



Numerical Simulation of Secondary Bottom Outlet of RUDBAR Dam in Lorestan to evaluate the Jet Length and Cavitation Risk

Maryam Gharibipour ^a, Mohsen Nasrabadi ^{b*}, Hamed Safikhani ^c, Younes Aminpour ^d

^a Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Arak University, Arak, Iran.

maryamgharibi137@gmail.com

^b Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Environment, Arak University, Arak, Iran.

m-nasrabadi@araku.ac.ir

^c Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Arak University, Arak, Iran. h-safikhani@araku.ac.ir


^d Hydraulic Structures Department, Water Research Institute, Ministry of Energy, Tehran, Iran. yaminpour@wri.ac.ir

Original Article

Use your device to scan
and read the article online



Citation: Gharibipour M, Nasrabadi M, Safikhani H, Aminpour Y. Numerical Simulation of Secondary Bottom Outlet of RUDBAR Dam in Lorestan to evaluate the Jet Length and Cavitation Risk. *Industrial Innovations*. 2026; 4(1):1-20.

 <https://doi.org/10.61882/jii.4.1.1>

KEYWORDS

Bottom Outlet;
Numerical Simulation;
Rudbar-Lorestan Dam;
Cavitation.

ABSTRACT

In this research, the flow behavior in the secondary bottom outlet of the Roudbar- Lorestan Dam was numerically analyzed using ANSYS CFX software, with an emphasis on predicting the length of the issuing jet and the possibility of cavitation occurrence. For validation, the outputs of the numerical model were compared with experimental results obtained from the dam's reduced-scale physical model (1:20). The meshing process and grid independence study showed that using cubic elements with approximately 900,000 elements could reduce the error in the issuing jet length to less than 8%. After evaluating various turbulence models, the K- ω model was selected as the superior turbulence model with a mean relative error of 7.88%. Furthermore, the results indicated that at the maximum flow rate, the simulated jet length was predicted to be about 22% shorter than the initial design state. Analysis of local pressures and the cavitation index also showed that in the high-velocity flow regions and near the gate, the cavitation index reached a minimum value of 0.78, which is close to the threshold for the occurrence of cavitation. In contrast, the values of this coefficient in the middle and end sections of the jet were higher than 1.2, and the probability of cavitation in these areas was assessed as very negligible. Overall, the findings of this research demonstrate that numerical simulation can be used with high accuracy, exceeding 95%, in predicting the jet length and evaluating cavitation conditions, and is considered an efficient tool for the analysis and optimization of the design of dam bottom outlet.

Extended Abstract

1. Introduction

The importance and necessity of conducting this research arise from the occurrence of operational problems in the secondary bottom outlet of the Roudbar-Lorestan Dam after its commissioning. These problems include an unauthorized increase in the exiting jet length from flip bucket and the occurrence of significant erosion downstream of the structure, necessitating the modification and improvement of the bottom outlet performance. In this regard, the Water Research Institute of the Ministry of Energy proposed several remedial options to address these technical deficiencies in a physical model with a 1:20 scale. On the other hand, given the complex nature of high-velocity flows and the existence of such phenomena as cavitation in these types of structures, the possibility of directly measuring and recording certain critical parameters like pressure and flow velocity at key points of the outlet is highly limited or practically impossible due to implementation and

* Corresponding author.

E-mail address: m-nasrabadi@araku.ac.ir

DOI: <https://doi.org/10.61882/jii.4.1.1>

Received: November 20, 2025; Received in revised form: December 5, 2025; Accepted: December 17, 2025.

Article type: Research Paper



safety constraints. Furthermore, investigating the potential for cavitation and its associated damages through field tests, especially under critical conditions or at full scale, would be extremely costly and time-consuming. Accordingly, conducting numerical studies and utilizing the capabilities of the ANSYS CFX simulation software can serve as an efficient, cost-effective, and accurate tool for analyzing the hydraulic behavior of the structure, evaluating the corrective options, and enhancing the safety and performance of the dam's lower outlet. This approach can play a significant role in ensuring the sustainable and successful operation of this structure.

2. Material and Methods

In this research, a two-phase water-air flow simulation of the secondary bottom outlet of the Rudbar-Lorestan Dam after the control gate was performed using ANSYS CFX software, and the effect of changing the geometry of the outlet channel structure on the jump length and fluid jet was investigated. In this study, first, the geometric model was created in SolidWorks software, and then its blocking was completed in ANSYS DesignModeler. In ANSYS CFX software, the governing equations for the flow (the Navier-Stokes equations) are solved using the Finite Volume Method (FVM).

3. Results

After performing detailed numerical simulations using a meshed network comprising 900,000 elements and employing the $k-\omega$ turbulence model, the exiting jet length was investigated and analyzed. The results of these simulations, separated by the degree of gate opening (100 and 50 percent), are listed in Tables 1 and 2, respectively. For a more comprehensive analysis and better assessment, the maximum (upper) and minimum (lower) values of the exit jet length are also measured and presented in these tables.

Table 1 Numerical Simulation Results with 100% Gate Opening

Q_p (m ³ /s)	Jet length (m)		Bottom outlet propertis		Physical Model
	low	high	θ	R(m)	
0.091	1.35	2.05	40	10	1
0.091	0.44	2.03	14	10	2
0.091	0.94	1.75	30	15	3
0.091	0.44	1.73	16	15	4
0.091	0	1.64	-	-	5

Table 2 Numerical Simulation Results with 50% Gate Opening

Q_p (m ³ /s)	Jet length (m)		Bottom outlet propertis		Physical Model
	low	high	θ	R(m)	
0.054	7.03	7.57	40	10	1
0.054	3.9	4.77	14	10	2
0.054	6.54	7.69	30	15	3
0.054	4.67	5.63	16	15	4
0.054	0	1.47	-	-	5

4. Conclusions

The study of a physical model of a RUDBAR LORESTAN dam's bottom outlet revealed that the exiting jet length is a function of the flow rate, boundary conditions, and divergent channel geometry, increasing significantly with higher flow rates. Numerical simulation using ANSYS CFX and the $K-\omega$ turbulence model successfully reproduced this trend with a mean relative error of 7.88% and a high prediction accuracy of over 95%. However, absolute value discrepancies were noted, and at maximum flow rate, the simulated jet length was predicted to be 22% shorter than the initial design. Analysis of the cavitation index (a minimum of 0.78 near the gate) indicated a cavitation risk in high-velocity regions near the gate, whereas the risk was negligible in the middle and end sections of the jet. Overall, this research confirms the validity and efficiency of combining experimental and numerical methods for hydraulic behavior analysis, jet length prediction, and cavitation assessment, which can be applied to the safe operation of dams and the optimal design of similar outlets.



شبیه‌سازی عددی تخلیه‌کننده تحتانی ثانویه سد رودبار لرستان به منظور ارزیابی طول جت و خطر کاویتاسیون

مریم غریبی پور^{الف}، محسن نصرآبادی^{ب*}، حامد صفی‌خانی^ج، یونس امین‌پور^د

^{الف} گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران. maryamgharibi137@gmail.com

^ب گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و محیط‌زیست، دانشگاه اراک، اراک، ایران. m-nasrabadi@araku.ac.ir

^ج گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران. h-safikhani@araku.ac.ir

^د بخش سازه‌های هیدرولیکی، مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو، تهران، ایران. y.aminpour@wri.ac.ir

چکیده	واژگان کلیدی
تخلیه‌کننده‌های سدها سازه‌های هیدرولیکی پیچیده‌ای هستند که نقش مهمی در کنترل سطح آب مخزن، تخلیه آب اضافی و ایمنی سد ایفا می‌کنند. در این تحقیق، رفتار جریان در تخلیه‌کننده ثانویه تحتانی سد رودبار لرستان با تأکید بر شبیه‌سازی طول جت خروجی و امکان وقوع پدیده کاویتاسیون به صورت عددی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS CFX شبیه‌سازی و تحلیل شده است. به منظور اعتبارسنجی، خروجی‌های مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی حاصل از مدل فیزیکی سد در مقیاس (۱:۲۰) مقایسه گردید. فرآیند شبکه‌بندی و بررسی استقلال از شبکه نشان داد که استفاده از المان‌های مکعبی با حدود ۹۰۰ هزار المان توانست خطای طول جت خروجی را به کمتر از ۸ درصد کاهش دهد. پس از ارزیابی مدل‌های آشفتگی مختلف، مدل K- ω با خطای متوسط نسبی ۷/۸۸ درصد به عنوان مدل آشفتگی برتر انتخاب شد. همچنین، نتایج نشان داد که در حالت دبی عبوری بیشینه، طول جت شبیه‌سازی شده حدود ۲۲ درصد کوتاه‌تر از حالت اولیه طراحی تعیین گردید. تحلیل فشارهای موضعی و شاخص کاویتاسیون نیز نشان داد که در نواحی پرسرعت جریان و در نزدیکی دریچه، شاخص کاویتاسیون به مقدار حداقل ۰/۷۸ رسید که نزدیک به آستانه وقوع پدیده کاویتاسیون است. در حالی که مقادیر این ضریب در بخش‌های میانی و انتهایی جت بالاتر از ۱/۲ بوده و احتمال وقوع کاویتاسیون در این نواحی بسیار ناچیز ارزیابی شد. به طور کلی، یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که شبیه‌سازی عددی می‌تواند با دقت بالای بیش از ۹۵ درصد در شبیه‌سازی طول جت و ارزیابی شرایط کاویتاسیون مورد استفاده قرار گیرد و ابزار کارآمدی برای تحلیل و بهینه‌سازی طراحی تخلیه‌کننده‌های تحتانی سدها به شمار می‌رود.	تخلیه‌کننده تحتانی؛ شبیه‌سازی عددی؛ سد رودبار لرستان؛ کاویتاسیون.
	تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۲۹
	تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۱۴
	تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۶

۱- مقدمه

سدها سازه‌هایی حیاتی در مدیریت منابع آب و تولید برق هستند و هرگونه خطا در طراحی یا تحلیل جریان می‌تواند پیامدهای جدی و حتی تخریب سد را به همراه داشته باشد. به دلیل رفتار بسیار پیچیده جریان‌های دوفازی آشفته همراه با هوا، حباب و کاویتاسیون در اطراف سد، روش‌های تحلیلی ساده توان پیش‌بینی دقیق این جریان‌ها را ندارند. در نتیجه، استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی پیشرفته به عنوان ابزاری کارآمد و کم‌هزینه برای تحلیل دقیق میدان جریان و کاهش ریسک‌های طراحی

و بهره‌برداری، ضرورت می‌یابد [۲،۱].

سد رودبار لرستان یک سد سنگریزه‌ای با هسته رسی است که روی رودخانه رودبار در جنوب الیگودرز قرار گرفته و به‌دلیل اختلاف ارتفاع بیش از ۳۰۰ متر، موقعیت مناسبی برای تولید برق‌آبی فراهم کرده است. مساحت حوضه آبریز سد ۲۲۵۵ کیلومتر مربع بوده و متوسط جریان سالانه رودخانه ۳۰/۲ مترمکعب بر ثانیه است. اهداف اصلی ساخت سد شامل تولید ۹۸۶ گیگاوات ساعت برق‌آبی در سال، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، کاهش هزینه نیروگاه‌های حرارتی، ایجاد اشتغال و توسعه گردشگری منطقه است. سیستم‌های هیدرولیکی سد شامل انحراف آب، تخلیه سیلاب، تخلیه‌کننده تحتانی و آبگیر نیروگاه می‌باشد [۳].

در این تحقیق به دلیل بروز مشکلات جدی در عملکرد تخلیه‌کننده تحتانی ثانویه سد رودبار لرستان، از جمله افزایش طول جت و فرسایش شدید پایین‌دست (شکل ۱)، نیاز به بررسی و اصلاح سازه مطرح شده است [۳]. در شکل ۱ نمایی از جت خروجی پایین‌دست تخلیه‌کننده تحتانی ثانویه و تخریب تکیه‌گاه روبه‌روی تخلیه‌کننده تحتانی ثانویه، در اثر برخورد جت خروجی از پرتابه جامی انتهایی نشان داده شده است. به‌دلیل پیچیدگی جریان و محدودیت اندازه‌گیری پارامترهای بحرانی مانند فشار و سرعت و نیز هزینه و ریسک بالای آزمایش‌های میدانی، استفاده از شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار ANSYS CFX برای بازتولید رفتار هیدرولیکی، ارزیابی گزینه‌های علاج‌بخشی و افزایش ایمنی و پایداری بهره‌برداری از سازه، به‌عنوان رویکردی کارآمد و ضروری پیشنهاد می‌شود.



شکل ۱ نمایی از جت خروجی پایین‌دست تخلیه‌کننده تحتانی ثانویه و تخریب تکیه‌گاه روبه‌روی تخلیه‌کننده تحتانی ثانویه، در اثر برخورد جت خروجی از پرتابه جامی انتهایی

در مطالعات عددی تخلیه‌کننده‌های تحتانی سدها از نرم‌افزارهای مختلفی مانند ANSYS، Flow-3D و OpenFOAM برای شبیه‌سازی جریان‌های چندفازی استفاده شده است. احمدی و نعمتی [۴] با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D نشان دادند وجود یک بخش مستقیم حداقل ۲۵ متری پیش از دریاچه، گردابه‌ها و فشار پایین‌دست را کاهش می‌دهد بدون آن‌که افزایش بیشتر طول، بهبود چشم‌گیری ایجاد کند. یامینی و همکاران [۵] با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D و مدل RNG k-ε، الگوی جریان و کاویتاسیون در خروجی تحتانی سد سرداب را بررسی کرده و نقش بازشدگی دریاچه و هواکش در کاهش خطر کاویتاسیون را نشان دادند.

طاهری و همکاران [۶] مسیر جت‌های خروجی و محل برخورد آن‌ها به پای سد را به‌صورت تجربی و عددی مطالعه کرده و لزوم در نظر گرفتن مقاومت هوا در معادلات پرتابه جامی و اثر قطر دریچه و دبی بر فاصله برخورد را اثبات کردند. طریقی و همکاران [۷] با Flow-3D، توزیع فشار و احتمال کاویتاسیون را در سد سفیدرود تحلیل کرده و نشان دادند که عملکرد همزمان دو دریچه می‌تواند فشار منفی و خطر کاویتاسیون ایجاد کند. قبادی و مرادی‌نیا [۸] نیز با OpenFOAM عملکرد مدل‌های مختلف آشفتگی را در جریان آشفته پایین‌دست دشارژر سد کانی مقایسه کرده و تاکید کردند که انتخاب مدل آشفتگی، ضریب اصطکاک و شرایط هوادهی تأثیر مهمی بر پیش‌بینی الگوی جریان و فشارهای وارد بر سازه دارد. حسن‌زاده و همکاران [۹] با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D، تأثیر تغییر در تراز رسوبات انباشته شده در مخزن، اندازه قطر متوسط رسوبات، یکنواختی و غیریکنواختی دانه‌بندی رسوبات انباشته شده و نیز تعداد کارکرد همزمان دریچه‌های عمقی در زمان عملیات فلاشینگ تحت فشار به‌عنوان پارامترهای سد و رسوبات بر هندسه و حجم مخروط رسوب‌شویی را شبیه‌سازی کردند. نتایج حاصل بیانگر آن بود که در تراز آب مخزن و نیز دبی خروجی ثابت از هر دریچه عمقی، ابعاد و حجم مخروط رسوب‌زدایی با افزایش تراز رسوبات، افزایش تعداد دریچه‌ها و کاهش قطر رسوبات، افزایش می‌یابد؛ به‌طوری‌که جهت احیای هرچه بیش‌تر حجم از بین رفته مخزن در اثر رسوب‌گذاری بهتر است عملیات رسوب‌زدایی تحت فشار در حالت حداکثر تراز انباشت رسوبات با قطر کم‌تر و کارکرد همزمان حداکثر تعداد دریچه‌های تحتانی سد انجام گردد.

در کنار این ابزارها، مطالعات متعددی نیز با بهره‌گیری از بسته نرم‌افزاری ANSYS صورت گرفته است. خورشیدی و همکاران [۱۰] در پژوهشی به بررسی عددی جریان و سیستم هوادهی در تخلیه‌کننده تحتانی سد سفیدرود پرداخته‌اند. مشکل اصلی در این تخلیه‌کننده، ایجاد کاویتاسیون به‌دلیل سرعت بالای جریان آب است که منجر به آسیب‌های جدی به سازه شده است. برای حل این مشکل، پژوهشگران از روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و نرم‌افزار فلوئنت استفاده کرده‌اند. با استفاده از مدل‌های عددی مناسب، جریان دوفازی آب‌وهوا در تخلیه‌کننده شبیه‌سازی شده و تأثیر سیستم هوادهی بر کاهش کاویتاسیون بررسی شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از سیستم هوادهی با طراحی مناسب می‌تواند به‌طور مؤثری از ایجاد کاویتاسیون جلوگیری کرده و عمر مفید تخلیه‌کننده را افزایش دهد. بنی‌سلطان و پیرزاده [۱۱] با استفاده از مدل عددی FLUENT و مدل آشفتگی k-ε استاندارد یکی از گزینه‌های پیشنهادی برای علاج‌بخشی اختلال در عملکرد دریچه‌های تخلیه‌کننده سد شهید عباسپور را به‌صورت عددی بررسی کردند. پس از مقایسه نتایج با روابط حاکم بر دریچه تخلیه‌کننده سدها، با توجه به انباشت رسوب در دهانه ورودی، اثر وجود رسوبات بر نتایج مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه نتایج حاصله از شبیه‌سازی عددی صورت گرفته با روابط تجربی موجود، انطباق خوبی را نشان داد. همچنین مدلسازی گزینه علاج‌بخشی نشان داد که وضعیت جریان به‌علت عدم تغییر ابعاد هواده و مشخصات دریچه نسبت به حالت اول مدلسازی تفاوت چندانی ندارد و بنابراین گزینه مناسبی جهت رفع مشکل پیش‌آمده می‌باشد. هوانگ و همکاران [۱۲] به بررسی رفتار جریان آب در تونل سرریز سد پرداخته‌اند. آن‌ها با ترکیب مدل‌سازی عددی سه‌بعدی و آزمایش‌های تجربی، به تحلیل تغییرات سرعت جریان، منحنی سطح آب و سایر پارامترهای هیدرولیکی پرداخته‌اند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS با داده‌های تجربی به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها مقایسه شده است. تطابق بسیار خوب بین نتایج عددی و تجربی نشان‌دهنده دقت و اعتبار مدل عددی به‌کاررفته در این پژوهش است. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که مدل عددی و روش آزمایشگاهی مورد استفاده در این مطالعه، روشی قابل‌اعتماد و کارآمد برای تحلیل مسائل مهندسی آب است. شلیپاکار و همکاران [۱۳] به شبیه‌سازی عددی جریان آب در سرریز تونل پروژه برق‌آبی Jingping-1 پرداخته‌اند. آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار ANSYS و مدل‌های آشفتگی و حجم سیال، موفق به شبیه‌سازی ویژگی‌های جریان از جمله توزیع فشار، سرعت و طول حفره هوادهی شده‌اند. مقایسه نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی نشان می‌دهد که مدل‌های استفاده‌شده در این پژوهش قادر به پیش‌بینی دقیق رفتار جریان در سرریز تونل هستند. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که ناحیه حفره هوادهی در سرریز تونل پایدار بوده و طول آن در محدوده معقولی قرار دارد. رانگ و همکاران [۱۴] در پژوهشی جامع، به بررسی رفتار جریان آب تخلیه‌شده از سد وودو با استفاده از مدل‌سازی عددی سه‌بعدی پرداخته‌اند. آن‌ها با بهره‌گیری از فناوری مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) و معادلات حاکم بر جریان سیالات، موفق به شبیه‌سازی دقیق جریان آب در اطراف سد و در پایین‌دست آن شده‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که

حداکثر عمق آب در پایین‌دست سد، حداکثر دبی تخلیه و طول پرش هیدرولیکی در شرایط مختلف سطح آب مشخص شده است. همچنین، این پژوهش تأیید کرده است که سد در شرایط مختلف آب، از جمله در شرایط سیلابی، توانایی پاسخ‌گویی به نیازهای ایمنی را دارد. با این وجود، پژوهشگران بر اهمیت بررسی دقیق پی سد، به‌ویژه در نقاط برخورد جریان تخلیه با پی، تأکید کرده‌اند. شبه‌سازی‌های انجام شده، الگوهای پیچیده جریان آشفته مانند برخورد، بازتاب و گرداب را به‌خوبی نشان داده‌اند که برای ارزیابی عملکرد سد و مدیریت بهینه مخزن بسیار مفید است. شی و همکاران [۱۵] برهم‌کنش بین جریان واریزه‌ای و سدهای تنظیمی با خروجی‌های تحتانی از طریق آزمایش‌های فلوم با استفاده از هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) دوبعدی بررسی می‌شود. بر اساس نتایج عددی، ارتفاع پرش با افزایش ارتفاع نرمال شده خروجی تحتانی کاهش می‌یابد و این روند را می‌توان با یک تابع توانی تقریب زد.

نوآوری اصلی پژوهش حاضر در تمرکز بر تخلیه‌کننده تحتانی ثانویه سد رودبار لرستان و پرتابه جامی آن است، سازه‌ای که با وجود اهمیت عملی، تاکنون به‌صورت عددی با جزئیات کامل بررسی نشده بود. در این مطالعه، ابتدا وضعیت جاری با مدل عددی بازتولید شده و مدل آشفتگی بهینه با واسنجی دقیق بر اساس نتایج مدل فیزیکی مقیاس ۱:۲۰ استخراج می‌شود. سپس، بر مبنای این مدل واسنجی شده، پنج گزینه علاج‌بخشی پیشنهادی مؤسسه تحقیقات آب و وزارت نیرو برای کاهش طول جت خروجی، کنترل الگوی فشار و سرعت، و ارزیابی کمی احتمال کاویتاسیون به‌صورت نظام‌مند شبه‌سازی می‌شوند. این پژوهش با امکان اندازه‌گیری پارامترهای هیدرولیکی کلیدی در نقاط دشوار یا پرهزینه دسترسی، از مطالعات پیشین متمایز است که غالباً به تحلیل کیفی یا اصلاحات محدود اکتفا کرده‌اند. اولین شبه‌سازی عددی دوفازی کامل این تخلیه‌کننده پس از مشاهده مشکل عملیاتی واقعی (طول جت ۱۶۴ متری به جای ۷۰ متر پیش‌بینی شده) انجام شده و به همراه شبه‌سازی کمی خطر کاویتاسیون بحرانی‌ترین گزینه، چارچوب عددی-کاربردی قابل‌اتکایی ارائه می‌دهد که می‌تواند در تصمیم‌گیری برای انتخاب بهینه‌ترین گزینه اصلاحی و ارتقای ایمنی و دوام تخلیه‌کننده به‌کار رود. ضرورت تحقیق با تأکید بر هزینه بالای اصلاح فیزیکی و ریسک ایمنی ناشی از عدم بهینه‌سازی دقیق، تقویت شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی مدل فیزیکی سد رودبار لرستان

سد مخزنی رودبار لرستان بر روی رودخانه رودبار لرستان (از سرشاخه‌های شرقی حوزه آبرگیر رودخانه دز) و در فاصله حدود ۸۱۱ کیلومتری جنوب شهرستان الیگودرز در استان لرستان واقع گردیده است. وجود اختلاف ارتفاع بیش از ۳۰۰ متری بستر رودخانه در دو سوی بلندی‌های مذکور، موقعیتی ویژه جهت تولید انرژی برق‌آبی را به‌وجود آورده است. مساحت حوضه آبریز رودخانه تا محل ساخت سد رودبار لرستان ۲۲۵۵ کیلومتر مربع و میزان متوسط جریان سالانه رودخانه ۳۰/۲ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. حداقل دبی ماهیانه رودخانه پس از برداشت‌های در حدود ۴/۱ مترمکعب در ثانیه و حداکثر آن حدود ۲۵۰/۵ مترمکعب در ثانیه است. همچنین آورد سالانه این رودخانه ۹۵۷ میلیون مترمکعب و حداکثر سیلاب محتمل حوزه در حدود ۳۷۳۴ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. مهم‌ترین اهداف ساخت سد رودبار لرستان عبارت‌اند از:

- تولید انرژی برق‌آبی به میزان ۹۸۶ گیگاوات ساعت در سال (توان ۴۵۰ مگاوات با دو واحد ۲۲۵ مگاواتی) به‌منظور کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به میزان ۶۲۶۱۱۰ تن در سال
- کاهش هزینه استهلاک نیروگاه‌های حرارتی
- اشتغال‌زایی در منطقه در حین اجرای پروژه و در دوران بهره‌برداری
- ایجاد محیط تفریحی و گردشگری برای گردشگران داخلی

این سد از نوع سنگریزه‌ای با هسته رسی است. سازه‌های هیدرولیکی سد شامل سیستم انحراف، سیستم تخلیه سیلاب، سیستم تخلیه‌کننده تحتانی و سیستم آبرگیر نیروگاه می‌باشد که مشخصات کلی مخزن و سیستم تخلیه سیلاب در ذیل ارائه شده است [۳].

سد رودبار لرستان دو سیستم تخلیه‌کننده تحتانی دارد که عبارت‌اند از: اصلی و ثانویه. سیستم تخلیه‌کننده تحتانی اصلی

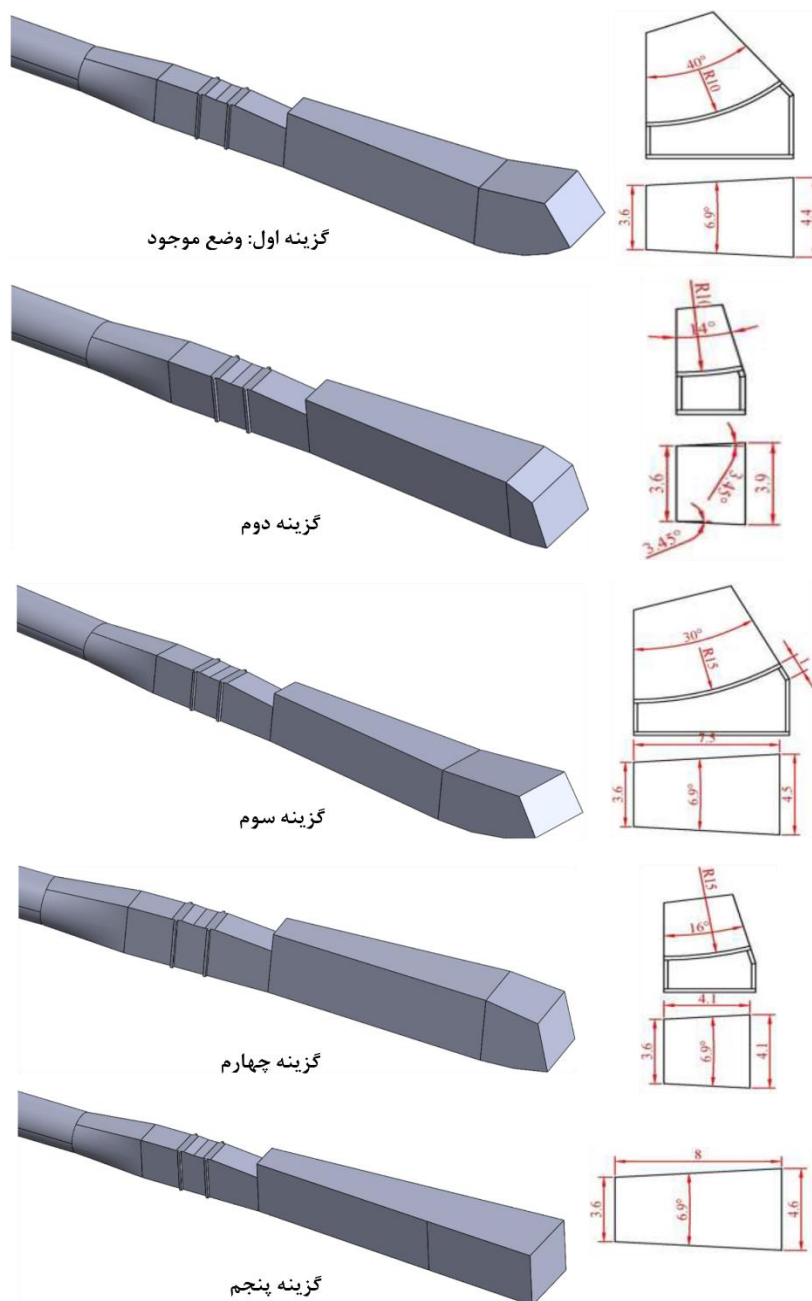
پیش از اجرا در شرایط میدانی، مطالعات مدل فیزیکی آن انجام شده و پس از بهینه‌سازی‌های لازم، اقدام گردید. با این وجود، سیستم تخلیه‌کننده تحتانی ثانویه در کشور چین و با مقیاس بسیار کوچک (۱:۷۰) مطالعات مدل فیزیکی را پشت سر گذاشت و طرح اجرایی در شرایط میدانی، مستخرج از مطالعات مذکور بود. در اولین روزهای بهره‌برداری از این سد، جت خروجی از پرتابه جامی انتهایی به‌جای فرود در فاصله ۷۰ متری از لبه انتهایی (نتایج مدل فیزیکی با مقیاس ۱:۷۰)، در فاصله ۱۶۴ متری فرود آمده و ترانشه پایین دست را به‌طور کامل تخریب نمود. همین امر سبب شد جهت علاج‌بخشی و اصلاح طرح اجرا شده به‌منظور علاج‌بخشی و کاهش طول جت خروجی و فرود آمدن آن در محدوده مجاز، مدل فیزیکی با مقیاس ۱:۲۰ در مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو انجام گردد (شکل ۲). از راهکارهای پیش رو جهت اصلاح و بهینه‌سازی ابعاد جت خروجی، تغییر مشخصات سازه پرتابه جامی تشخیص داده شده است. به همین منظور، پس از بررسی گزینه‌های مختلف سازه پرتابه جامی (تغییرات مختلف در شعاع و زاویه پرتابه جامی و ایجاد واگرایی در جناحین) در مطالعات پیشین، گزینه‌های برتر جهت کاهش طول جت خروجی به شرح زیر شناسایی شد [۳]:

- گزینه اول (وضع موجود): سازه پرتابه جامی به شعاع ۱۰ متر و زاویه ۱۴ درجه
- گزینه دوم: سازه پرتابه جامی به شعاع ۱۰ متر و زاویه ۱۴ درجه
- گزینه سوم: وضعیت موجود سازه پرتابه جامی به شعاع ۱۵ متر و زاویه ۳۰ درجه
- گزینه چهارم: سازه پرتابه جامی به شعاع ۱۵ متر و زاویه ۱۶ درجه
- گزینه پنجم: حذف سازه پرتابه جامی و امتداد کانال واگرا (با زاویه ۳/۴۵ درجه از جناحین)

در شکل ۳ ابعاد و هندسه گزینه‌های مختلف سازه خروجی تخلیه‌کننده تحتانی ثانویه سد رودبار لرستان نشان داده شده است. هدف از ساخت مدل هیدرولیکی سیستم تخلیه‌کننده تحتانی ثانویه سد رودبار لرستان، بررسی ابعاد جت خروجی از پرتابه جامی انتهایی و انتخاب بهترین گزینه برای اصلاح سازه پرتابه جامی جهت کاهش ابعاد جت خروجی می‌باشد. دبی جریان مورد آزمایش جهت اندازه‌گیری پارامترهای هیدرولیکی (سرعت و فشار بعد از مجرای دریچه‌ها) و همچنین اندازه‌گیری ابعاد جت خروجی از پرتابه جامی، معادل ۱۵۹ مترمکعب بر ثانیه (در تراز ۱۷۵۶ متر از سطح دریا) می‌باشد.



شکل ۲ مدل هیدرولیکی سیستم تخلیه‌کننده تحتانی ثانویه سد



شکل ۳ ابعاد و هندسه گزینه‌های مختلف سازه خروجی تخلیه‌کننده تحتانی ثانویه سد رودبار لرستان

۲-۲- مدل عددی مورد استفاده

در این پژوهش، شبه‌سازی جریان دوفازی آب-هوا تخلیه‌کننده تحتانی ثانویه سد رودبار لرستان پس از دریچه خروجی با نرم‌افزار ANSYS CFX انجام شد و تأثیر تغییر شکل سازه خروجی کانال بر طول پرش و جت سیال مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش، ابتدا مدل هندسی در نرم‌افزار SolidWorks ساخته شد و سپس بلوک‌بندی آن در ANSYS DesignModeler تکمیل گردید. در نرم‌افزار ANSYS CFX، معادلات حاکم بر جریان (معادلات ناویر-استوکس) با استفاده از روش حجم محدود حل می‌شوند. در این روش دامنه جریان به حجم‌های کنترل تقسیم می‌شود. معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی برای هر حجم نوشته می‌شود. شارهای ورودی و خروجی از طریق سطوح حجم کنترل محاسبه می‌شوند. مزیت این روش در دقت بالا و پایداری آن برای حل مسائل پیچیده دوفازی است.

شبه‌سازی با مدل دوفازی همگن (Homogeneous Eulerian-Eulerian) همراه با روش Volume of Fluid (VOF) برای

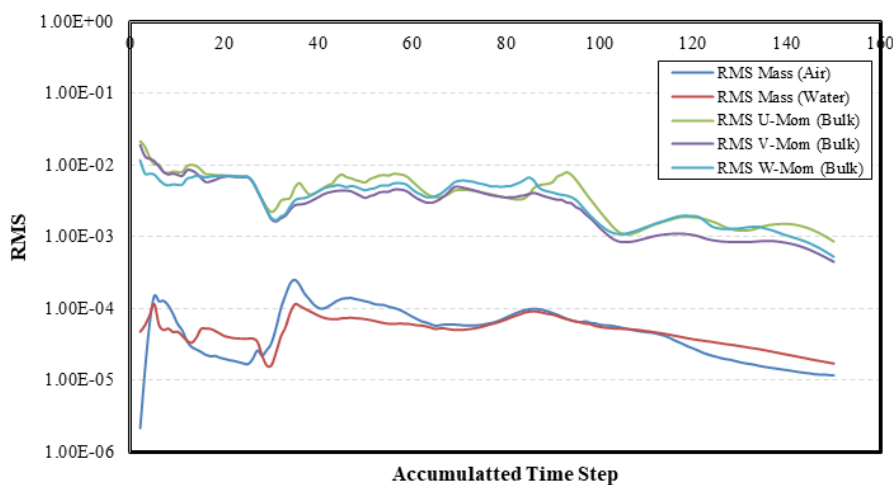
ردیایی سطح آزاد انجام شده است. فازهای آب و هوا به صورت مخلوط همگن با سرعت مشترک در نظر گرفته شده و انتقال جرم بین فازها با مدل کاویتاسیون Schnerr-Sauer فعال گردید.

۲-۳- شرایط مرزی

از آنجاکه در مسائل هیدرولیکی بررسی تنش برشی و رفتار لایه مرزی اهمیت زیادی دارد، در نزدیکی دیوارها از المانهای ریزتر استفاده شد. ضخامت المانهای لایه مرزی پس از بررسی استقلال از شبکه برابر ۴/۵ سانتی متر انتخاب گردید. همچنین، در این پژوهش چهار نوع شرط مرزی مورد استفاده قرار گرفت:

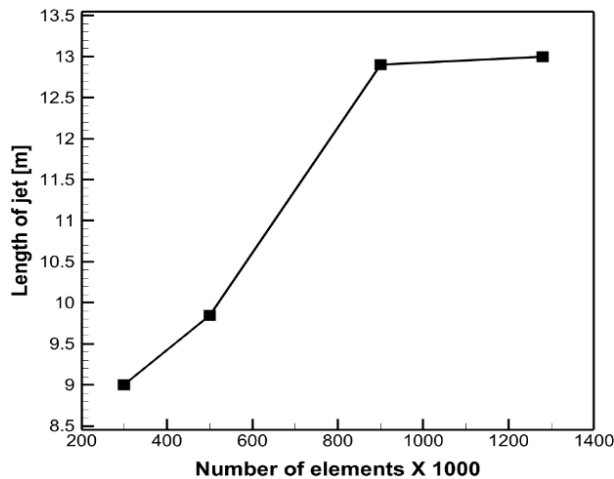
- شرط مرزی ورودی (Inlet): در این مسئله ورودی جریان به صورت دبی جرمی (Mass Flow Rate) تعریف شد. دلیل انتخاب این نوع ورودی، کنترل دقیق تر روی میزان جرم وارد شده به دامنه شبیه سازی و جلوگیری از تغییرات ناخواسته در فشار و سرعت جریان است. این تعریف باعث استقلال شرایط ورودی از تغییرات فشار محیط شد و در نهایت نتایج پایدارتری به دست آمد.
- شرط مرزی دیواره (Wall): تمامی دیوارهای کانال و سطح تحتانی دامنه به صورت دیوار بدون لغزش تعریف شدند. انتخاب این شرط باعث شبیه سازی بهتر رفتار واقعی جریان در نزدیکی مرزها (مانند ایجاد لایه مرزی آشفته) می شود.
- شرط مرزی خروجی باز: در بخش های بالایی و جانبی دامنه، شرط مرزی Opening تعریف شد. این شرط اجازه می دهد سیال هم وارد و هم از دامنه خارج شود. انتخاب این شرط به جای Outlet معمولی به این دلیل بود که در این مدل با جریان دوفازی آب و هوا روبه رو هستیم و احتمال ورود هوا به دامنه وجود دارد. اگر از Outlet ساده استفاده می شد؛ امکان بازگشت جریان هوا در نظر گرفته نمی شد و نتایج غیر واقعی به دست می آمد.
- شرط مرزی اینترفیس (Interface): از آنجاکه هندسه با روش بلوک بندی شبکه گذاری شد، برای انتقال شار جریان بین بلوک ها از شرط مرزی Interface استفاده گردید. Interface باعث می شود جریان به طور طبیعی بین شبکه های مجاور منتقل شود و درز یا گسستگی در شبکه ایجاد نگردد. در واقع، این شرط مرزی نقش حیاتی در پیوستگی نتایج و دقت بالای شبیه سازی دارد.

برای بررسی همگرایی، معیار RMS Residuals انتخاب شد. شبیه سازی زمانی متوقف می شود که تمامی معادلات به مقدار کمتر از 1×10^{-4} همگرا شوند. این مقدار تضمین کرد که تغییرات متغیرها در مراحل حل بسیار کوچک بوده و نتایج نهایی پایدار است. شرایط جریان را به ازای دبی یکسان قرار داده و از طول جت پنج مدل فیزیکی تست گرفته می شود. میزان اتلاف انرژی، ارتفاع پرتابه جامی و ... را با یکدیگر مقایسه خواهیم کرد. مدل فیزیکی آزمایشگاهی را معیار قرار خواهیم داد. در شکل ۴ مقدار RMS برای بررسی همگرایی نشان داده شده است.



شکل ۴ معیار RMS Residuals جهت بررسی همگرایی

برای بررسی استقلال از شبکه و تعداد المان (مش) بهینه، چهار حالت با تعداد المان‌های مختلف ۳۰۰۰۰۰، ۵۱۰۰۰، ۹۰۰۰۰۰ و ۱۲۸۰۰۰۰ ایجاد شد. در هر حالت، طول جت خروجی اندازه‌گیری گردید و با نتایج متناظر بدست آمده از مدل فیزیکی مقایسه شد. شکل ۵ نشانگر طول جت خروجی برای تعداد المان‌های مختلف است. گفتنی است ابعاد طول جت ارائه‌شده، در مقیاس مدل فیزیکی می‌باشد.



شکل ۵ طول جت خروجی برای تعداد المان‌های مختلف

همان‌طور که مشاهده می‌شود، اختلاف بین نتایج شبکه‌های با تعداد المان ۵۱۰،۰۰۰ و ۹۰۰،۰۰۰ قابل توجه بود. همچنین با افزایش تعداد المان‌ها به ۹۰۰،۰۰۰، نتایج به مقادیر پایدار نزدیک شد. اختلاف نتایج بین شبکه‌های ۹۰۰،۰۰۰ و ۱،۲۸۰،۰۰۰ کمتر از ۱/۵ درصد بود. با توجه به این نتایج، شبکه با ۹۰۰،۰۰۰ المان به‌عنوان شبکه بهینه انتخاب شد؛ زیرا ضمن داشتن دقت مناسب، هزینه محاسباتی کمتری نسبت به شبکه ۱،۲۸۰،۰۰۰ المانی داشت. در ادامه، کلیه شبه‌سازی‌های عددی با این تعداد المان انجام خواهد شد.

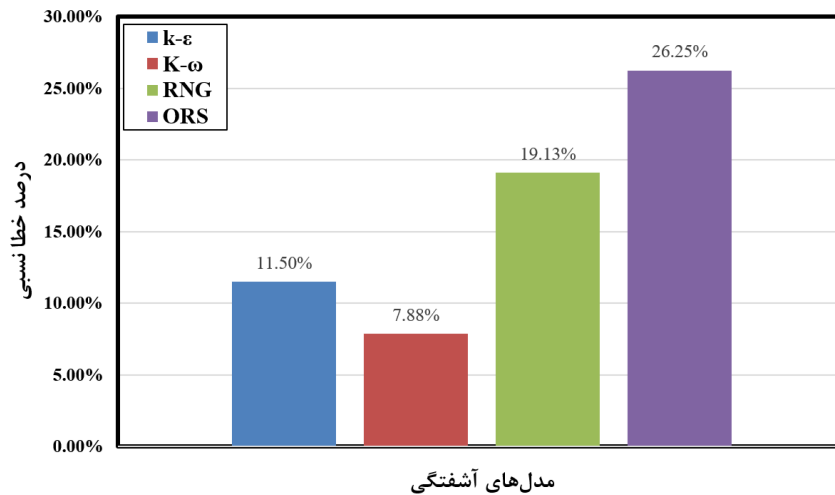
۲-۴- اعتبارسنجی مدل شبه‌سازی

به‌منظور اعتبارسنجی مدل عددی، نتایج شبه‌سازی برای پارامتر طول جت خروجی در شرایط گزینه سوم و درصد بازشدگی دریچه ۵۰ درصد، با داده‌های آزمایشگاهی موجود مورد مقایسه قرار گرفت. اختلاف نسبی مشاهده شده در طول جت، نشان‌دهنده حساسیت مدل به دقت هندسه ورودی کیفیت شبکه‌بندی بود. مقدار طول جت به‌دست‌آمده از مدل عددی شبه‌سازی‌شده در مقایسه با نتایج مدل فیزیکی، حداکثر خطای نسبی برابر با ۷/۸۸ درصد را نشان می‌دهد که این میزان خطا در محدوده قابل قبول برای تحلیل‌های مهندسی قرار دارد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تعیین مدل‌های آشفتگی برتر

در شبه‌سازی جریان‌های آشفته، انتخاب مدل آشفتگی مناسب تأثیر مستقیمی بر دقت نتایج دارد. در این پژوهش چهار مدل اصلی $k-\epsilon$ RNG، $k-\omega$ SST، $k-\epsilon$ Standard و $k-\epsilon$ Realisable (ORS $k-\epsilon$) بررسی شدند. این مدل‌ها با داده‌های آزمایشگاهی و مطالعات معتبر برای انتخاب مناسب‌ترین گزینه در شبه‌سازی جریان‌های دوفازی سد مقایسه شدند. پس از محاسبه درصد خطای نسبی، در شکل ۶ مقدار خطای نسبی مدل‌های آشفتگی استفاده شده در شبه‌سازی عددی رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل $k-\omega$ (با خطای ۷/۸۸ درصد) کم‌ترین خطای نسبی در میان مدل‌های آشفتگی مورد مطالعه است و در ادامه، سایر شبه‌سازی‌ها با این مدل آشفتگی انجام خواهد شد.



شکل ۶ نمودار درصد خطای مدل های آشفتگی استفاده شده در شبیه سازی عددی

۲-۳- بررسی نتایج شبیه سازی عددی گزینه های مختلف

پس از انجام شبیه سازی های عددی دقیق با استفاده از یک شبکه مش بندی شامل ۹۰۰,۰۰۰ المان و به کارگیری مدل آشفتگی $k-\omega$ (مطابق با جزئیات شکل ۳)، طول جت خروجی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. نتایج این شبیه سازی ها، به تفکیک میزان بازشدگی دریچه (۱۰۰ و ۵۰ درصد)، به ترتیب در جداول ۱ و ۲ درج شده اند. برای تحلیل جامع تر و ارزیابی بهتر، در این جداول مقادیر حداکثر (فوقانی) و حداقل (تحتانی) طول جت خروجی نیز اندازه گیری و ارائه شده است. همچنین، برای نمایش بصری نتایج حاصل از گزینه های مختلف، شکل های ۷ تا ۱۰ رسم شده اند؛ در این نمودارها، محور عمودی نشان دهنده ارتفاع پرتابه جامی و محور افقی نمایانگر طول جت خروجی (برحسب متر) است.

جدول ۱ نتایج شبیه سازی عددی با بازشدگی دریچه به میزان ۱۰۰ درصد

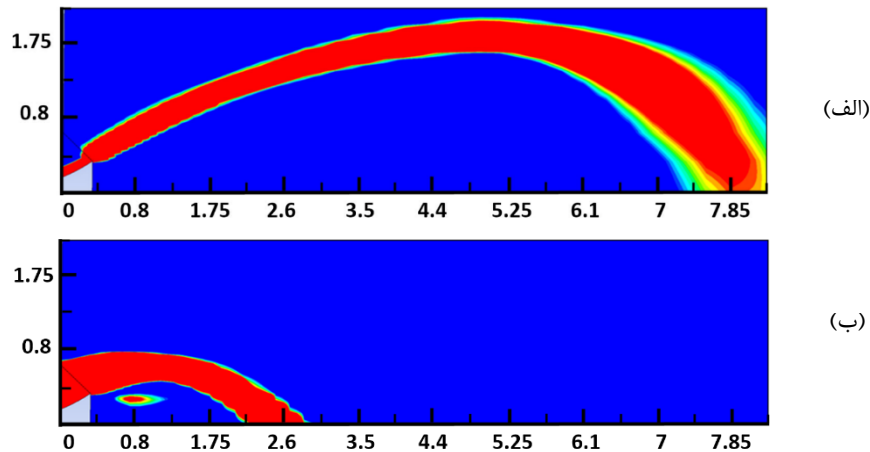
Q_p (m ³ /s)	طول جت (متر)		مشخصات تخلیه کننده تحتانی		مدل فیزیکی
	تحتانی	فوقانی	زاویه (درجه)	شعاع (متر)	
۰/۰۹۱	۱/۳۵	۲/۰۵	۴۰	۱۰	۱
۰/۰۹۱	۰/۴۴	۲/۰۳	۱۴	۱۰	۲
۰/۰۹۱	۰/۹۴	۱/۷۵	۳۰	۱۵	۳
۰/۰۹۱	۰/۴۴	۱/۷۳	۱۶	۱۵	۴
۰/۰۹۱	۰	۱/۶۴	-	-	۵

جدول ۲ نتایج شبیه سازی عددی با بازشدگی دریچه به میزان ۵۰ درصد

Q_p (m ³ /s)	طول جت (متر)		مشخصات تخلیه کننده تحتانی		مدل فیزیکی
	تحتانی	فوقانی	زاویه (درجه)	شعاع (متر)	
۰/۰۵۴	۷/۰۳	۷/۵۷	۴۰	۱۰	۱
۰/۰۵۴	۳/۹	۴/۷۷	۱۴	۱۰	۲
۰/۰۵۴	۶/۵۴	۷/۶۹	۳۰	۱۵	۳
۰/۰۵۴	۴/۶۷	۵/۶۳	۱۶	۱۵	۴
۰/۰۵۴	۰	۱/۴۷	-	-	۵

برای گزینه اول (شکل ۷) که با شعاع انحنای ۱۰ متر و زاویه پرتابه جامی ۴۰ درجه طراحی شده است، انرژی جنبشی جت به خوبی به انرژی پتانسیل تبدیل شده و از نظر کاهش خطر فرسایش موضعی پایاب مزیت دارد؛ زیرا تماس اولیه جریان با سطح پایین دست در فاصله دورتر رخ می دهد. با این وجود، زاویه زیاد موجب افزایش سطح مقطع تماس جت با هوا شده و بنابراین

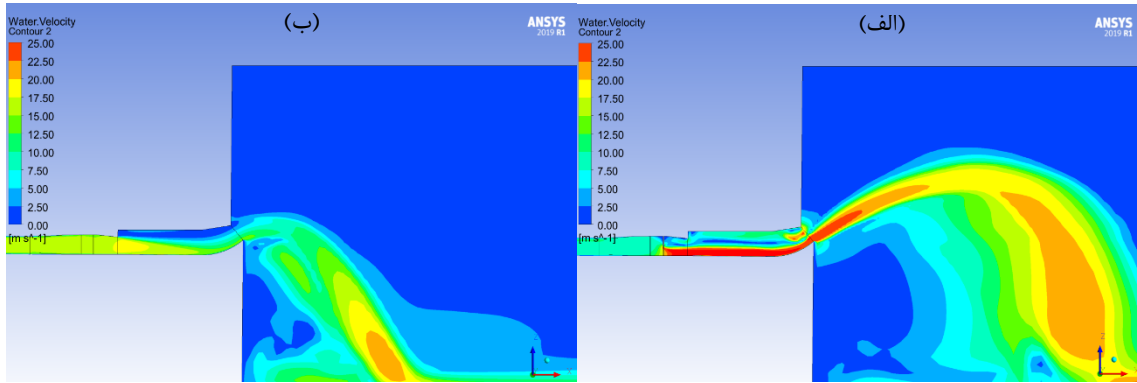
اختلاط جریان بیشتر خواهد بود. این موضوع می‌تواند منجر به افت انرژی و پراکندگی جریان شود. نتایج نشان می‌دهد که طول جت مربوط به گزینه اول، بلند است و در مقایسه با چهار مدل شبه‌سازی شده دیگر، در مکان دوم قرار دارد. نکته حائز اهمیت این است که این مدل، تنها اندکی از مدل سوم پیشی گرفته، درحالی‌که اختلاف فاحشی با سایر مدل‌ها دارد. این پدیده مقایسه‌ای در داده‌های مربوط به بازشدگی ۵۰ درصد نیز به‌طور کامل تأیید می‌شود.



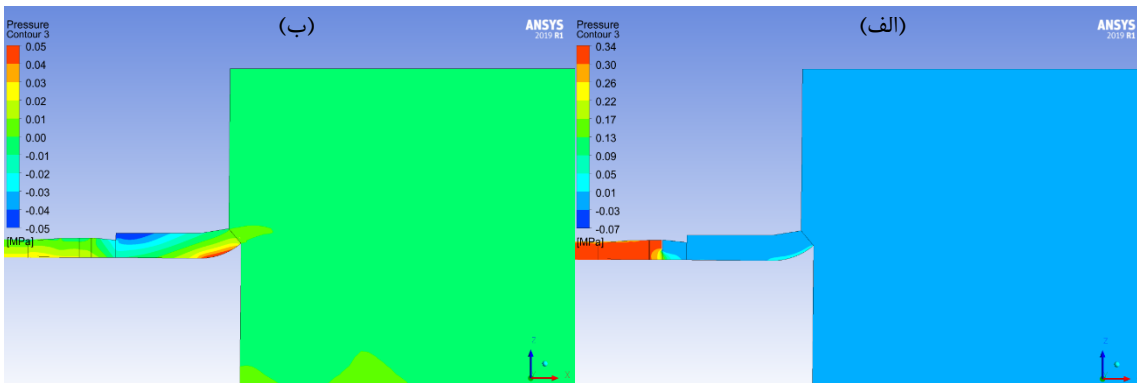
شکل ۷ طول جت خروجی گزینه اول (الف) با بازشدگی درجه به‌میزان ۵۰ درصد و (ب) با بازشدگی درجه به‌میزان ۱۰۰ درصد

در شکل ۸، کانتور سرعت جریان خروجی گزینه اول تخلیه‌کننده تحتانی را از لحظه خروج تا محل برخورد با پایین‌دست نشان می‌دهد. همان‌طور که برای بازشدگی درجه به‌میزان ۵۰ درصد مشاهده می‌شود، نزدیک دهانه، نوار باریک قرمز و نارنجی نمایانگر ناحیه هسته جت با بیشترین سرعت (حدود ۲۰ تا ۲۵ متر بر ثانیه) است که تا فاصله‌ای کوتاه تقریباً یکنواخت باقی می‌ماند. با فاصله گرفتن از دهانه و حرکت روی پرتابه جامی، پهن‌شدن ناحیه رنگ‌های زرد و سبز نشان می‌دهد که به‌دلیل اختلاط شدید با آب ساکن پیرامون، سرعت جت به‌تدریج کاهش یافته و انرژی آن مستهلک می‌شود. در ناحیه بالای جت، گستره آبی‌رنگ بیانگر سرعت‌های بسیار کم و تشکیل لایه نسبتاً آرام است، درحالی‌که در پایین جت، تغییرات تند رنگ حاکی از گردادیان بالای سرعت و احتمال وجود تنش برشی زیاد و مستعد فرسایش بستر پایین‌دست است.

همچنین در شکل ۹ توزیع فشار نسبی در خروجی تخلیه‌کننده تحتانی و روی پرتابه جامی گزینه اول را نشان می‌دهد. غالب ناحیه پایین‌دست در محدوده فشار نزدیک به صفر مگاپاسکال قرار دارد که بیانگر شرایطی نزدیک به فشار مرجع/اتمسفردر توده آب دور از جت است. به‌ویژه برای بازشدگی درجه به‌میزان ۱۰۰ درصد، درون مجرا و در ناحیه تماس جت با سطح پرتابه، گردادیان فشار از مقادیر منفی (ناحیه مکشی و افت فشار) تا مقادیر مثبت در محل تغییر جهت جریان را نشان می‌دهد. این تمرکز تغییرات فشار در اطراف لبه پرتابه جامی و روی سطح بالادست آن، محل‌های محتمل برای بروز پدیده‌هایی مانند کاویتاسیون و تنش‌های موضعی بر سازه را مشخص می‌کند و تأکید می‌کند که طراحی و علاج‌بخشی باید بر کنترل این نواحی بحرانی متمرکز شود.

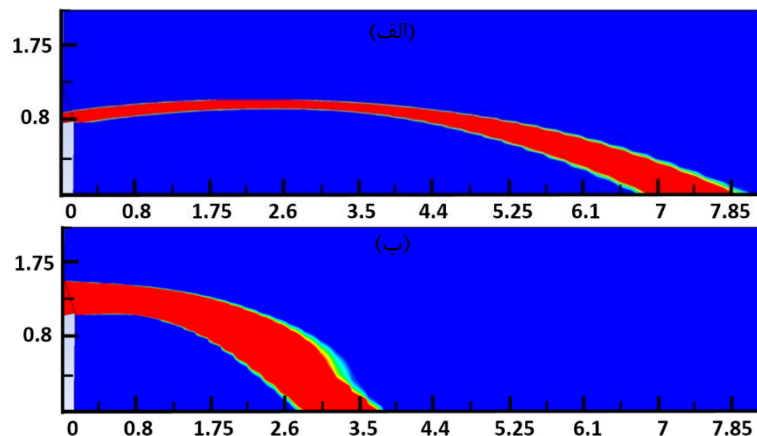


شکل ۸ کانتور سرعت در گزینه اول (الف) با بازشدگی درجه به میزان ۵۰ درصد و (ب) با بازشدگی درجه به میزان ۱۰۰ درصد

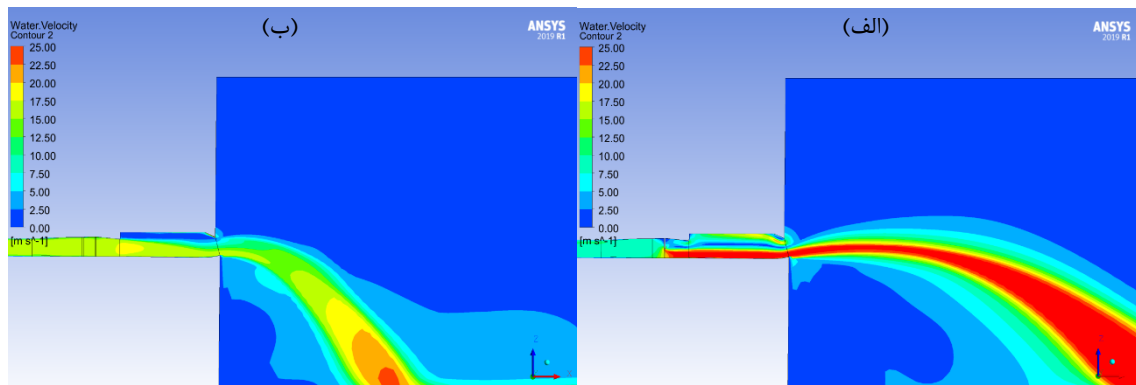


شکل ۹ کانتور فشار در گزینه اول (الف) با بازشدگی درجه به میزان ۵۰ درصد و (ب) با بازشدگی درجه به میزان ۱۰۰ درصد

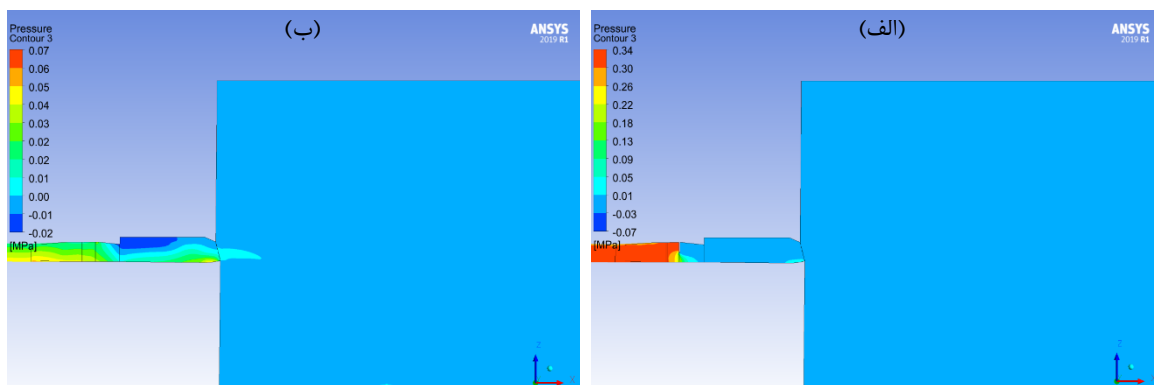
در گزینه دوم (شکل‌های ۱۰ تا ۱۲) شعاع ثابت نگهداشته شده ($R = 10 \text{ m}$) و زاویه پرتابه جامی به ۱۴ درجه کاهش یافته است. کاهش زاویه سبب می‌شود جت در فاصله نزدیک‌تری به پایاب برخورد کند و ارتفاع پرتاب آن کمتر باشد. این ویژگی موجب می‌شود بخش بیشتری از انرژی جریان به صورت مستقیم به بستر پایاب منتقل شود. در مقایسه با گزینه اول، خطر فرسایش در محل برخورد افزایش می‌یابد. اما در مقابل پایداری مسیر جریان و کاهش آشفته‌گی در فاز میانی پرتاب مشاهده می‌شود. از این رو، مدل دوم می‌تواند در شرایطی که پایاب مقاوم‌سازی شده و خطر فرسایش کمتر است، مناسب‌تر باشد. همچنین در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ کانتورهای سرعت و فشار در خروجی تخلیه‌کننده تحتانی و روی پرتابه جامی گزینه دوم نشان داده شده است.



شکل ۱۰ طول جت خروجی گزینه دوم (الف) با بازشدگی درجه به میزان ۵۰ درصد و (ب) با بازشدگی درجه به میزان ۱۰۰ درصد

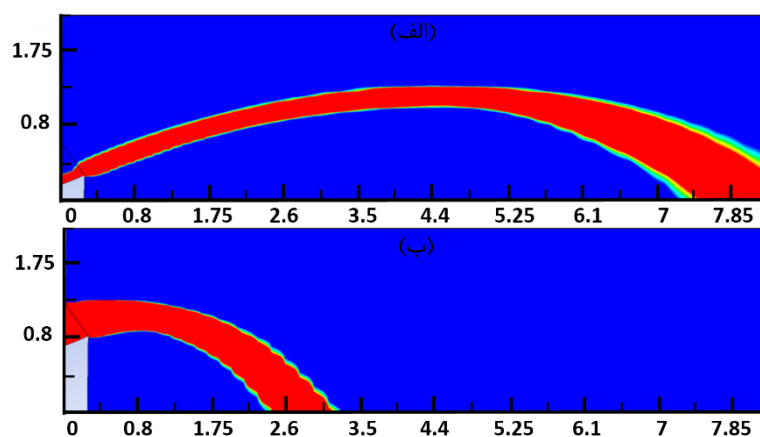


شکل ۱۱ کانتور سرعت در گزینه دوم (الف) با بازشدگی درجه به‌میزان ۵۰ درصد و (ب) با بازشدگی درجه به‌میزان ۱۰۰ درصد



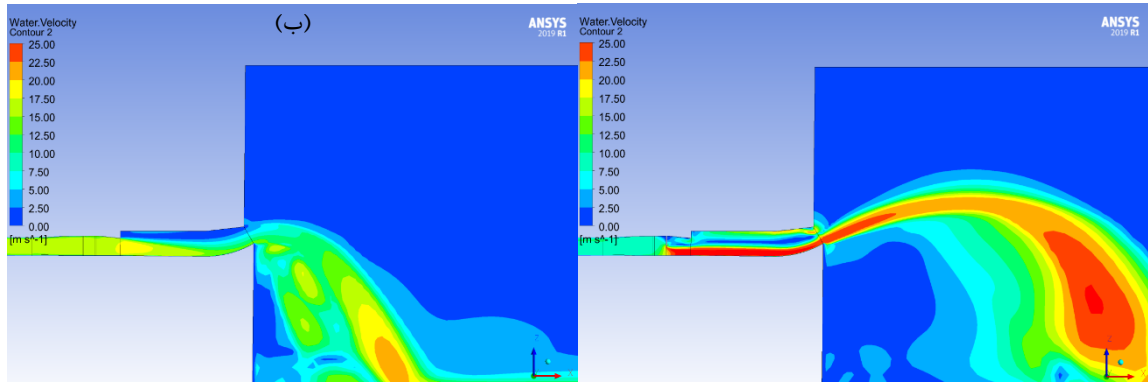
شکل ۱۲ کانتور فشار در گزینه دوم (الف) با بازشدگی درجه به‌میزان ۵۰ درصد و (ب) با بازشدگی درجه به‌میزان ۱۰۰ درصد

برای گزینه سوم (شکل‌های ۱۳ تا ۱۵) که با شعاع ۱۵ متر و زاویه پرتابه جامی به‌میزان ۳۰ درجه طراحی شده است. افزایش شعاع نسبت به مدل‌های قبلی سبب کاهش انحنای مسیر جریان و در نتیجه آرام‌تر شدن تغییر جهت آب در حین خروج می‌شود. این امر منجر به کاهش تمرکز تنش بر روی بدنه پرتابه جامی و افزایش عمر مفید سازه می‌گردد. از سوی دیگر، زاویه ۳۰ درجه ترکیبی متعادل از پرتاب مناسب و فاصله برخورد با پایاب فراهم می‌کند. در مقایسه با گزینه‌های اول و دوم، گزینه سوم شرایطی پایدارتر و بهینه‌تر برای کاهش همزمان خطر فرسایش و افت انرژی ایجاد می‌نماید. در این گزینه، طول جت بیش‌ترین اندازه را دارد.

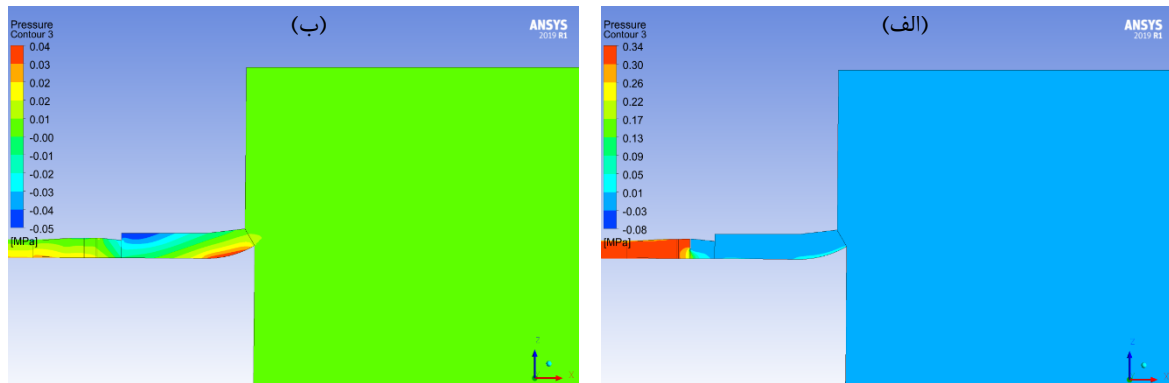


شکل ۱۳ طول جت خروجی گزینه سوم (الف) با بازشدگی درجه به‌میزان ۵۰ درصد و (ب) با بازشدگی درجه به‌میزان ۱۰۰ درصد

(الف)



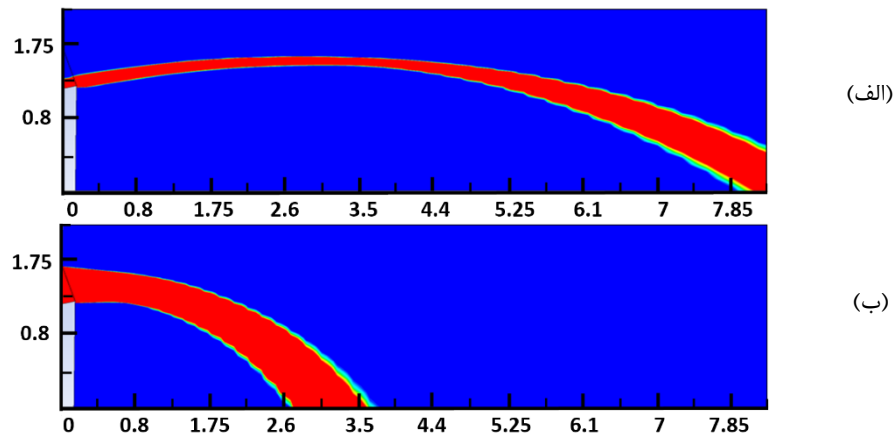
شکل ۱۴ کانتور سرعت در گزینه سوم (الف) با بازشدگی در پیچه به میزان ۵۰ درصد و (ب) با بازشدگی در پیچه به میزان ۱۰۰ درصد



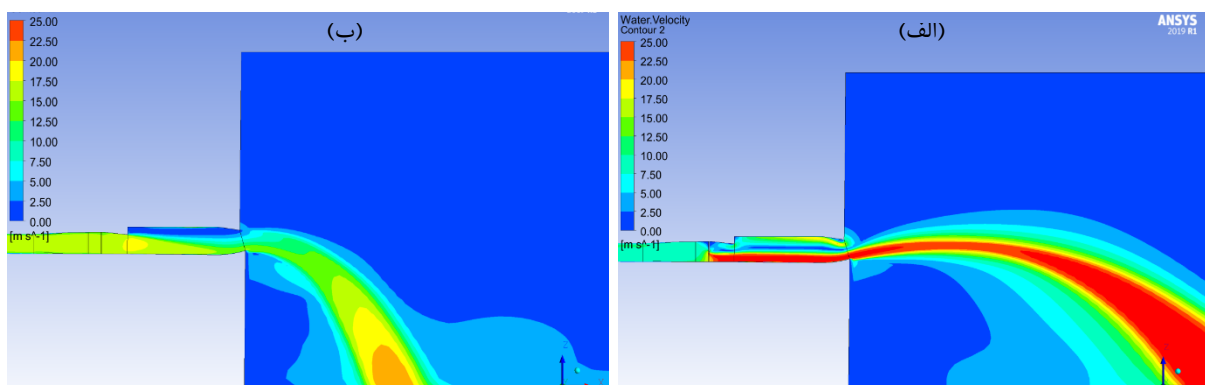
شکل ۱۵ کانتور فشار در گزینه سوم (الف) با بازشدگی در پیچه به میزان ۵۰ درصد و (ب) با بازشدگی در پیچه به میزان ۱۰۰ درصد

در گزینه چهارم (شکل‌های ۱۶ تا ۱۸)، شعاع مشابه مدل سوم انتخاب شده ولی زاویه پرتابه جامی به ۱۶ درجه کاهش یافته است. در نتیجه، جت خروجی در فاصله نزدیک‌تری به پایاب فرود می‌آید و بخش بیشتری از انرژی آن به‌طور مستقیم به بستر منتقل می‌شود. افزایش شعاع تا حدی از شدت برخورد می‌کاهد، اما همچنان فشار موضعی بالایی در محل برخورد انتظار می‌رود. در شرایطی که بستر پایاب از جنس مقاوم یا دارای حوضچه آرامش طراحی شده باشد، این مدل می‌تواند عملکرد مناسبی داشته باشد. اما در مقایسه با مدل سوم، خطر فرسایش و آبشستگی بالاتر بوده و طول پرتاب کوتاه‌تر است.

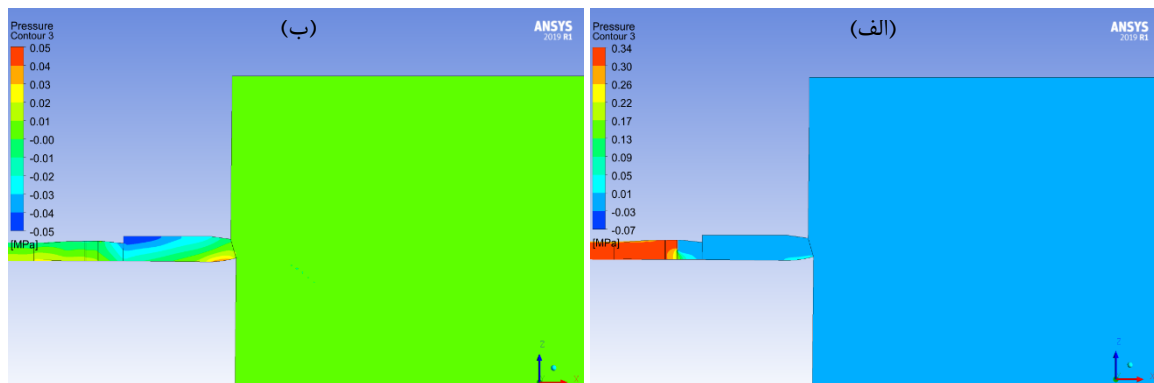
از نظر هیدرولیکی، زاویه ۱۶ درجه سبب می‌شود که جت بیشتر در جهت محوری و با حداقل شیب خروجی حرکت کند؛ این حالت منجر به کاهش طول پرتاب عمودی و افزایش انرژی برخورد محلی در پایاب می‌شود. برای سازه‌هایی که پایاب آن‌ها تقویت شده یا کاهش انرژی در محل برخورد مورد نظر است، این طراحی کاربردی‌تر است. کاهش زاویه همراه با افزایش شعاع (مقایسه گزینه ۴ با گزینه ۲) سبب شده است که شدت برخورد با بستر کاهش یابد؛ اما نه به‌میزان مدل‌هایی که هم زاویه و هم شعاع کوچک یا بزرگ متفاوتی دارند.



شکل ۱۶ طول جت خروجی گزینه چهارم (الف) با بازشدگی در ۵۰ درصد و (ب) با بازشدگی در ۱۰۰ درصد

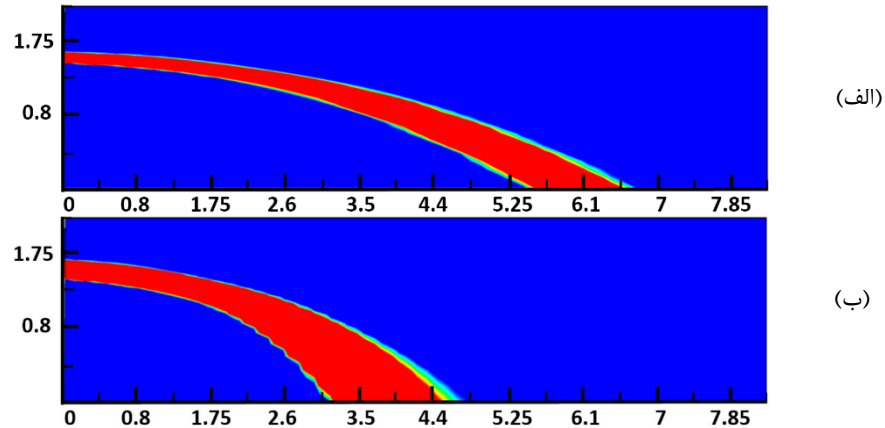


شکل ۱۷ کانتور سرعت در گزینه چهارم (الف) با بازشدگی در ۵۰ درصد و (ب) با بازشدگی در ۱۰۰ درصد

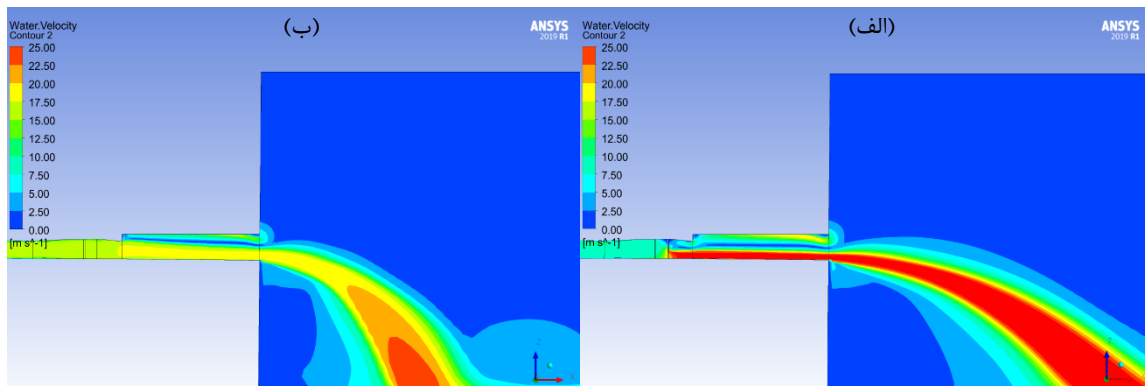


شکل ۱۸ کانتور فشار در گزینه چهارم (الف) با بازشدگی در ۵۰ درصد و (ب) با بازشدگی در ۱۰۰ درصد

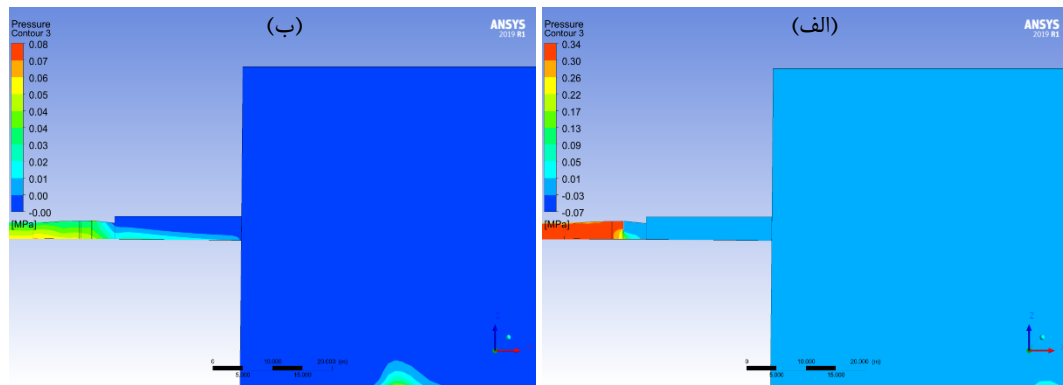
گزینه پنجم (شکل‌های ۱۹ تا ۲۱) به جای استفاده از پرتابه جامی منحنی، به صورت یک کانال واگرا طراحی شده است. در این حالت، جریان بدون انحراف قابل توجه به سمت پایین دست هدایت می‌شود. این مدل ساده‌ترین هندسه را دارد و هزینه ساخت آن نسبت به سایر مدل‌ها کمتر است. با این وجود، به دلیل فقدان زاویه پرتابه جامی، جت خروجی به طور مستقیم با پایاب برخورد کرده و احتمال فرسایش و آبشستگی در پایین دست افزایش می‌یابد. این مدل بیشتر در شرایطی کاربرد دارد که پایاب مقاوم‌سازی کامل شده یا انرژی اضافی جریان به روش‌های دیگری مستهلک شود. مدل پنجم ساختاری متفاوت با چهار پرتابه جامی منحنی دارد. در این هندسه، جریان در قالب یک کانال مستقیم یا با واگرایی کنترل شده هدایت می‌شود و پرتاب جت به صورت باز انجام می‌پذیرد. این گزینه از نظر ساخت و نگهداری ساده‌تر بوده و هزینه اجرایی پایینی دارند. اما به دلیل اینکه انرژی جنبشی در بردار محوری متمرکز می‌ماند؛ برخورد مستقیم با بستر می‌تواند منجر به فرسایش شدید شود، مگر اینکه مواردی نظیر حفاظت بستر، پوشش سنگی یا حوضچه آرامش در پایین دست تعبیه شوند.



شکل ۱۹ طول جت خروجی گزینه پنجم (الف) با بازشدگی درجه به میزان ۵۰ درصد و (ب) با بازشدگی درجه به میزان ۱۰۰ درصد



شکل ۲۰ کانتور سرعت در گزینه پنجم (الف) با بازشدگی درجه به میزان ۵۰ درصد و (ب) با بازشدگی درجه به میزان ۱۰۰ درصد



شکل ۲۱ کانتور فشار در گزینه پنجم (الف) با بازشدگی درجه به میزان ۵۰ درصد و (ب) با بازشدگی درجه به میزان ۱۰۰ درصد

تحلیل نتایج شبیه‌سازی عددی گزینه‌های پیشنهادی نشان داد که انتخاب هندسه، به شدت به شرایط پایاب و اهداف طراحی وابسته است. مدل‌های با زاویه زیاد (مانند گزینه اول) طول پرتاب بیشتری دارند و تماس جریان با پایاب در فاصله دورتر اتفاق می‌افتد، اما با آشفتگی بالاتر همراه هستند. در مقابل، مدل‌هایی با زاویه کم (مانند گزینه‌های دوم و چهارم) جت را در نزدیکی سد به پایاب منتقل می‌کنند و بنابراین پایداری پرتابه جامی کاهش می‌یابد. افزایش شعاع پرتابه جامی (گزینه‌های سوم و چهارم) موجب توزیع ملایم‌تر تنش‌ها و بهبود عملکرد سازه می‌شود. گزینه پنجم ساده‌ترین راهکار است؛ اما بیشترین خطر را از نظر فرسایش به همراه دارد. در مجموع، گزینه سوم به دلیل توازن مناسب میان طول پرتابه جامی، کاهش فرسایش و پایداری جریان، عملکرد بهینه‌تری نسبت به سایر مدل‌ها دارد.

۳-۳- بررسی پدیده کاویتاسیون

به‌طورمعمول زمانی که سرعت جریان در برخی از سازه‌های هیدرولیکی از یک حد مجاز فراتر رود، آن سازه در معرض خسارت ناشی از خوردگی قرار می‌گیرد. به فرایند تبخیر در اثر کاهش فشار موضعی در دمای ثابت، خلا‌زایی یا کاویتاسیون گفته می‌شود. برای جلوگیری از پدیده کاویتاسیون باید موقعیت نقاطی که در آنها ممکن است با افزایش سرعت، فشار تا حد فشار بخار کاهش یابد، شناسایی گردد. خسارت کاویتاسیون با عوامل و پارامترهای زیادی مرتبط است؛ از جمله می‌توان به سرعت جریان (u)، مقاومت سطحی مصالح سازه (S)، مدت‌زمان بهره‌برداری و میزان هوای جریان (C) اشاره نمود. اما آزمایشات و نتایج حاصل از نمونه‌های اولیه منجر به یک روش سنتی شده است که برای جلوگیری از خسارات ناشی از کاویتاسیون، تنها از شاخص وابسته به سرعت استفاده می‌کند. در این راستا از معیاری به نام شاخص کاویتاسیون استفاده می‌شود که به‌صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\sigma_c = \frac{p_0 - p_v}{(\rho u^2)/2} \quad (1)$$

در این رابطه، σ شاخص کاویتاسیون، p_0 فشار موضعی، p_v فشار بخار آب در دمای موردنظر و u سرعت جریان در نقطه موردنظر است. کاویتاسیون زمانی اتفاق می‌افتد که σ کوچک‌تر یا مساوی با مقدار σ_{cr} گردد. این مقدار بحرانی به‌طور عمده به هندسه جریان، شکل و ارتفاع ناهمواری‌های سطح و موقعیت نقطه موردنظر (که در اینجا فشار و سرعت است) بستگی دارد. بر اساس تحقیقات فالوی [۱۶]، تا زمانی که $\sigma > 1/8$ باشد، کاویتاسیون رخ نخواهد داد. به‌عبارت‌دیگر، پدیده کاویتاسیون زمانی رخ می‌دهد که شاخص کاویتاسیون بزرگ‌تر یا مساوی $1/8$ گردد. همچنین، پدیده کاویتاسیون زمانی جدی تلقی می‌شود؛ که سرعت جریان به ۲۵ متر بر ثانیه برسد. در صورت وجود قوس قائم در کف برای محاسبه عدد کاویتاسیون از رابطه‌ی زیر استفاده می‌شود:

$$\sigma_c = \frac{\frac{p_a + h \cos \alpha + \frac{h}{g} \frac{V^2}{R} - p_v}{\gamma}}{\frac{V_0^2}{2}} \quad (2)$$

در این رابطه، α زاویه شیب کف است. در بررسی گزینه چهارم، فشار موضعی و سرعت جریان در مقاطع مختلف کانال و جت محاسبه و شاخص کاویتاسیون σ تعیین شد. این عدد معیاری برای سنجش احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون است و طبق تعریف، نسبت اختلاف فشار موضعی و فشار بخار به فشار دینامیکی جریان را نشان می‌دهد. در گزینه چهارم نتایج نشان داد که در برخی نقاط، فشار موضعی حتی به مقادیر منفی یا نزدیک به فشار بخار رسیده و در نتیجه شاخص کاویتاسیون مقادیر بسیار کوچک یا منفی داشته است. این موضوع نشان‌دهنده شرایط مستعد کاویتاسیون به‌ویژه در بازشدگی ۱۰۰ درصد دریچه است.

جدول ۳ مقادیر فشار و شاخص کاویتاسیون برای گزینه چهارم و بازشدگی دریچه ۵۰ و ۱۰۰ درصد

Bottom	فاصله (m)	V(m/s)	بازشدگی دریچه ۵۰ درصد			بازشدگی دریچه ۱۰۰ درصد		
			p (kPa)	σ	وضعیت	p (kPa)	σ	وضعیت
GCB1	۰	۱۷/۳۶	۱۸۵/۸	۱/۲۱	ایمن	۹/۶۸	۰/۰۴۹	خطر
GCB2	۰/۸۹	۱۲/۵۶	۸۴/۳۸	۱/۰۴	ایمن	۵/۱۹	۰/۰۳۶	خطر
GCB3	۱/۷۹	۱۳/۸۱	۳۲	۰/۳۱۱	ایمن	-۰/۷۷	-۰/۰۳۳	خطر
GCB4	۲/۶۸	۱۴/۷۳	۱۲/۹۴	۰/۰۹۸	خطر	-۸/۴۸	-۰/۱	کاویتاسیون محتمل

در مدل چهارم مشاهده شد که در بازشدگی ۵۰ درصد دریچه جریان، فشارها عموماً در محدوده ایمن‌تر قرار دارند و اعداد کاویتاسیون بالاتر از $0/3$ به دست آمدند. این یعنی در حالت نیمه‌باز بودن سازه، احتمال تشکیل حباب‌های بخار و ایجاد کاویتاسیون پایین است. اما در بازشدگی ۱۰۰ درصد، در چندین نقطه فشار موضعی به کمتر از فشار بخار رسید و عدد کاویتاسیون منفی محاسبه شد. این وضعیت به معنای وقوع قطعی پدیده کاویتاسیون در آن مقاطع است. از نظر هیدرولیکی، افزایش سرعت موضعی و کاهش فشار استاتیک جریان در اثر بازشدگی کامل سازه علت وقوع این پدیده می‌باشد.

۴- نتیجه گیری

بررسی مدل فیزیکی نشان داد که طول جت خروجی تابعی از دبی عبوری، شرایط مرزی و هندسه کانال واگرا است. داده‌های آزمایشگاهی بیانگر آن بود که با افزایش دبی، طول جت به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. این موضوع نقش مهمی در تعیین الگوی جریان پایین دست دارد. شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS CFX توانست روند تغییرات طول جت را بازتولید نماید؛ هرچند در مقادیر مطلق اختلاف‌هایی نسبت به داده‌های آزمایشگاهی مشاهده شد. فرآیند شبکه‌بندی و بررسی استقلال از شبکه نشان داد که استفاده از المان‌های مکعبی با حدود ۹۰۰ هزار المان توانست خطای طول جت خروجی را به کمتر از ۸ درصد کاهش دهد. پس از ارزیابی مدل‌های آشفتگی مختلف، مدل $k-\omega$ با خطای متوسط نسبی $7/88$ درصد به عنوان مدل آشفتگی برتر انتخاب شد. همچنین، نتایج نشان داد که در حالت دبی عبوری بیشینه، طول جت شبیه‌سازی شده حدود ۲۲ درصد کوتاه‌تر از حالت اولیه طراحی شبیه‌سازی گردید. تحلیل فشارهای موضعی و شاخص کاویتاسیون نیز نشان داد که در نواحی پرسرعت جریان و در نزدیکی دریچه، شاخص کاویتاسیون به مقدار حداقل $0/78$ رسید که نزدیک به آستانه وقوع پدیده کاویتاسیون است. در حالی که مقادیر این ضریب در بخش‌های میانی و انتهایی جت بالاتر از $1/2$ بوده و احتمال وقوع کاویتاسیون در این نواحی بسیار ناچیز ارزیابی شد. به طور کلی، یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که شبیه‌سازی عددی می‌تواند با دقت بالای بیش از ۹۵ درصد در شبیه‌سازی طول جت و ارزیابی شرایط کاویتاسیون مورد استفاده قرار گیرد و ابزار کارآمدی برای تحلیل و بهینه‌سازی طراحی تخلیه‌کننده‌های تحتانی سدها محسوب می‌شود.

این پژوهش نشان داد که ترکیب روش‌های آزمایشگاهی و عددی ابزاری کارآمد برای تحلیل رفتار هیدرولیکی تخلیه‌کننده‌ها است. نتایج به دست آمده نه تنها طول جت را با دقت قابل قبول شبیه‌سازی نمود؛ بلکه امکان ارزیابی شرایط کاویتاسیون را نیز فراهم کرد. با توجه به همخوانی نسبی داده‌های شبیه‌سازی و آزمایشگاهی، می‌توان به اعتبار مدل عددی اعتماد داشت و آن را در تحلیل‌های آینده به کار گرفت. یافته‌های پژوهش می‌تواند به طور مستقیم در بهره‌برداری ایمن از سد رودبار لرستان و طراحی بهینه تخلیه‌کننده‌های مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

۵- مراجع

- [1] Dargahi B. Flow characteristics of bottom outlets with moving gates. *Journal of Hydraulic Research*. 2010; 48(4): 476–482. doi:10.1080/00221686.2010.507001.
- [2] Nazari S. and Palhang M. Numerical simulation of air–water two-phase flow over dam spillways using CFD. *Journal of Hydraulic Research*. 2011; 49(3): 366–374.
- [3] Water Research Institute. Hydraulic model of the secondary bottom outlet system of Rudbar Lorestan dam (Final Report). 2019.
- [4] Ahmadi H. and Nemati M. Numerical investigation of the effect of the curvature of the duct before the service gate of the lower dischargers on the flow hydraulics. *Iranian Hydraulic Association, Scientific-Research Journal*. 2017; 12(3): 61-68.
- [5] Yamini O. A. Mousavi H.S. Kavianpour M.R. Safari Ghaleh R. Hydrodynamic Performance and Cavitation Analysis in Bottom Outlets of Dam Using CFD Modelling. *Advances in Civil Engineering*. 2021; <https://doi.org/10.1155/2021/5529792>.
- [6] Taheri Aghdam A. Salmasi F. Hosseinzadeh Dalir A. Abbaspour A. Experimental and Numerical Investigation of the Trajectory of Outlet Jets through the Pressurized Discharge Gates of Reservoir Dams. *Journal of Water and Sustainable Development*. 2023; 10(3): 109-120. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v10i3.2301-1207>.
- [7] Tarighi S. Ghasemzadeh P. Jabbari Kalkhoran B. Cavitation Investigation in the Sluice Section of the Sefid Rood Dam Using Flow 3D Software for Environmental Purposes. *International Journal of Innovations and Interdisciplinary Research (IJIIR)*. 2024: 3005-4893.
- [8] Ghobadi M. and Moradinia S. Simulation and optimization of hydraulic parameters of turbulent flow in lower dam spillways using Open FOAM. *Water Resources Engineering*. 2024; 10.30495/wej.2024.31570.2379.

- [9] Hassanzadeh Y. Kardan N. Rushdi M. and Kamasi M. Numerical investigation of the effect of changes in geometric and hydraulic parameters of the reservoir and sediments on the rate of hydraulic sediment removal under pressure of reservoirs of reservoir dams. *Journal of Civil and Environmental Engineering*. 2024;54(115): 53-71. doi: 10.22034/ceej.2023.51982.2154
- [10] Khorshidi H. and Nikseresht A. Investigation of the aeration system in the lower spillway of Sefidrood Dam using the finite volume method. 7th Iranian Hydraulic Conference. 2008.
- [11] Banisoltan S. and Pirzadeh B. Numerical modeling of the remedial option of the lower discharge gate of Shahid Abbaspour Dam using FLUENT software. 2010. Fifth National Civil Engineering Congress, May 2010. Ferdowsi University of Mashhad.
- [12] Huang H.Y. Gong A.M. Qiu Y. Wangliang Z.A. 3D Numerical Simulation and Experimental Analysis of Spillway Tunnel. *Applied Mechanics and Materials*. 2015; 723: 171-175.
- [13] Shilpakar R. Hua Z. Manandhar B. Shrestha N. Zafar M.R. Iqbal T. Hussain Z. Numerical simulation on tunnel spillway of Jingping-I hydropower project with four aerators. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2017; 82(1):012013.
- [14] Rong Y. Zhang T. Peng L. Feng P. Three-Dimensional Numerical Simulation of Dam Discharge and Flood Routing in Wudu Reservoir. *Water*. 2019; 11(10): 2157.
- [15] Shi H. Huang Y. Feng D. Numerical investigation on the role of check dams with bottom outlets in debris flow mobility by 2D SPH. *Sci Rep* 12, 20456 .2022. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24962-4>.
- [16] Falvey H.T. Cavitation in Ccutes and spillways. *Engineering Monograph* 42, US Bureau of Reclamation, Denver, Colorado. 1990; 145P.