبیه‌سازی‌های CFD، اعمال شرط مرزی سرعت در ورودی دامنه یکی از رایج‌ترین انتخاب‌هاست. در نرم‌افزار ANSYS Fluent، مقداردهی اولیه میدان جریان نیز به‌طور پیش‌فرض بر مبنای وجود سرعت مشخص در ورودی انجام می‌شود، بدون آنکه فیزیک دقیق فشار در آن مقطع الزاماً لحاظ شود [۱۸]. با این حال، ادبیات نشان می‌دهد که نوع و محل اعمال شرایط مرزی می‌تواند به‌طور معناداری بر نتایج عددی اثرگذار باشد، هرچند این اثر غالباً به‌صورت کیفی یا موضعی گزارش شده است [۱۹-۲۰].

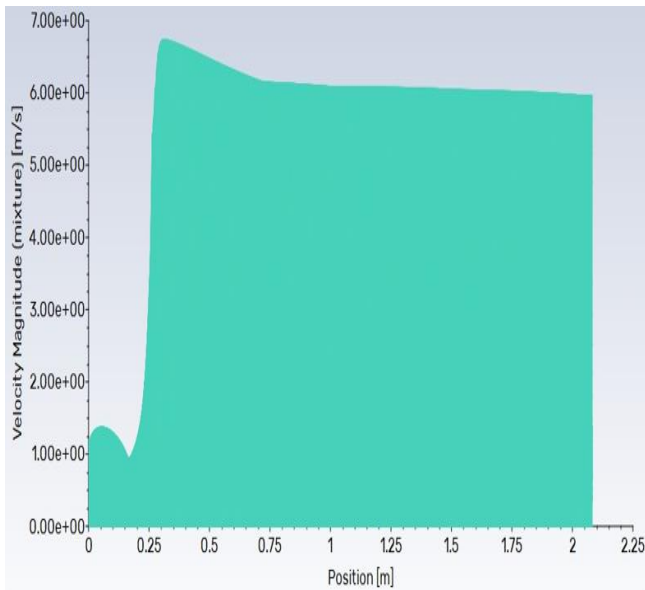
مطالعات مختلفی به حساسیت نتایج CFD نسبت به شرایط مرزی پرداخته‌اند [۲۱-۲۳]، اما آنچه به‌طور صریح گزارش نشده، این واقعیت است که یک انتخاب بسیار رایج و ظاهراً معقول، یعنی شرط مرزی سرعت، اگر تنها چند ده سانتی‌متر بالاتر از محل فیزیکی

مناسب اعمال شود، می‌تواند منجر به اختلاف‌های مرتبه‌بزرگی در نتایج شود. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که اعمال سرعت ورودی در مقطعی حدود ۲۰ سانتی‌متر بالاتر از محل مناسب، می‌تواند به اختلاف‌هایی در حدود یک مرتبه بزرگی در سرعت و بیش از دو مرتبه بزرگی در فشار منجر شود. بر این اساس، مسئله اصلی صرفاً درست یا نادرست بودن یک فرض مرزی نیست، بلکه بزرگی پیامدهای ناشی از یک انتخاب نادرست اما متداول در تعیین شرط مرزی ورودی است؛ موضوعی که در مطالعات پیشین به‌صورت عددی و مقایسه‌ای با اختلاف‌های مرتبه‌بزرگ گزارش نشده است. مقدار فشار در ورودی با توجه به ارتفاع ثابت ۲/۲ متر در مدل عددی، فشار ثابت لحاظ می‌گردد. برای سناریوی سرعت ورودی ثابت، مقدار سرعت معادل هد فشار نیز برابر با ۶/۵۶ متر در ثانیه در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۶ تغییرات فشار استاتیک در دو حالت سرعت در ورودی و فشار در ورودی دیده می‌شود. همانگونه که مشاهده می‌شود در شرایط سرعت در ورودی فشار در سیستم افزایش چشم‌گیری نسبت به فشار در شرایط فشار در ورودی دارد. همچنین نوسان فشار قبل از دریچه در حالت الف بیش از حالت ب است. مشاهده می‌شود که تفاوت در انتخاب شرط مرزی، منجر به اختلاف فشاری در حدود ۱۴۰ برابر می‌شود. قطعاً این اختلاف قابل پیش‌بینی نبود. در شکل ۷ تغییرات سرعت جریان در طول تخلیه‌کننده آورده شده است. مشاهده می‌شود که تغییر در شرط ورودی بر توزیع طولی سرعت جریان و مقدار سرعت طولی بسیار تاثیر گذار است. این اختلاف به هیچ‌عنوان قابل اغماض نیست. افزایش حدود ۱۰ برابری در سرعت حداکثر در میدان تنها به واسطه شرط مرزی سرعت یا فشار می‌تواند تمام محاسبات را در صورت انتخاب شرط مرزی نادرست زیر سوال ببرد.

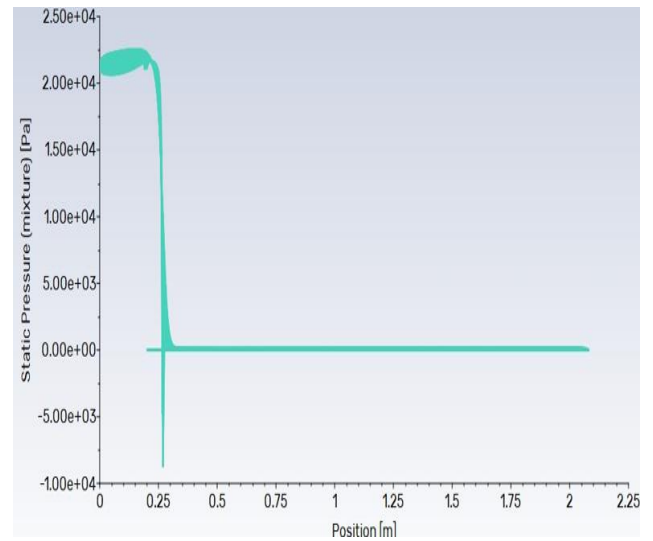
در شکل‌های ۸ و ۹ بترتیب نسبت مقادیر متناظر فشار و سرعت در دو حالت سرعت ثابت در مرز ورودی و فشار ثابت در مرز ورودی در طول خطی که از مرکز بازشدگی دریچه قطاعی عبور می‌کند، رسم شده است. مشاهده می‌شود در دریچه اضطراری فشار در شرط مرزی سرعت ثابت به مقدار بسیار زیادی نسبت به حالت دیگر تغییر نموده که این تغییر در نتایج آزمایشگاهی مشاهده نشده است. همچنین مقادیر سرعت طولی نیز دستخوش تغییرات بسیار زیادی می‌شود. نکته قابل توجه این است که حداکثر افزایش در فشار در

مرز ورودی و حداکثر افزایش در سرعت در زیر دریچه قطاعی اتفاق می افتد.

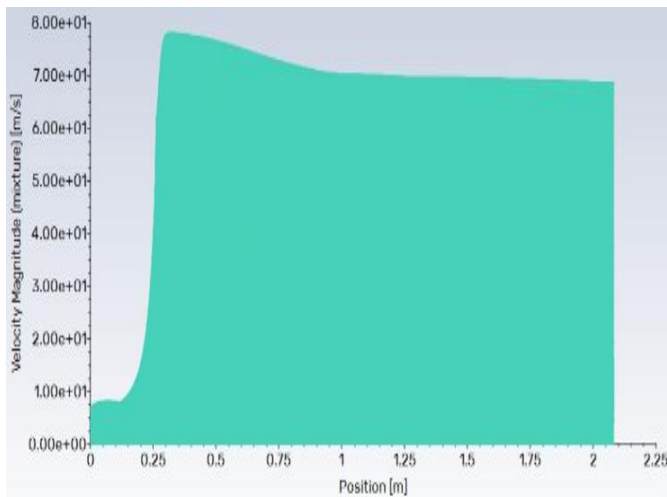
تغییرات فشار پس از طی ۱ متر از دامنه محاسباتی عملاً محسوس نیست.



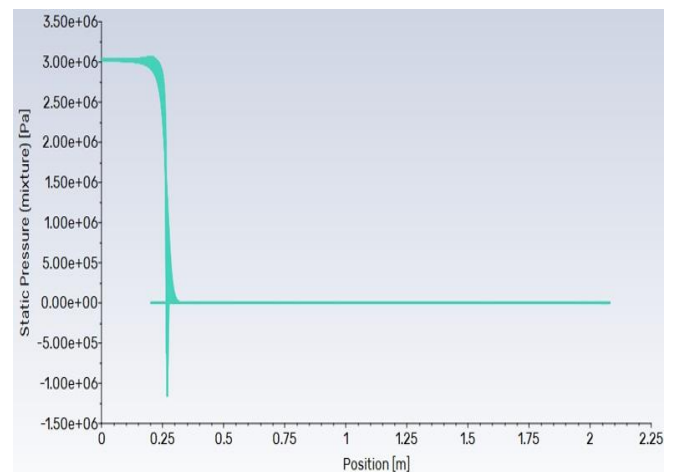
الف. شرط مرزی فشار در ورودی



الف. شرط مرزی فشار در ورودی

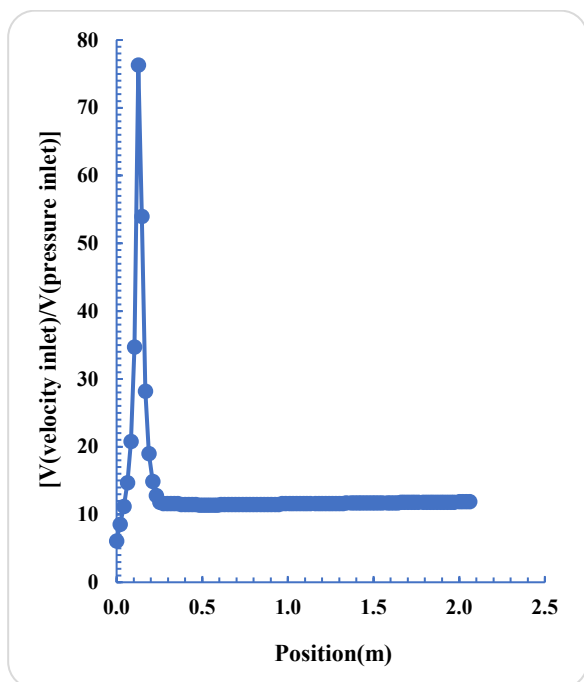


ب. شرط مرزی سرعت در ورودی
شکل ۷. تغییرات سرعت در محور طولی مجرا

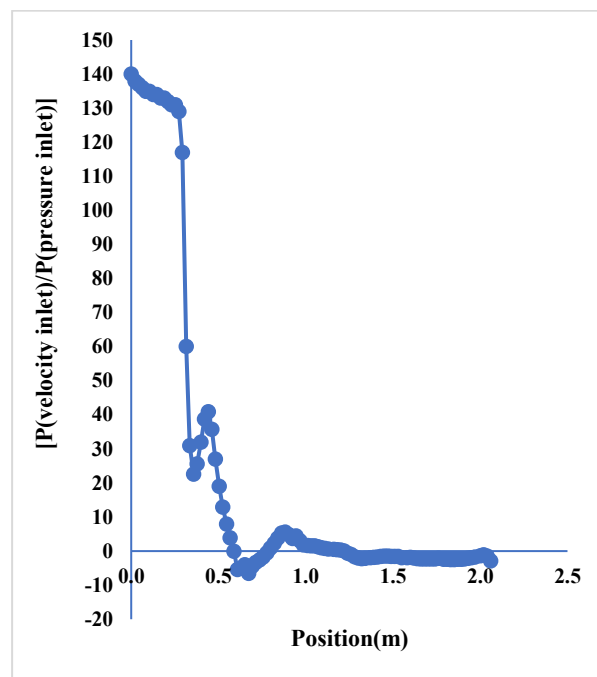


ب. شرط مرزی سرعت در ورودی

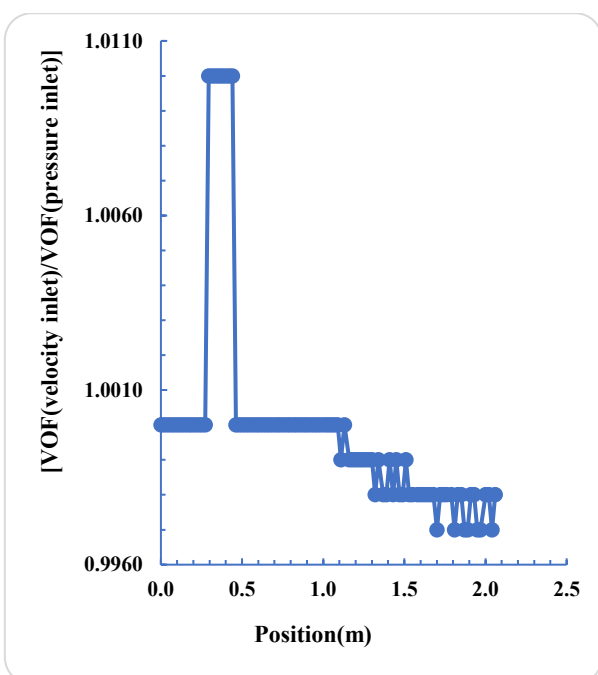
شکل ۶. تغییرات فشار در محور طولی مجرا.



شکل ۹. تغییرات نسبت سرعت طولی در حالت شرط مرزی سرعت ثابت و شرط مرزی فشار ثابت در طول مجرا



شکل ۸. تغییرات نسبت فشار در حالت شرط مرزی سرعت ثابت و شرط مرزی فشار ثابت در طول مجرا

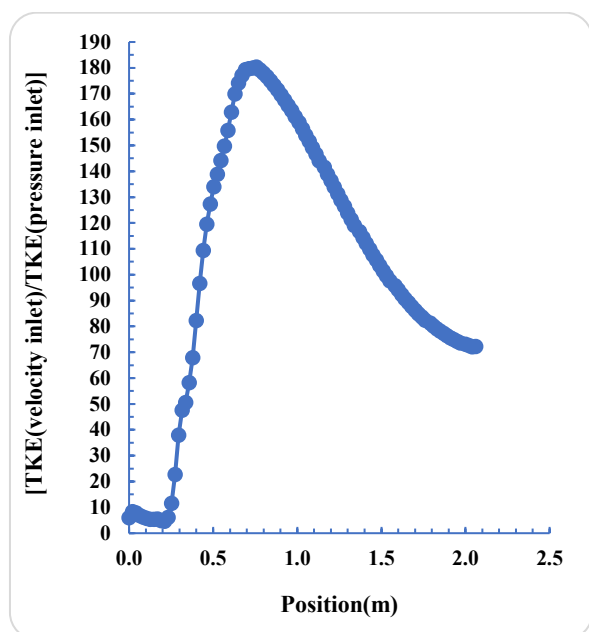


شکل ۱۰. نسبت کسر حجمی در حالت شرط مرزی سرعت ثابت و شرط مرزی فشار ثابت در طول مجرا

در شکل‌های ۹ و ۱۰ نیز، نسبت‌های کسر حجمی آب (VOF_w) و انرژی آشفتگی جنبشی (TKE^5) در محوری که از مرکز بازشدگی دریاچه قطاعی می‌گذرد ترسیم شده است. در خصوص کسر حجمی، تا قبل از دریاچه هیچ تغییری در کسر حجمی ملاحظه نمی‌شود. تا فاصله ۰/۵ بعد از دریاچه اضطرابی، افزایش حدود ۱ درصدی در کسر حجمی آب بوجود می‌آید. از این فاصله تا حدود ۱/۱ متر بعد از دریاچه قطاعی هیچ تغییری در کسر حجمی آب نداریم. از موقعیت ۱/۱ متر تا انتهای مسیر، تا حدود ۰/۴ درصد کاهش در کسر حجم آب داریم.

TKE متناظر با افزایش سرعت طولی جریان در لوله تخلیه کننده بعد از دریاچه، شاهد افزایش TKE هستیم. حداکثر افزایش در فاصله حدود ۰/۸ متر از دریاچه قطاعی اتفاق می‌افتد و به حدود بیش از ۱۸۰ برابر می‌رسد.

⁵ Turbulence kinetic energy



شکل ۱۱. تغییر انرژی جنبشی آشفتگی در طول لوله

۶. نتیجه‌گیری

در این تحقیق با هدف مقایسه شرایط مرزی سرعت ثابت در ورودی و فشار ثابت در ورودی در مدل عددی دریاچه تخلیه کننده تحتانی، مدل عددی منتج از مدل فیزیکی دریاچه و کانال تخلیه کننده تحتانی سد دیابارا پس از بررسی استقلال و حساسیت شبکه‌بندی و تعیین اندازه بهینه شبکه‌بندی در دامنه محاسباتی تهیه گردید. مدل عددی در دو حالت سرعت ثابت در شرط مرزی ورودی و فشار ثابت در شرط مرزی ورودی اجرا گردید و نتایج مورد بررسی قرار گرفت. با بررسی نتایج مشخص گردید که در شرط مرزی سرعت ثابت در ورودی، حداکثر فشار در دامنه محاسباتی حدود ۱۴۰ برابر فشار در دامنه نسبت به شرط مرزی فشار در ورودی است. با بررسی نتایج و نیز مقایسه دبی جرمی در دو حالت پیش گفته، شرط مرزی سرعت در ورودی ثابت به هیچ عنوان در سازه‌های تخلیه کننده تحتانی که در میانه دارای یک دریاچه باشند مناسب نیست. این امر بدلیل نزدیک بودن دامنه فشار در بالادست و پایین دست دریاچه اضطراری می‌باشد. در واقع سرعت در مدل با شرط سرعت ورودی ثابت متاثر تلفات انرژی در طول

در این بررسی، مقدار دبی جرمی در دامنه محاسباتی را در شرایط سرعت ثابت در ورودی ۱۳۰۹/۶۴ کیلوگرم در ثانیه و در شرایط فشار در ورودی، ۱۱۲/۲۸ کیلوگرم در ثانیه نشان می‌دهد. مقدار دبی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه با استفاده از لوله پرستو ۱۱۶/۴۵ لیتر در ثانیه محاسبه شده و با خطای ۳/۳ درصد بخوبی مدل فشار ورودی ثابت با نتایج آزمایشگاهی انطباق پیدا می‌کند و قطعاً خطای بسیار بزرگی در مدل سرعت ثابت در این پارامتر اتفاق افتاده است.

می‌توان اینگونه نتیجه گرفت، علت عدم انطباق در مدل سرعت ثابت در ورودی دلیل افزایش شدید فشار و سرعت در شرط مرزی سرعت نسبت به فشار این است که سرعت متناظر با فشار در مرز ورودی، با توجه به فشار بالایی که در پایین دست دریاچه اضطراری وجود دارد نبوده و عملاً به دلیل افت انرژی در طول لوله تخلیه کننده، مقدار کمتری می‌باشد. در دریاچه‌های تخلیه کننده تحتانی مقدار عددی نزدیک به می‌باشد. بنابراین مقدار سرعت در ورودی بسیار کمتر است. این امر در شکل ۱۰ بخوبی دیده می‌شود بگونه‌ای که سرعت در ورودی عملاً حدود ۰/۹ متر در ثانیه است در حالیکه در شرط سرعت در ورودی مقدار ۶/۵۶ متر در ثانیه اعمال گردیده است. مقدار فشار در پایین دست دریاچه اضطراری مطابق شکل ۵-الف نیز در دامنه پایین دست دریاچه نوسان دارد و نمی‌توان مقدار مشخصی را برای آن در نظر گرفت. بنابراین شرط سرعت در ورودی در تخلیه کننده‌های تحتانی منجر به ایجاد خطای محاسباتی شدیدی خواهد شد. در واقع در این سناریو در مدل عددی مقدار سرعت در مرز ورودی را با هدف فشار در پایین دست جمع جبری شده و بعنوان سرعت نهایی در شرط مرزی اعمال می‌کند. این مطلب بخوبی در شکل ۶-الف دیده می‌شود. در این شکل سرعت در ورودی حدود ۱۱ متر در ثانیه است و نه ۶/۵۶ متر بر ثانیه. بنابراین با اعمال سرعت ۶/۵۶ متر در ثانیه در شرط مرزی سرعت در ورودی باعث می‌شود سرعت به طور چشمگیر و البته با خطا نسبت به مقدار واقعی تغییر نماید. همین امر کفایت تا فشار و سرعت در دامنه محاسباتی بگونه‌ای غیر واقعی مدل شود.

- gas–solid flows in risers. *Industrial & engineering chemistry research*. 2012;51(4):1721-8.
- [۱۱] غزالی، نیشابوری ص، کاویانپور. بررسی تأثیر تغییر ابعاد مجرا بر خصوصیات هیدرولیکی جریان در تخلیه‌کننده تحتانی سد. مهندسی عمران مدرس. ۲۰۱۵؛ ۱۵(۳):۱۷۱-۸۲.
- [12] Stojkovski F, Belšak S, Broz R, Stojkovski V. CFD MODELING TO DETERMINE THE OUTLET WATER JET FORMATIONS AND HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF A DAM BOTTOM OUTLET GATE. *Innovative Mechanical Engineering*. 2023;2(1):130-43.
- [۱۳] محمدی ن، هادیان م. اعمال شرط مرزی ورودی در شبیه‌سازی جریان سطح آزاد در مدل عددی OpenFOAM. دهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران ۱۳۹۴.
- [14] Najafi MR, Roshan R, Zarrati AR, Kavianpour MR, editors. *Numerical Modeling of Flow Condition in a Bottom Outlet* 2009; Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [15] Klaij CM, Hoekstra M, Vaz G. Design, analysis and verification of a volume-of-fluid model with interface-capturing scheme. *Computers & Fluids*. 2018;170:324-40.
- [16] Chaudhry MH. *Applied Hydraulic Transients*. 3rd ed. Springer; 2014. Available from: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8538-4>
- [17] Fox RW, McDonald AT, Pritchard PJ, Mitchell JW. *Introduction to Fluid Mechanics*. 9th ed. Wiley; 2015. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119021252>
- [18] ANSYS Inc. *ANSYS Fluent Theory Guide*. Release 2022 R2. Available from: <https://www.ansys.com/resource-library/technical-brief/ansys-fluent-theory-guide>
- [19] Versteeg HK, Malalasekera W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. 2nd ed. Pearson; 2007.
- [20] Ferziger JH, Perić M, Street RL. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. 4th ed. Springer; 2020. Available from: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-99693-6>
- [21] Steinman DA, et al. *J Biomech Eng*. 2013. Available from: <https://doi.org/10.1115/1.4023239>
- تخلیه‌کننده است که در این مدل از شبیه‌سازی لحاظ نمی‌شود و همین مطلب منجر به تولید خطا خواهد شد. این امر از ابتدا امر نیز بر نویسندگان مقاله پوشیده نبود اهداف کلی علاوه بر بررسی دو شرط مرزی سرعت و فشار، نشان دادن ابعاد انحراف نتایج نسبت واقعیت مدل عددی می‌باشد.
- منابع
- [1] Mohd Radzi MR, Zawawi MH, Abas MA, Ahmad Mazlan AZ, Mohd Arif Zainol MRR, Hassan NH, et al. Structure Integrity Analysis Using Fluid–Structure Interaction at Hydropower Bottom Outlet Discharge. *Water*. 2023;15(6):1039.
- [2] Azman A, Abas A, Zawawi M, Rozainy MAZ M, Abustan I, editors. *Numerical study of the effect of flow on bottom outlet of dam*. AIP Conference Proceedings; 2019: AIP Publishing.
- [3] Aminoroayaie Yamini O, Mousavi SH, Kavianpour M, Safari Ghaleh R. Hydrodynamic performance and cavitation analysis in bottom outlets of dam using CFD modelling. *Advances in Civil Engineering*. 2021;2021(1):5529792.
- [4] Storti M, Nigro N, Paz R, Dalcin L. Dynamic boundary conditions in computational fluid dynamics. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2008;197:1219-32.
- [5] Versteeg HK. *An introduction to computational fluid dynamics the finite volume method*, 2/E: Pearson Education India; 2007.
- [6] Thorenz C. *Boundary Conditions for Hydraulic Structures Modelling with OpenFOAM*. 2024.
- [7] Montorfano A, Piscaglia F, Ferrari G. Inlet boundary conditions for incompressible LES: A comparative study. *Mathematical and Computer Modelling*. 2013;57(7):1640-7.
- [8] Kunz P, Hirschler M, Huber M, Nieken U. Inflow/outflow with Dirichlet boundary conditions for pressure in ISPH. *Journal of Computational Physics*. 2016;326:171-87.
- [9] Eui Cheol Jung G-HL, Eun Bo Shim & Hojin Ha. Assessing the impact of turbulent kinetic energy boundary conditions on turbulent flow simulations using computational fluid dynamics. 2023.
- [10] Shah MT, Utikar RP, Evans GM, Tade MO, Pareek VK. Effect of inlet boundary conditions on computational fluid dynamics (CFD) simulations of

- [22] Mittal R, Iaccarino G. *Annu Rev Fluid Mech.* 2005;37:239–261. Available from: <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.37.061903.175743>
- [23] Oberkampf WL, Roy CJ. *Verification and Validation in Scientific Computing.* Cambridge; 2010. Available from: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511760396>