



Numerical and experimental study of trajectory for free falling jets

Ali Taheri Aghdam, Ali Hossein Zadeh Dalir ^{ORCID}, Farzin Salmasi ^{ORCID}, Akram Abbaspour

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

ABSTRACT: The water flow over the dam spillways has a lot of energy and if this energy is not dissipated, the flowing water can cause irreparable damage to the dam and downstream structures. One way to dissipate this extra energy is to get water out of the jets into the plunging pool. Water-free jets often cause erosion and scouring downstream of the structure, affecting the abutments and the downstream channel. In the present study, the trajectory of free-falling jets is investigated numerically and experimentally. Ansys-Fluent software is used for numerical simulation and laboratory work is carried out in the hydraulic laboratory. The results showed that the domain of free falling jet in laboratory work is less than its calculated value using the projectile equations and the sample simulated using Ansys-Fluent software is due to air resistance. The equations of the projectile prediction and the simulated path in Ansys-Fluent have an error of 20.6% and 25.5%, respectively, compared to the laboratory data. Since none of the previously presented equations for calculating the path of falling jets were obtained using laboratory results and did not consider air resistance, therefore, they have errors in calculating the path of falling jets. In the present study, two equations have been presented to calculate the path of the free-falling jet, which have a relative error of 3.02% and 9.14%, respectively. These relationships significantly reduce the error of calculating the path of the free-falling jet. By reducing the outlet cross-section of the free-falling jet and increasing the head passing through the dam spillway, the free-falling jet reaches the ground at a greater distance from the dam body. Since none of the equations presented for calculating the trajectory of jets have been obtained using laboratory results and have not considered air resistance, so they have an average error of 21% in the estimation of trajectory jets. In the present study, in addition to providing equations to calculate the trajectory of a free-falling jet, the air resistance also entered the main equation of the projectile by fitting an equation (using laboratory data). The simulation results also showed that the water flow velocity with a 247% increase compared to the velocity at the end of the dam overflow, hits the ground, which requires more attention in the design of the stilling basin at the end of the dam.

Review History:

Received: Apr. 09, 2022

Revised: Jun. 24, 2024

Accepted: Aug. 24, 2024

Available Online: Sep. 04, 2024

Keywords:

Free Jet

Plunging Pool

Trajectory

Projectile Equation

Air Resistance

1- Introduction

Falling jets are one of the most important issues in hydraulic structures. Often these jets enter the plunge pool and lose their energy. The main mechanism of energy dissipation is the scattering of the jet into the air, followed by the entry of air into the jet, and finally the scattering and turbulence of the jet at the plunge pool. Falling water jets have a core that projects some distance and causes pressure increases on the bed and the wall of the pool. Along its trajectory, the jet core gradually shrinks because of the infiltration of air and turbulence and eventually breaks apart [1].

Rouse [2] referred to the Froude number in an upstream section and showed that the thickness of the vertical jet is almost constant. Wall et al. [3] examined and compared the

trajectory of the free and pressurized falling jets. The results showed that when calculating the trajectory of a free jet, the initial velocity of the jet (V_0) or the initial velocity head (h_0) should always be used.

In the present study, the characteristics of free-falling jets are investigated using physical models and CFD. The effect of the width of the outlet cross-section of the free jet and the head passing through the dam to the jet is examined. A comparison is made between the equations presented by prior researchers and the results of the laboratory and numerical studies of the present work will be used to calculate the trajectory of a free jet.

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



Table 1. Range of parameters used in the study

Parameter	V ₀ (m/s)	H _{overtop} (m)	D (m)
max	1.55	0.22	0.12
min	0.3	0.011	0.01

2- Methodology

2- 1- Equations governing projectile trajectory

A falling jet with a velocity of v_0 is launched from the dam crest. Considering the dam crest as the origin of the coordinates, the vertical position equation is taken from [4]:

$$y = x \tan \theta_0 - \frac{gx^2}{2v_0^2 \cos^2 \theta_0} \quad (1)$$

In Eq. 1, x and y are the coordinates of the lower edge of the jet, v_0 is the initial velocity of the jet, θ_0 is the initial angle of the jet from the horizon (zero if the jet is horizontal, positive if the jet issues upward, and negative if the jet is initially inclined downward), and g is the gravitational acceleration. When the jet begins horizontally (the initial angle of the jet from the horizon is zero), the equation is simplified as follows [4]:

$$y = -\frac{gx^2}{2v_0^2} \quad (2)$$

These equations describe the motion of a projectile that is not affected by air resistance.

2- 2- Geometric specifications of the physical model

In the present study, experiments were performed in the hydraulic laboratory of the Faculty of Agriculture, Department of Water Engineering, University of Tabriz, Iran. A cubic tank with a length of 2 m, a width of 1.5 m, and a height of 1.2 m was used as a reservoir. A rectangular broad-crested weir was installed on this tank. At the downstream section, a flume was installed to transfer water to the main underground reservoir. In the upstream section, a vertical cylindrical water tower was provided to supply the water needed to simulate the downstream free-falling jet. To provide the height required for the fall of the jet, the water tank was elevated 2 m. Parameters that affect the launch jet trajectory are listed in Table 1. Figure 1 shows a schematic diagram of the laboratory arrangement for measuring the trajectory of the jet.

In the above table, H_{overtop} is the water head over the

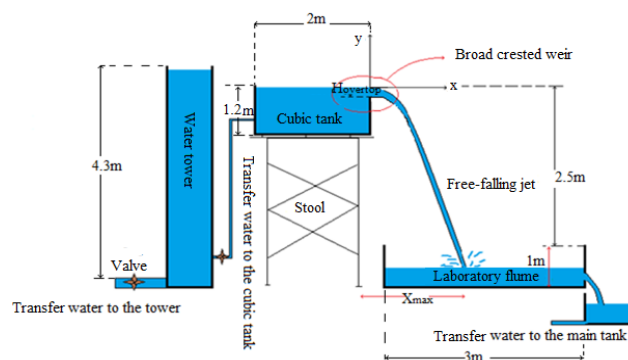


Fig. 1. Schematic of the free-falling jet laboratory facility

spillway (overtopping head), V_0 is the initial velocity of the jet, X_{max} is the maximum range of the free-fall jets and D is the width of the outlet of the free jet.

2- 3- Numerical simulation with Fluent software

To incorporate turbulence, the $k-\epsilon$ (RNG) turbulence model was used. For solving the free surface flow equation, the void of fluid (VOF) method was used [5]. To discretize the pressure expression, the Pressure-Implicit with Splitting of Operator (PISO) method and a Second Order Upward (SOU) method were used to discretize the momentum expression. Numerical simulation of a flow passing over a broad-crested weir in an open channel is a two-phase and turbulent flow.

3- Results and Discussion

3- 1- Proposed equation for the trajectory of free-falling jet

One hundred experiments were performed with different discharges and widths of different sections. In total, 1600 data points (x and y locations) were extracted from the trajectory of the jet. Figure 2 shows an example of the trajectory of a free-falling jet [6, 7].

It can be seen that the trajectory length calculated using Eq. 2 is greater than its actual value because air resistance is ignored. In other words, the actual value of the projectile range is shorter than the value obtained from Eq. 2 due to air resistance. By analyzing the laboratory results and comparing it with the results of the projectile equation, it was found that the trajectory of the falling jet extracted from the equations, compared to its true value (laboratory data), has an average error of about 21%.

3- 2- Effect of head and cross-section width on falling jet

By increasing the cross-sectional width of the rectangular broad crest weir, the lesser the range of jet. With increasing discharge through the spillway, the range of the jet increases. In other words, for a constant discharge, with increasing width, the place where the jet falls to the ground surface is closer to the toe of the dam and for a constant width, with increasing discharge, the place where the jet falls to the

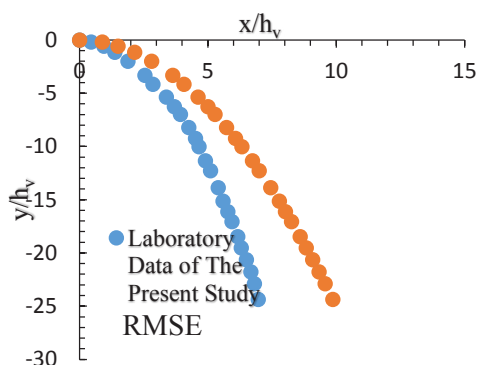


Fig. 2. Trajectory of a free-falling jet (laboratory measurements and projectile equation)

ground surface is farther from the toe of the dam.

4- Conclusions

Few studies have been done on the trajectory of falling jets over storage dams. In the present study, the trajectory of falling jets was investigated experimentally and numerically. The height of the falling jet over the dam spillway in the laboratory model was 2.5 m. The results show that the trajectory of falling jets is affected by air resistance and the range of falling jets in laboratory work is less than the values calculated by various equations that omit air resistance.

Also, the effect of the passing head on the dam and the width of the flow passage section on the range of the free-falling jet was investigated and the results showed that

decreasing the width at constant discharge and increasing the passing head over the dam at constant width be increased the falling jet range. The simulation results also showed that the velocity and pressure of the flow at the point of impact of the jet to the toe of the dam has its maximum value that should be considered in design.

References

- [1] A. Salemnia, M. Fathi Moghadam. "Investigation of Break up Length of free Water Jet", *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* No. 2, Vol. 13, 309-318, (2019). (In Persian).
- [2] H. Rouse. "Discharge characteristics of the free overfall", *Civ.Eng. (N.Y.)*, 6, 257, (1936).
- [3] T. L. Wahl, K.H. Frizell, E. A. Cohen, "Computing the Trajectory of Free Jets". *J. Hydraulic. Eng.*, 134(2), 256-260, (2008).
- [4] Bureau of Reclamation, "Design of small dams", 1st Ed., United States Department of the Interior, United States Government Printing Office, Denver, 282-291, (1960).
- [5] W. Hirt, B.D. Nichols, "Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries", *J. Comput, Phys*, 39, 201-225. (1981).
- [6] A. Taheri Aghdam, F. Salmasi, A. Hossein Zadeh Dalir, A. Abbaspour, J. Abraham. "Experimental and numerical investigation of the trajectories of free and pressurized jets through storage dams", *Water Supply*. 23(3), 1297-1318, 2023.
- [7] A. Taheri Aghdam, A. Hossein Zadeh Dalir, F. Salmasi, A. Abbaspour, J. Abraham. "Numerical and Experimental Study of Trajectory for Free-Falling Jets", *Iranian journal of science and technology, transactions of civil engineering*, 9(5), 62-70, 2023.



بررسی عددی و آزمایشگاهی مسیر جت‌های ریزشی آزاد

علی طاهری اقدم، علی حسین زاده دلیر^{ID}، فرزین سلماسی^{ID*}، اکرم عباسپور

گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۲۰
بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۰۴
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۳
ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۰۶/۱۴

کلمات کلیدی:

جت ریزشی آزاد
حوضچه استغراق
خط مسیر
معادله پرتابه
مقاومت هوا

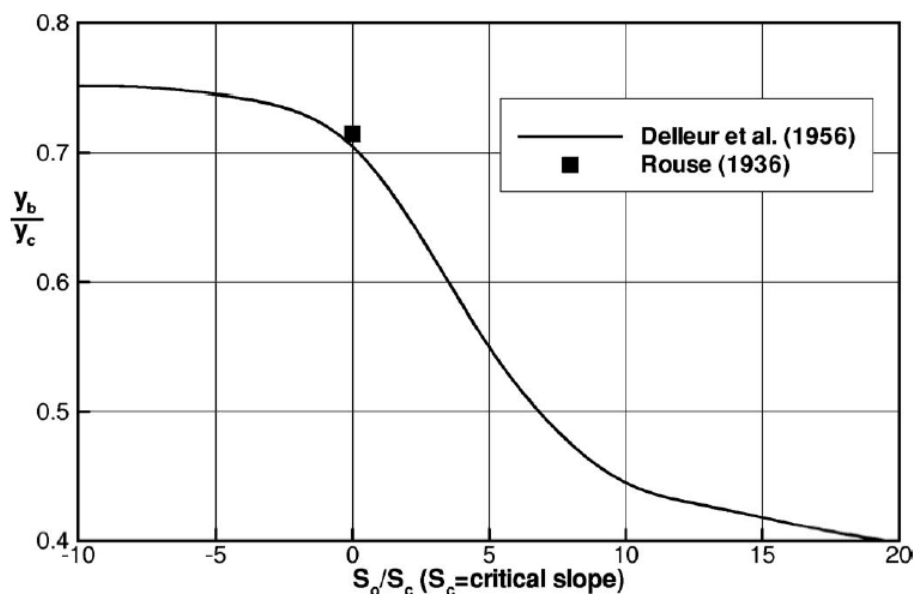
خلاصه: جریان آب ورودی از روی سدها دارای انرژی زیادی است که در صورت عدم اتلاف این انرژی، جریان آب عبوری می‌تواند خسارات جبران ناپذیری را به سد و سازه‌های پایین دست آن وارد کند. یکی از راه‌های اتلاف این انرژی اضافی، خروج آب به صورت جت‌های ریزشی به حوضچه‌های استغراق است. جت‌های آب ریزشی اغلب باعث فرسایش و آبستگي پایین دست سازه می‌شوند و به تکیه‌گاه‌ها و به کانال پایین دست رودخانه تاثیر می‌گذارند. در تحقیق حاضر به بررسی عددی و آزمایشگاهی خط مسیر جریان خروجی از جت‌های ریزشی آزاد پرداخته شد. برای شبیه‌سازی عددی از نرم افزار انسیس فلوئنت استفاده شد و کار آزمایشگاهی در آزمایشگاه هیدرولیک انجام گرفت. نتایج نشان داد که برد جت ریزشی آزاد در کار آزمایشگاهی کمتر از مقدار محاسبه شده آن با استفاده از روابط پرتابه و نمونه شبیه‌سازی شده با استفاده از نرم افزار انسیس فلوئنت به دلیل مقاومت هوا می‌باشد. به ترتیب معادلات پرتابه و مسیر شبیه‌سازی شده در نرم افزار انسیس فلوئنت به طور متوسط خطای ۲۰/۶ و ۲۵/۵ درصدی نسبت به داده‌های آزمایشگاهی دارند. از آنجایی که هیچ یک از معادلات ارائه شده برای محاسبه مسیر جت‌های ریزشی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی به دست نیامده‌اند و مقاومت هوا را در نظر نگرفته‌اند، لذا در محاسبه مسیر حرکت جت ریزشی دارای خطا هستند. برای رفع این خطا، در تحقیق حاضر دو معادله برای محاسبه مسیر حرکت جت ریزشی آزاد ارائه شده است که به ترتیب دارای خطای نسبی ۳/۰۲ و ۹/۱۴ درصدی می‌باشند. این روابط، خطای محاسبه مسیر حرکت جت ریزشی آزاد را به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهند. نتایج نشان داد که با کاهش عرض مقطع خروجی جت ریزشی آزاد و افزایش بار آبی گذرنده از روی سرریز سد، جت ریزشی آزاد در فاصله دورتری از بدنه سد به زمین می‌رسد. همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان داد که سرعت جریان آب با افزایش ۲۴۷ درصدی نسبت به سرعت در انتهای تاج سرریز سد، به زمین برخورد می‌کند که مستلزم توجه بیشتر در طراحی حوضچه‌های آرامش در انتهای سدها می‌باشد.

۱- مقدمه

وال و همکاران^[۲] به بررسی و مقایسه مسیر جت ریزشی آزاد و تحت فشار توسط روابط ارائه شده پرداختند. نتایج نشان داد که در محاسبه مسیر برای یک جت آزاد همیشه باید از سرعت اولیه جت یا هد سرعت اولیه استفاده شود. طاهری اقدم و همکاران^[۳] به بررسی عددی و آزمایشگاهی مسیر حرکت جت ریزشی تحت فشار پرداختند. نتایج نشان داد بین مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر استخراج شده از روابط پرتابه جت برای پیش‌بینی مسیر حرکت جت‌های تحت فشار، اختلاف قابل توجهی وجود دارد که این اختلاف می‌تواند ناشی از تاثیر مقاومت هوا در داده‌های استخراجی از کار آزمایشگاهی باشد. برای به حداقل رساندن این اختلاف، نسبت به اصلاح معادله پرتابه اقدام کردند. همچنین نتایج شبیه‌سازی عددی نشان داد که

جت‌های ریزشی یکی از موضوعات مهم در سازه‌های هیدرولیکی هستند. غالباً این جت‌ها به حوضچه استغراق وارد شده و انرژی خود را از دست می‌دهند. مکانیزم اصلی اتلاف انرژی، پخش کردن جت، درون هوا و به دنبال آن ورود هوا به درون جت و در نهایت پخشیدگی و آشفتگی جت در درون حوضچه استغراق است. جت‌های آب ریزشی تا فاصله‌ای خاص دارای هسته‌ای متراکم از ذرات آب می‌باشد که بخش عمده‌ای از فشار وارده به بستر و دیواره حوضچه ناشی از وجود همین هسته متراکم می‌باشد. اما پس از طی مسافتی در هوا، هسته جت رفته رفته به دلیل نفوذ هوا از حاشیه جت و تلاطم کوچک شده و در نهایت شکسته شده و از بین می‌رود^[۱].





شکل ۱. نسبت عمق آب در لبه تاج به عمق بحرانی برای جریان‌های ریزشی شیب دار و افقی [۵، ۷]

Fig. 1. Ratio of water depth at the crest of a spillway to the critical depth for sloping and horizontal flows (5, 7)

روی سرریز پرداخت. نتایج نشان داد که جریان باید از عمق بحرانی روی تاج عبور کند و از روی تاج با جریان فوق بحرانی ریزش نماید. ایشان نشان دادند که جریان با عمق $y_b = 0.715y_c$ از لبه تاج سرریز پرتاب می‌شود. هندرسون [۶] گزیده‌ای از کارهای اولیه در این حوزه، از جمله نتایج دلور [۷] در مورد یک سرریز که در شکل ۱ نشان داده شده است را ارائه می‌دهد. در عمل، برای تعیین عمق و سرعت در محل ریزش جریان در روی تاج سرریز، (عمق و سرعت برای محاسبه مسیر جت ریزشی مورد نیاز هستند) با استفاده از معادله سرریز $Q = CLH^{1.5}$ ، دبی Q محاسبه می‌گردد که در آن C ضریب سرریز، L عرض سرریز و H ارتفاع آب روی سرریز است. سپس عمق بحرانی متناظر با دبی را از رابطه $y_c = (q^2/g)^{1/3}$ محاسبه می‌گردد که در آن q دبی در واحد عرض تاج می‌باشد. عمق آب روی تاج و در محل ریزش جریان را می‌توان با استفاده از روابطی که توسط دلور [۷] یا روس [۵] داده شده است، و سرعت جریان در روی تاج سرریز و در محل ریزش را می‌توان از معادله پیوستگی تعیین کرد. لازم به ذکر است که چون جریان بحرانی، حداقل انرژی ویژه برای یک دبی معین را تولید می‌کند،

فشار دینامیکی و همچنین سرعت جت خروجی از دریچه به‌طور متوسط و به ترتیب با افزایش ۱۴۵ و ۲۴۲ درصدی نسبت به لبه انتهایی دریچه به زمین برخورد می‌کند که باید در طراحی‌ها مورد توجه قرار داده شود. سلمان زاده و همکاران [۴] به بررسی پراکنش حدی جریان جت خروجی در محیط هم‌فاز و غیر هم‌فاز پرداختند. آن‌ها مطابق با کلیه برداشت‌های انجام شده برای مختصات منحنی‌های خروجی جریان جت، اقدام به بررسی معادله‌ی حاکم بر نحوه توزیع حرکتی آن‌ها کردند. نکته‌ی مهم در رابطه ارائه شده توسط آن‌ها، صرف نظر از نیروی اصطکاکی هوا می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که نوع محیط پذیرنده باعث تغییر در شرایط مرزی، مسیر حرکتی جریان تخلیه‌شونده و توسعه‌ی جریان خواهد شد. نتایج نشان داد که توسعه فلاکس جریان جت در محیط غیر هم‌فاز، در اعداد فرود چگال زیر بحرانی روی می‌دهد و حال آن‌که در محیط هم‌فاز عدد فرود دنسیمتریک در محدوده‌ی فوق بحرانی قرار می‌گیرد. از نظر کمی حداکثر توسعه فلاکس جریان جت در محیط غیر هم‌فاز تا حدود ۲۰۰ برابر قطر نازل می‌باشد که در محیط هم‌فاز چنین توسعه‌ی جریانی تا ۴۰۰ برابر قطر نازل روی می‌دهد.

روس [۱۲] به بررسی آزمایشگاهی مشخصات جریان ریزشی آزاد از

2 Henderson

3 Delleur

1 Ruse

انرژی ویژه در لبه سرریز (محل ریزش)، که در آن جریان فوق بحرانی است، بیشتر از انرژی ویژه در بخش بحرانی خواهد بود. این امر متناقض به نظر می‌رسد اما چون توزیع فشار در لبه سرریز هیدرواستاتیک نیست، انرژی مخصوص در لبه از جمع ساده $v_b + v_b^2/2g$ بدست نمی‌آید. لازم به توضیح است که اگر در شرایط فوق توزیع فشار در لبه سرریز هیدرواستاتیک بود جریان به سمت سد بر می‌گشت (جریان از انرژی بیشتر به سمت انرژی کمتر حرکت می‌کرد) ولی چون توزیع فشار هیدرواستاتیک نیست جریان از روی تاج سرریز ریزش می‌کند.

طاهری اقدم [۸] به بررسی آزمایشگاهی گسستگی جت ریزشی آزاد پرداخت، نتایج نشان داد که با افزایش سرعت اولیه جت ریزشی آزاد، طول شکست جت در راستای افق بیشتر می‌گردد. دو عدد خیلی مهم نیز در پدیده گسستگی کاربرد دارند که یکی عدد رینولدز و دیگری عدد وبر است. بزرگ بودن عدد رینولدز نشان دهنده قدرتمند بودن اغتشاشات درون جریان و کوچک بودن عدد وبر به معنی قدرتمند بودن نیروهای کشش سطحی است. با افزایش سرعت مقدار عددی عدد وبر بیشتر می‌گردد و نیروهای کشش سطحی کمتر می‌گردند. با کمتر شدن نیروهای کشش سطحی طول شکست بیشتر می‌گردد به بیان دیگر، در این شرایط، نیروهای کشش سطحی به مسافت بیشتری برای غلبه به نیروهای امواج سطحی نیاز دارند و لذا طول شکست بیشتر می‌گردد.

مزیدی شرف آبادی [۹] به بررسی تجربی گسسته شدن جت ریزشی آب پرداختند. آن‌ها یک جت سیال ریزشی (عمودی) را مورد بررسی قرار دادند و با استفاده از زانویی میزان اغتشاش در جریان آب را افزایش دادند (در هر مرحله، یکی از سه لوله پلی اتیلنی ساخته شده را به زیر منبع نگهداری آب متصل نموده و در سه دبی مختلف از پدیده گسسته شدن جت آب خروجی از لوله‌ها عکسبرداری کردند). نتایج نشان داد که هرچه اغتشاش ناشی از جریان‌های گردابه‌ای تولیدی توسط زانویی‌ها زیادتر گردد، همانند جت‌های افقی سیال، گسسته شدن جت ریزشی نیز سریعتر انجام می‌شود. به بیان دیگر، مشاهده کردند که با ایجاد اغتشاش بیشتر در جریان آب، از طریق لوله‌هایی با تعداد زانویی بیشتر، برای اعداد رینولدز بالا، شکسته شدن سریعتر اتفاق می‌افتد. سالم نیا و همکاران [۱] به بررسی اندازه طول شکست جت و پارامترهای موثر بر آن پرداختند. نتایج نشان داد که توزیع سرعت درمحل برخورد جت بیشینه بوده و به تدریج با فاصله گرفتن از محل برخورد کاهش می‌یابد. کمترین نوسانات سرعت و فشار و همچنین کمترین مقدار میانگین نوسانات در کوچکترین قطر رخ می‌دهد که نشانگر حداکثر تراکم جت است

که در این حالت جت مقاومت بیشتری در برابر ورود هوا نشان می‌دهد. دانشفراز و همکاران [۱۰] به بررسی آزمایشگاهی کاربرد آستانه با عرض‌های مختلف بر ضریب دبی دریچه‌ها پرداختند. نتایج نشان داد که ضریب دبی با افزایش عرض آستانه و کاهش سطح کل جریان عبوری از دریچه افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که وجود آستانه با حداقل عرض در مقایسه با حالت بدون آستانه در یک بازشدگی مشخص، منجر به افزایش ضریب دبی می‌گردد.

لازم به توضیح است که با استفاده از نرم‌افزار فلونت در مورد مسیر حرکت جت‌های ریزشی آزاد مطالعات قابل توجهی صورت نگرفته است لذا در تحقیق حاضر به بررسی خصوصیات جت ریزشی آزاد با استفاده از این نرم‌افزار پرداخته شده است. نرم‌افزار فلونت یکی از کاملترین، قوی ترین و کاربردی ترین نرم‌افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) بوده و برای مدل کردن جریان سیال و انتقال حرارت در هندسه‌های پیچیده به کار می‌رود [۱۱]. از جمله پژوهش‌های کار شده با نرم‌افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی می‌توان به بررسی اثر شیب وجوه بالادست و پایین دست سرریز لبه پهن بر مشخصات جریان با استفاده از نرم افزار فلونت [۱۲]، بررسی شرایط جریان موجکی و ضریب دبی جریان در سرریزهای لبه پهن مستطیلی [۱۳]، تاثیر آستانه بر رژیم هیدرولیکی در دریچه‌های تخلیه [۱۴]، تاثیر شکل‌های مختلف سرریز دودکشی بر ضریب دبی [۱۵] و... اشاره کرد. در روابط ارائه شده در فوق، هیچ یک از مراجع مقاومت هوا را در محاسبه مسیر جت ریزشی آزاد در نظر نگرفته‌اند. لذا محاسبه برد جت ریزشی با خطا همراه خواهد بود. در تحقیق حاضر به بررسی اثر مقاومت هوا بر مسیر جت ریزشی آزاد پرداخته شد. برای محاسبه دقیق‌تر برد جت ریزشی، مقاومت هوا با ضرایبی وارد معادلات مسیر جت ریزشی گردید. این کار به صورت عددی با نرم افزار انسیس فلونت و به صورت آزمایشگاهی انجام گرفت. همچنین، تاثیر عرض مقطع خروجی جت ریزشی آزاد و هد گذرنده از روی سد به مسیر جت ریزشی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین در تحقیق حاضر مقایسه‌ای بین روابط ارائه شده توسط محققین مختلف و نتایج حاصل از کار آزمایشگاهی و عددی تحقیق حاضر برای محاسبه مسیر حرکت جت ریزشی آزاد صورت گرفت.

۲- الگوسازی نظری یا تجربی

۲-۱- معادلات حاکم بر حرکت پرتابه

زمانی که جت ریزشی با سرعت V_0 از تاج سد پرتاب می‌شود. با در نظر گرفتن تاج سد به عنوان مبدا مختصات، معادله‌ی حرکت به صورت زیر

است [۱۶]:

$$y = x \tan \theta_0 - \frac{gx^2}{2v_0^2 \cos^2 \theta_0} \quad (۱)$$

متراکمی از ذرات آب نمی‌باشد و پس از طی مسافتی در هوا هسته جت رفته رفته به دلیل نفوذ هوا از حاشیه جت و تلاطم، کوچک شده و در نهایت شکسته و از بین می‌رود، لذا رابطه ۴ نمی‌تواند سطح بالای جت ریزشی را به درستی تخمین بزند.

در حالت ریزش آزاد آب از روی یک سد، معادله‌ای مشابه معادله خط مسیر جت در کتاب طراحی سدهای کوتاه^۱ [۱۷] ارائه شده است که در طراحی کانال‌های باز، سرریز شوت و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$y = x \tan \theta_0 - \frac{x^2}{4K(d+h_v)\cos^2 \theta_0} \quad (۵)$$

که در آن d عمق جریان می‌باشد. این معادله به عنوان خط مسیر یک جت آزاد توصیف می‌شود. این معادله با ضریب K اصلاح می‌شود. تحقیقات نشان داده که مقادیر K کم‌تر یا مساوی با ۱، (۰/۹ و ۰/۷۵) معمولاً پیشنهاد می‌شود (بهترین مسیر جت (نزدیک‌تر به واقعیت) را ارائه می‌دهند).

رابطه ۵ همچنین در کتاب طراحی سدهای وزنی^۲ [۱۸]، کتاب طراحی سدهای قوسی^۳ [۱۹] و در تحقیق آندل^۴ [۲۰] برای پیش‌بینی مسیر جت آزاد آب از روی سد برای محاسبه‌ی آبستگي پایین دست استفاده شده است. همچنین در سال ۱۹۶۴ یک معادله بدون بعد توسط گروه مهندسين ارتش آمریکا^۵ [۲۱] برای محاسبه مسیر جت ریزشی آزاد ارائه شده است. رابطه ۶ معادله بدون بعد ارائه شده توسط ارتش آمریکا را نشان می‌دهد.

$$\frac{x}{h_v} = \sin 2\theta_0 + 2 \cos \theta_0 \sqrt{\sin^2 \theta_0 + \frac{y}{h_v}} \quad (۶)$$

در رابطه فوق، h_v حد سرعت می‌باشد.

۲-۲- مشخصات هندسی مدل آزمایشگاهی

در پژوهش حاضر، آزمایشات در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز در یک مخزن مکعبی شکل به

در رابطه ۱، γ مختصات لبه پایین جت ریزشی، v_0 سرعت اولیه جت ریزشی، θ_0 زاویه اولیه جت از افق و g شتاب گرانشی است. زمانی که جت ریزشی به صورت افقی خارج می‌شود (زاویه اولیه جت از افق برابر صفر می‌گردد)، معادله به صورت زیر ساده می‌گردد.

$$y = -\frac{gx^2}{2v_0^2} \quad (۲)$$

این معادلات حرکت یک پرتابه که تحت تاثیر مقاومت هوا قرار نگرفته‌اند را توصیف می‌کنند. در واقع طول مسیر محاسبه شده از این روابط، بیشتر از مقدار واقعی آن‌ها به خاطر مقاومت هوا می‌باشد. بدین معنی که مقدار واقعی برد پرتابه کوتاه‌تر از مقدار بدست آمده از روابط به دلیل مقاومت هوا است. با جایگذاری $h_v = v_0^2/2g$ می‌توان نوشت [۱۶]:

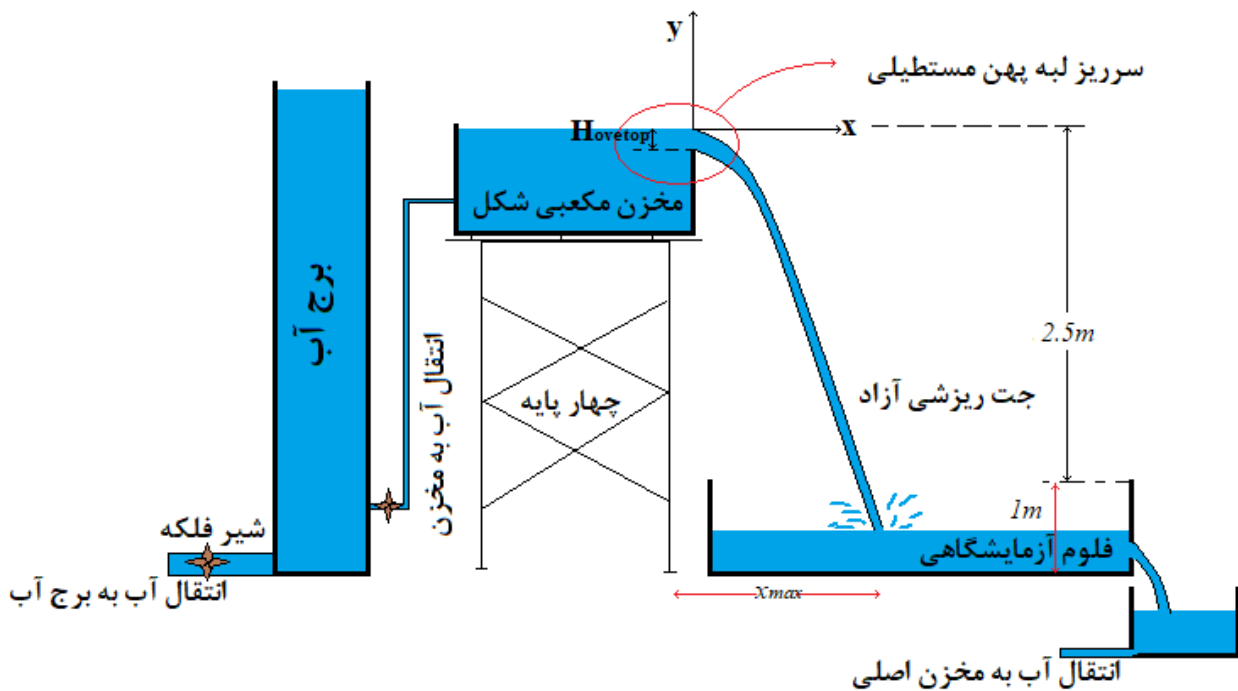
$$y = x \tan \theta_0 - \frac{x^2}{4h_v \cos^2 \theta_0} \quad (۳)$$

همچنین می‌توان مسیر سطح بالای جت را با اضافه کردن ضخامت جت آبی (t_0) به راحتی محاسبه کرد (با فرض اینکه سرعت و زاویه جهت‌گیری همان اندازه در لبه پایینی جت ریزشی است):

$$y = t_0 + x \tan \theta_0 - \frac{x^2}{4h_v \cos^2 \theta_0} \quad (۴)$$

در رابطه ۴، t_0 ضخامت جت آبی است [۱۶]. البته باید این نکته نیز ذکر گردد که هرچند رابطه فوق در منابع مختلفی ارائه شده است ولی به دلیل اینکه جت ریزشی تا رسیدن به حوضچه آرامش در پای سازه دارای هسته

- 1 Design of small dams
- 2 Design of gravity dams
- 3 Design of arch dams
- 4 Annandale
- 5 U.S. Army Corps of Engineers



شکل ۲. شماتیک فلوم آزمایشگاهی تحقیق حاضر در حالت ریزش آزاد

Fig. 2. Schematic of the free-falling jet laboratory facility

چهار نقطه مشخص روی عکس که مقادیر X و Y آن‌ها معلوم باشد به نرم افزار وارد می‌شود سپس با کلیک بر روی هر نقطه از عکس، مختصات آن نقطه داده می‌شود. با انتخاب مسیر حرکت جت‌های ریزشی در این نرم افزار، مختصات مسیر حرکت جت ریزشی بدست می‌آید. لازم به توضیح است که دبی جریان جت ریزشی به صورت حجمی در کل آزمایشات اندازه گیری شد. در این پژوهش، ابتدا جریان جت ریزشی آزاد به صورت آزمایشگاهی بررسی شده و سپس با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، نرم‌افزار مورد استفاده در تحقیق حاضر کالیبره گردید و شبیه‌سازی عددی نیز برای مدل‌های مورد نظر انجام گرفت. در جدول ۱ محدوده تغییر پارامترها در تحقیق حاضر آورده شده است.

در جدول (۱)، H_{ovetop} هد گذرنده از روی سازه، v_0 سرعت اولیه جت ریزشی و D عرض مقطع خروجی جت ریزشی آزاد می‌باشد.

۲-۳- شبیه‌سازی عددی با نرم افزار فلوئنت

۲-۳-۱- معادلات حاکم بر جریان

پایه و اساس تمام روش‌های عددی در رشته مهندسی هیدرولیک حل

طول ۲، عرض ۱،۲ و ارتفاع ۱،۵ متر انجام گرفت. بر روی این مخزن یک سرریز لبه پهن مستطیلی نصب گردید. همچنین در پایین دست آن یک فلوم شیشه‌ای فلزی برای انتقال آب به مخزن اصلی و در بالادست آن یک برج آب برای تامین آب مورد نیاز برای شبیه سازی هد بالادست جت ریزشی تعبیه شد. لازم به ذکر است که برای تامین ارتفاع مورد نیاز برای سقوط جت ریزشی، مخزن آب روی یک چهارپایه به ارتفاع ۲ متر قرار گرفت. با تغییر پارامترهای موثر در مسیر جت پرتابی (پارامترهای جدول ۱) آزمایشات انجام گرفت. در شکل ۲، شکل شماتیک تجهیزات آزمایشگاهی برای اندازه گیری‌های مسیر حرکت جت ریزشی نشان داده شده است.

برای برداشت داده‌های مسیر سقوط جت ریزشی آزاد از یک دوربین استفاده گردید. به این ترتیب که بعد از برقراری جریان جت ریزشی از سرریز سد (سرریز لبه پهن مستطیلی نصب شده بر روی مخزن)، عکس‌هایی از مسیر حرکت جت‌های ریزشی گرفته شد سپس داده‌های مسیر حرکت جت‌های ریزشی موجود در این عکس‌ها با استفاده از نرم افزار Plot Digi-tizer برداشت شد. لازم به ذکر است که در نرم افزار Plot Digitizer ابتدا

جدول ۱. محدوده تغییرات پارامترهای موثر بر جت ریزشی آزاد

Table 1. Range of parameters used in study

Parameter	v_0 (m/s)	H_{overtop} (m)	D (m)
max	1.55	0.22	0.12
min	0.3	0.011	0.01

۲-۳-۲- مدل عددی

در شبیه‌سازی جریان از روی سرریز لبه‌پهن مستطیلی به روش حجم محدود، برای حل معادلات آشفتگی از مدل اغتشاش $k - \varepsilon(RNG)$ ، برای حل معادلات سطح آزاد جریان از روش حجم سیال (VOF^2) ، برای گسسته‌سازی عبارت فشار از روش $(PISO^3)$ و برای گسسته‌سازی عبارت ممتم از روش مرتبه دوم بالادست (SOU^4) استفاده گردید. شبیه‌سازی عددی جریان عبوری از روی سرریز لبه‌پهن در یک کانال روباز، یک جریان دو فازی و متلاطم می‌باشد. همانطور که اشاره شد در تحقیق حاضر از روش VOF که توسط هیرت و نیکولس [۲۲] ارائه شده است استفاده گردید. که رابطه انتقالی کسر سیال در آن با رابطه ۹ بیان می‌شود.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial \overline{U_i F}}{\partial X_i} = 0 \quad (9)$$

این روش بر این اساس استوار است که دو یا چند سیال با هم ترکیب نمی‌شوند. پس مختصات و مقادیر هر سلول به طور خاص نشان دهنده یکی از فازها است که بسته به مقادیر نسبی حجمی بین صفر و یک متغیر است. در شبیه‌سازی جریان دو فازی شامل آب و هوا، در صورتی که سلولی پر از

معادلات حاکم بر جریان شامل معادلات پیوستگی و معادلات ممتم است که اصطلاحاً به معادلات ناویر-استوکس معروف می‌باشند. برای یک جریان تراکم ناپذیر با ویسکوزیته ثابت، معادلات مذکور به ترتیب به فرم معادله ۷ و ۸ نوشته می‌شود [۱۴].

$$\frac{\partial}{\partial X_j} (\overline{U_i}) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial X_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial X_j} (-P \delta_{ij} - \overline{\rho U_i U_j}) \quad (8)$$

که در رابطه فوق U_i و U_j مولفه‌های بردار سرعت در راستای فضایی i و j ، فشار، P ، چگالی سیال و δ_{ij} دلتای کرونکر است (در صورتی که $i=j$ باشد، مقدار آن یک و در غیر این صورت مقدار آن صفر است). عبارت اول در سمت چپ معادله ۸ عبارت غیرماندگاری و عبارت دوم انتقال^۱ است. عبارت اول سمت راست معادله عبارت فشار و عبارت دوم تنش رینولدزی است. برای حل معادله حاکم بر جریان می‌توان از یکی از نرم افزارهای CFD بهره برد. در تحقیق حاضر از نرم افزار Ansys-Fluent که به روش حجم محدود به شبیه‌سازی عددی جران می‌پردازد، استفاده گردید.

- 2 Volume of Fluid (VOF) Model
- 3 Pressure-Implicit with Splitting of Operator
- 4 Second Order Upwards

- 1 Convective

برای یک مشخصات ثابت جریان، برای شرط مرزی بالای کانال یک بار از شرط مرزی فشار خروجی صفر و یک بار هم از شرط مرزی تقارن استفاده گردید ولی با توجه به این که هیچ اختلافی بین نتایج خروجی مشاهده نشد، لذا بعد از آن در تمامی شبیه‌سازی‌ها از شرط مرزی فشار خروجی صفر استفاده شد. همچنین لازم به توضیح است که در شرط مرزی فشار آب، پارامترهای عمق، سرعت جریان، شعاع هیدرولیکی و شدت آشفتگی^۲ در بالادست کانال به نرم افزار وارد شده و روباز بودن کانال بالادست مشخص می‌گردد. شبکه بندی تحقیق حاضر و شرایط مرزی در شکل ۳ نشان داده شده است. شبیه‌سازی عددی جریان در تحقیق حاضر به صورت غیر دائمی و با گام زمانی^۳ ۰,۰۰۱ ثانیه انجام گردید و تا رسیدن به حالت دائمی (مستقل از زمان) ادامه یافت.

۲-۳-۴- تعیین رژیم جریان

مدل انسیس فلونت قابلیت مدل کردن جریان آشفتده و آرام را دارد. در این تحقیق با توجه به تلاطم زیاد جریان، رژیم جریان آشفتده در نظر گرفته شده و مدل آشفتگی که در این تحقیق استفاده شده است بر اساس بهترین مدل آشفتگی که نتایج آن با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده و کمترین خطای نسبی را داشته، انتخاب شده است. لازم به ذکر است که برای یک شرایط هندسی و هیدرولیکی ثابت، سه مدل آشفتگی Standard, RNG و Realizable مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد مدل آشفتگی $k-\epsilon(RNG)$ با خطای نسبی ۴,۱ درصد نسبت به دو مدل آشفتگی دیگر (مدل آشفتگی Standard خطای ۹,۴ درصدی و مدل آشفتگی Realizable خطای ۱۴,۲ درصدی دارند) دارای خطای کمتری است و لذا در مدل‌سازی جریان جت ریزشی آزاد از این مدل استفاده گردید.

۳- نتایج و بحث

بعد از برقراری جریان در مدل ساخته شده در آزمایشگاه، ۱۰۰ سری آزمایش با دبی‌ها و عرض مقاطع مختلف انجام شد. با استفاده از داده‌ها و عکس‌های برداشت شده، ۱۶۰۰ مختصات (X و Y) از روی مسیر حرکت جت ریزشی که تحت تاثیر مقاومت هوا قرار گرفته‌اند، استخراج گردید. در شکل ۴ یک نمونه از مسیر حرکت جت ریزشی آزاد نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴ مشاهده می‌گردد که طول مسیر محاسبه شده با استفاده از معادله پرتابه (معادله ۳)، بیشتر از مقدار واقعی آن به دلیل نادیده

هوا باشد، مقدار نسبت حجمی صفر ($F=0$)، در صورتی که کاملاً پر از آب باشد مقدار یک ($F=1$) و در صورتی که سلول هر دو سیال را داشته باشد، مقدار عددی بین صفر و یک ($0 < F < 1$) را به خود اختصاص می‌دهد که تحت این شرایط المان دارای سطح آزاد سیال می‌باشد [۲۲]. لازم به توضیح است که بایون و ولروا [۲۳] و تورا [۲۴] مقدار عددی F برابر ۰/۵ را به عنوان سطح آزاد سیال معرفی نمودند که در تحقیق حاضر نیز این مقدار برابر با ۰/۵ در نظر گرفته شده است.

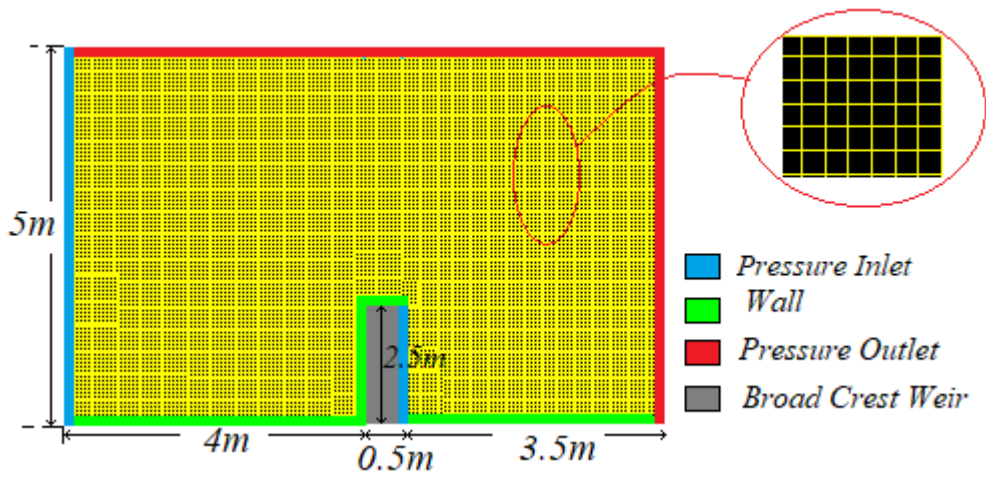
۲-۳-۳- شبکه بندی و شرایط مرزی

از آنجایی که در مدل‌سازی با روش‌های عددی، مش بندی شبکه محاسباتی می‌تواند روی نتایج مدل تأثیر بگذارد، در این قسمت به بررسی تأثیر مش بندی بر نتایج مدل‌سازی پرداخته شده است. جهت ایجاد شبکه قابل فراخوانی در نرم افزار Ansys-Fluent ابتدا در نرم افزار GAMBIT هندسه دو بعدی مدل طراحی و سپس از قسمت Meshing اقدام به شبکه بندی محدوده مسئله گردید. برای این منظور در تحقیق حاضر از المان‌های مربعی شکل استفاده شده است. در تحقیق حاضر برای جلوگیری از تاثیر اندازه شبکه‌ها در حل معادلات حاکم، آزمون مستقل از شبکه صورت گرفت و تعداد شبکه مناسب انتخاب شد. در نهایت آنالیز حساسیت برای شبکه بندی نشان داد که با افزایش تعداد شبکه‌ها از ۳۱۴ به ۲۰۵۲۶ اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و عددی کمتر می‌شود. به طوری که از تعداد شبکه ۱۵۸۶۰ به بالا، اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و عددی تقریباً ثابت می‌ماند. این نشان می‌دهد که کوچکتر کردن ابعاد شبکه به بیش از مقدار فوق الذکر تاثیری در دقت نتایج ندارد. به همین خاطر در این شبیه‌سازی، تعداد شبکه مناسب در حدود ۱۵۸۶۰ انتخاب شد. لازم به ذکر است که تعداد گره‌ها در این حالت ۱۶۱۵۷ به دست می‌آید. یکی از مهمترین مسائل در شبیه‌سازی عددی تعریف مناسب شرایط مرزی^۱ است که در تحقیق حاضر شرایط مرزی برای جریان ورودی به صورت فشار جریان آب (Pressure Inlet)، برای جریان خروجی به صورت فشار خروجی صفر (Pressure Outlet)، برای وجه پایین دست سرریز لبه پهن مستطیلی (برای هوادهی سرریز و جلوگیری از چسبیدن جت آب به بدنه سرریز) از شرط مرزی فشار جریان آب (Pres-sure Inlet)، برای کف و خود سرریز لبه پهن داخل کانال شرط مرزی دیواره با زبری ۰,۰۰۰۱ (Wall) و برای بالای کانال شرط مرزی فشار خروجی صفر (Pressure Outlet) معرفی گردید. لازم به ذکر است که

2 Turbulent Intensity

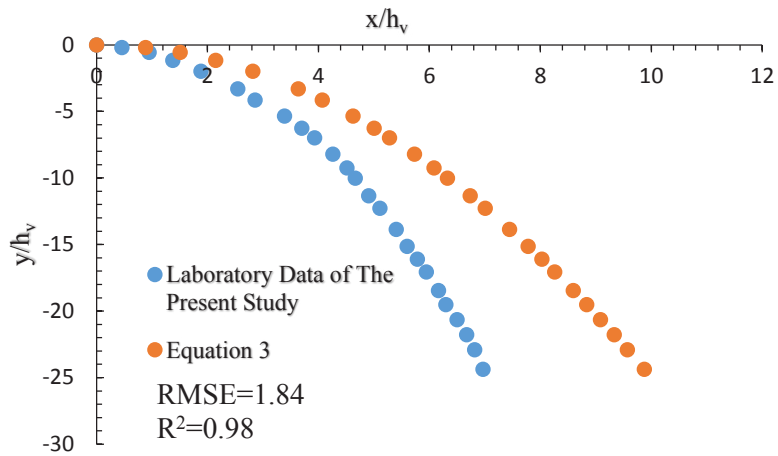
3 Time step

1 Boundary Conditions



شکل ۳. شبکه بندی و اعمال شرایط مرزی در شبیه‌سازی عددی

Fig. 3. The computational mesh and boundary conditions



شکل ۴. مسیر حرکت جت ریزشی آزاد (اندازه گیری‌های آزمایشگاهی و معادله پرتابه)

Fig. 4. Trajectory of a free-falling jet (laboratory measurements and projectile equation)

در رابطه ۱۲، y ارتفاع سقوط جت ریزشی آزاد و $h_v = v_0^2/2g$ هد سرعت می‌باشد. با توجه به ضرایب ثابت رابطه ۱۲، ملاحظه می‌شود که اثر ارتفاع سقوط کمتر از سرعت نزدیک شونده است (حدود ۲ برابر). ضمن این که این دو عامل در خلاف جهت هم عمل می‌کنند. با ترکیب روابط ۱۱ و ۱۲، مسیر حرکت جت ریزشی به صورت رابطه ۱۳ به دست می‌آید.

$$x = 2\sqrt{(-y)h_v} - (0.092h_v - 0.041y) \quad (13)$$

رابطه ۱۳، رابطه‌ای برای پیش‌بینی مسیر حرکت جت ریزشی (برد جت ریزشی در هر ارتفاع) می‌باشد. همچنین در تحقیق حاضر نسبت به برازش روابط مختلفی برای پیش‌بینی مسیر حرکت جت ریزشی آزاد اقدام گردید که در نهایت رابطه ۱۴ برای محاسبه برد جت ریزشی در هر ارتفاع ارائه گردید. لازم به توضیح است که برای برازش رابطه ۱۴، از ۷۵ درصد داده‌ها استفاده گردید و با استفاده از ۲۵ درصد داده‌ها مورد آزمون قرار گرفت که در شکل ۵ الف و ب به ترتیب نمودار پراکندگی داده‌ها برای آزمون روابط ۱۳ و ۱۴ ارائه شده است.

$$\begin{aligned} \frac{x}{D} = & -0.1835 \frac{y}{D} - 0.00072 \left(\frac{y}{D}\right)^2 - 0.04 \frac{P}{D} \\ & - 0.000077 \left(\frac{P}{D}\right)^2 + 5.833 \frac{H_{ovetop}}{D} \\ & - 0.573 \left(\frac{H_{ovetop}}{D}\right)^2 - 0.00016 \frac{y \times p \times H_{ovetop}}{D^3} \end{aligned} \quad (14)$$

در رابطه ۱۴، x و y مختصات لبه پایین جت ریزشی، D عرض مقطع خروجی جت ریزشی آزاد، P ارتفاع ریزش از سطح زمین و H_{ovetop} هد گذرنده از روی سازه می‌باشد.

با توجه به شکل ۵ مشاهده می‌گردد که اکثر داده‌ها در نزدیکی نیم‌ساز ناحیه اول واقع شده‌اند که نشانگر دقت بالای روابط ارائه شده برای محاسبه مسیر حرکت جت ریزشی آزاد می‌باشند. همچنین مقدار بالای ضریب همبستگی این نمودارها نشان از دقت بالای این نمودارها در پیش‌بینی مسیر حرکت جت ریزشی آزاد می‌باشد.

در شکل ۶ هیدروگراف جریان ورودی و خروجی در کانال شبیه‌سازی شده و همچنین مسیر حرکت جت ریزشی آزاد از زمان شروع تا رسیدن به

گرفتن مقاومت هوا است. به بیان دیگر، مقدار واقعی برد پرتابه کوتاه‌تر از مقدار بدست آمده از معادله ۳ به دلیل مقاومت هوا است. با تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی و مقایسه آن با نتایج حاصل از معادله پرتابه، مشخص گردید که مسیر حرکت جت ریزشی مستخرج از روابط، در مقایسه با مقدار واقعی آن (داده‌های آزمایشگاهی) به طور متوسط حدود ۲۱ درصد خطا دارد. لازم به توضیح است که جذر میانگین مربعات خطا برای شکل ۴ برابر ۱،۸۴ و ضریب همبستگی برابر ۰،۹۸ می‌باشد.

زمانی که جت ریزشی به صورت افقی خارج می‌شود، معادله حاکم بر پرتابه به صورت معادله ۲ که در بخش مواد و روش‌ها ارائه شده است، می‌باشد. با ساده سازی معادله ۲، مسیر حرکت جت ریزشی در ارتفاع‌های مختلف به صورت معادله زیر به دست می‌آید.

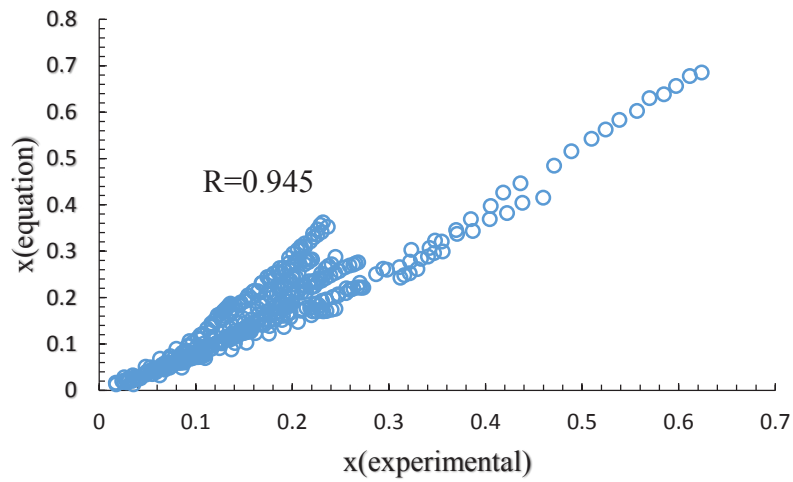
$$x = 2\sqrt{(-y)h_v} \quad (10)$$

این معادله حرکت یک پرتابه که تحت تاثیر مقاومت هوا قرار نگرفته‌اند را توصیف می‌کند. برای وارد کردن تاثیر مقاومت هوا بر میزان برد جت ریزشی در هر ارتفاع، و با توجه به این که رابطه ۱۰ مقدار برد در هر ارتفاع را بیشتر از مقدار واقعی برآورد می‌نماید، نسبت به اصلاح رابطه ۱۰ به صورت رابطه ۱۱ اقدام گردید.

$$x = 2\sqrt{(-y)h_v} - \xi \quad (11)$$

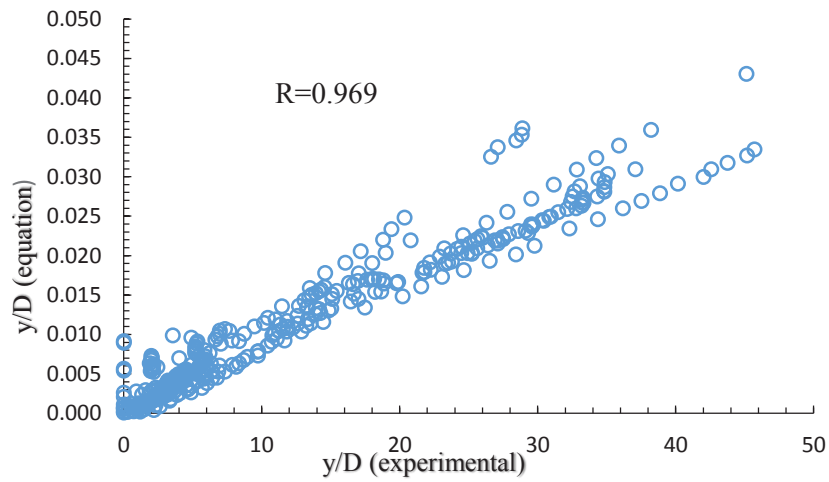
در رابطه ۱۱، ξ رابطه‌ای برای اصلاح مسیر حرکت جت ریزشی آزاد می‌باشد. برای استخراج رابطه برای اصلاح مسیر حرکت جت ریزشی، از داده‌های آزمایشگاهی استفاده گردید. برای این منظور، حدود ۷۵ درصد از داده‌ها برای آموزش (۱۲۰۰ داده) و ۲۵ درصد داده‌ها برای آزمون (۴۰۰ داده) رابطه استخراج شده از نرم افزار SPSS استفاده گردید. برای رسیدن به رابطه‌ای که با خطای کمتر بتواند مسیر حرکت جت ریزشی را اصلاح نماید، روابط مختلفی مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت رابطه ۱۲ انتخاب و برازش داده شد.

$$\xi = -0.092h_v + 0.041y \quad (12)$$



الف

(a)

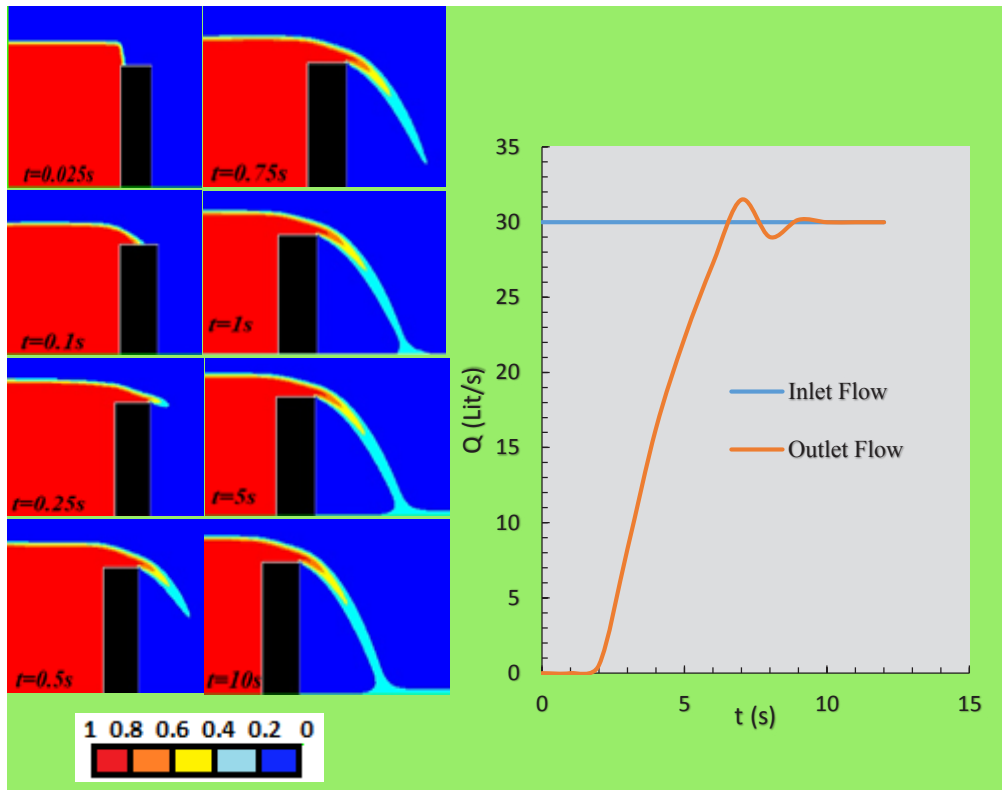


ب

(b)

شکل ۵. پراکندگی نقاط برای داده‌های آزمون، الف: پراکندگی داده‌های رابطه ۱۳ با استفاده از داده‌های آزمون (۲۵٪ داده‌ها)، ب: پراکندگی داده‌های رابطه ۱۴ با استفاده از داده‌های آزمون (۲۵٪ داده‌ها)

Fig. 4. Scatter plots for test data, (a) Scatter plot of Eq. (13) data using the test data (25% of data), (b) Scatter plot of Eq. (14) data using test data (25% of data)

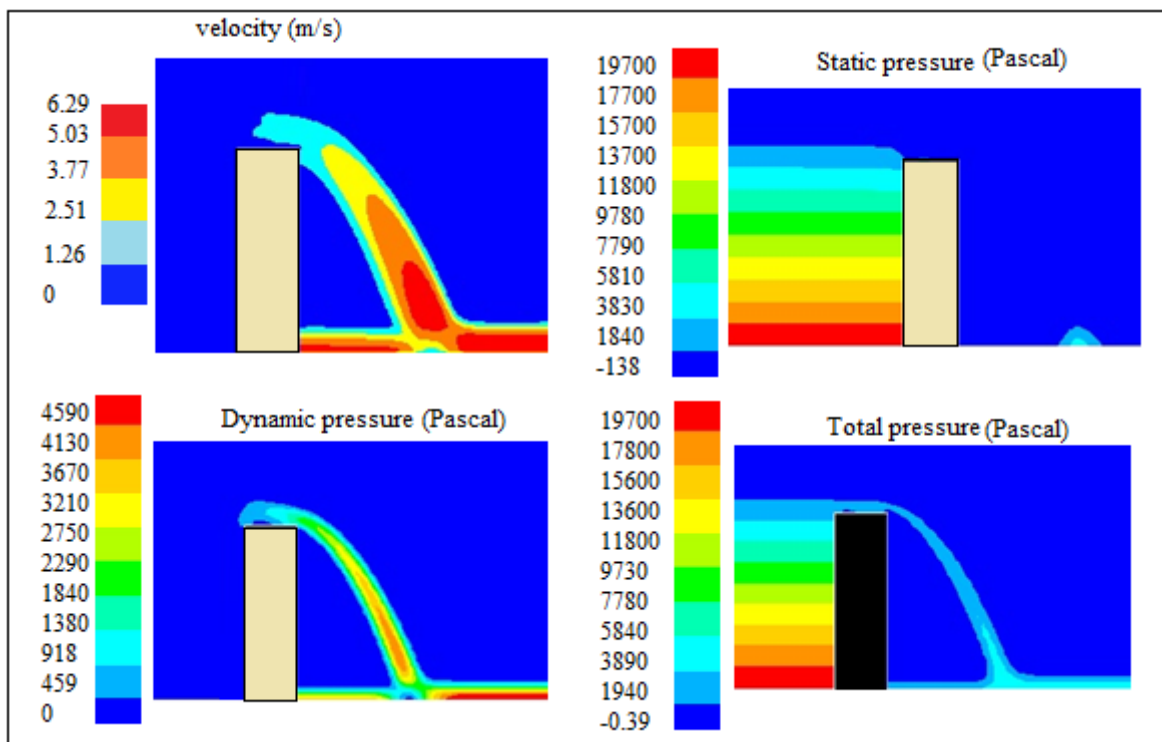


شکل ۶. هیدروگراف جریان ورودی و خروجی به کانال و مسیر حرکت جریان جت ریزشی

Fig. 6. Inlet and outlet flow hydrograph to the channel and trajectory of free falling jet

شکل ۶ هیدروگراف جریان ورودی و خروجی و همچنین پروفیل سطح آب را نشان می‌دهد که در آن دو فاز آب و هوا از یکدیگر قابل تفکیک هستند. با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌گردد که بعد از برقراری جریان در مدل عددی، با گذشت حدوداً ۰٫۲۵ ثانیه جت به انتهای سریز لبه پهن می‌رسد و بعد از زمان حدوداً یک ثانیه جت ریزشی به پای سریز برخورد می‌کند و بعد از ۱۰ ثانیه به حالت پایدار می‌رسد. همچنین با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌گردد که مقداری از جت ریزشی آزاد به سمت سریز برگشته و مقداری هم به طرف پایین دست کانال حرکت می‌کند. همچنین با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌گردد که نمودار جریان ورودی از ابتدا شبیه‌سازی تا به حالت پایدار رسیدن آن در پایین دست ۳۰ لیتر بر ثانیه بوده ولی نمودار جریان خروجی از کانال در ابتدا صفر لیتر بر ثانیه می‌باشد و بعد از گذشت ۱۰ ثانیه

یک حالت پایدار بعد از شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار Ansys-Fluent در شرایطی که ارتفاع سریز ۲ متر، طول تاج سریز ۰٫۵ متر، ارتفاع هد گذرنده از روی سریز ۳۱ سانتی‌متر و سرعت جریان در مقطع بالادست کانال ۰٫۱۵ متر بر ثانیه می‌باشد، نشان داده شده است. همانطور که قبلاً هم اشاره شد برای تعیین مسیر حرکت جت ریزشی (پروفیل سطح آب) در این تحقیق از روش حجم سیال استفاده شده است که این روش بر اساس مقدار حجم سیال در هر سلول پروفیل سطح جریان را ترسیم می‌کند. به این ترتیب که برای سلول خالی مقدار صفر (رنگ آبی در شکل ۶) و برای سلول پر مقدار عددی یک (رنگ قرمز در شکل ۶) و برای سلول‌های دارای حجم مشخصی از سیال مقداری بین صفر و یک اختصاص می‌دهد و بعد از اتصال این اعداد به هم پروفیل سطح جریان تشکیل می‌گردد.



شکل ۷. کنتورهای تغییر سرعت جریان و فشار

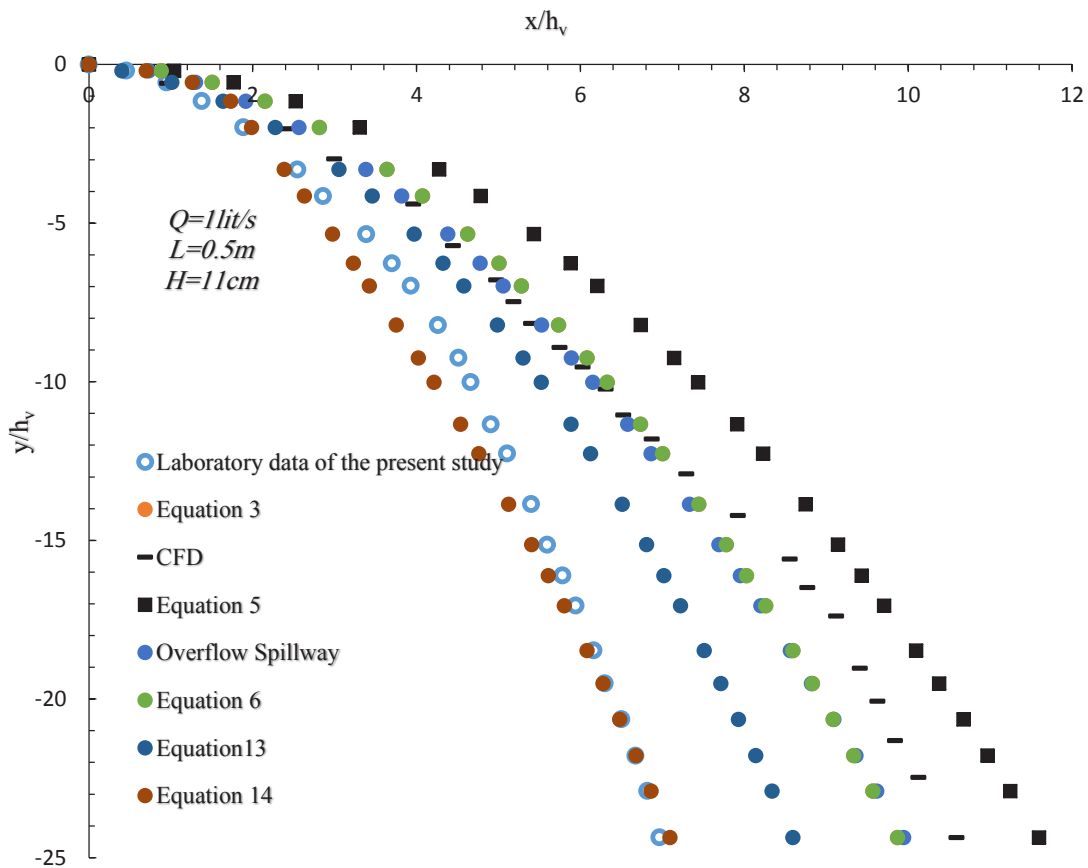
Fig. 7. Velocity and pressure contours

جت ریزشی آزاد و برخورد جت ریزشی آزاد به کف کانال، سرعت در انتهای کانال و در موقعیتی بالاتر از محل برخورد به زمین به حداکثر مقدار خود یعنی ۶٫۲ متر بر ثانیه می‌رسد.

فشار در یک سیال به دو صورت استاتیکی و دینامیکی دسته‌بندی می‌شوند و به مجموع این دو فشار، فشار کل گفته می‌شود. فشار استاتیکی به فشاری گفته می‌شود که بر روی جدار فضای عبوری سیال وارد می‌شود در صورتی که فشار دینامیکی به میزان فشار سرعت سیال عبوری گفته می‌شود. در شکل ۷، فشار استاتیکی، دینامیکی و فشار کل (بر حسب پاسگال) نشان داده شده است. با توجه به شکل ۷ مشاهده می‌گردد که در پایین دست سازه، فشار استاتیکی در محل برخورد جت ریزشی به زمین بیشتر از سایر نقاط در پایین دست سازه است. همچنین به دلیل افزایش سرعت در پایین دست کانال، فشار دینامیکی بیشتر می‌شود. فشار کل که مجموع فشار دینامیکی و استاتیکی است در بالادست ناشی از فشار استاتیکی بوده و در پایین دست از

مقدار دبی ورودی به کانال با دبی خروجی از کانال برابر می‌شود. به بیان دیگر بعد از گذشت ۱۰ ثانیه مقدار دبی که به کانال وارد می‌شود، با مقدار دبی که از کانال خارج می‌شود برابر می‌شود و حل به یک حالت پایدار می‌رسد. همچنین در ثانیه هفتم مقدار دبی خروجی بیشتر از مقدار دبی ورودی است. زمانی که جت ریزشی آزاد به زمین برخورد می‌کند مقداری از دبی به سمت سازه بر می‌گردد. دلیل این بیشتر شدن دبی، برگشت آب از پای سازه به سمت خروجی می‌باشد. در شکل ۷ کنتورهای تغییر سرعت جریان عبوری از روی سرریز و همچنین تغییرات فشار بعد از شبیه سازی عددی در نرم افزار AnsysFluent و بعد از رسیدن به حالت پایدار در شرایط جریان فوق‌الذکر نشان داده شده است.

همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است، با عبور جریان از روی سرریز بر سرعت جریان افزوده شده و مقدار سرعت جریان در انتهای تاج سرریز برابر ۲٫۵۱ متر بر ثانیه و بعد از جدا شدن جریان از سرریز و تشکیل



شکل ۸. مقایسه معادله مسیر روابط مختلف با نتایج آزمایشگاهی

Fig. 8. Comparison of trajectory equation of different relationships with laboratory results

مجموع هر دو فشار استاتیکی و دینامیکی بدست آمده است.

۳-۱- مقایسه معادله مسیر

در این قسمت به بررسی و مقایسه مسیر جت ریزشی آزاد با استفاده از نتایج آزمایشگاهی تحقیق حاضر، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی انجام شده در این تحقیق و همچنین روابط ارائه شده توسط سایر محققین پرداخته شده است. در شکل ۸ نمودار مقایسه پروفیل جت ریزشی آزاد برای روابط مختلف و نتایج تحقیق حاضر نشان داده شده است.

شکل ۸، مسیر حرکت جت ریزشی آزاد تحت شرایط مشخص شده در نمودار را با استفاده از روابط مختلف و داده‌های آزمایشگاهی و همچنین

داده‌های استخراج شده از شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد. علاوه بر آن، یک سرریز اوجی با همان ارتفاع آب روی سرریز محاسبه گردید. برای طراحی این نوع از سرریز سدها، مطالعات ارزنده‌ای توسط USBR انجام شده است. بر اساس داده‌های این سازمان، پژوهشکده آب در USACE چندین شکل برای تعیین منحنی تاج و پایین‌دست سرریز ارائه نموده است. چنانچه در حالت کلی یک سرریز لبه آبریز در نظر گرفته شود، منحنی جلوی تاج این نوع سرریز (وجه رو به پایین‌دست) از معادله ۱۵ تبعیت می‌کند [۲۵]. در تحقیق حاضر نیز از رابطه ۱۵ برای رسم منحنی جلوی تاج سرریز در حالت شیب قائم بالادست استفاده شده است.

نمی‌کنند. در صورت استفاده از رابطه ۵، پروفیل جت پرتابی حالت کم شیب‌تر و ملایم‌تر به خود می‌گیرد (فاصله محل برخورد جت در حوضچه آرامش با بدنه سد بیشتر می‌شود). هیچ یک از نشریات ارائه این معادله، دلیل خاصی برای گنجاندن عبارت عمق ندارند. در حالت کلی می‌توان اظهار کرد که دقت روابط ارائه شده در تحقیق حاضر بیشتر از سایر معادلات می‌باشد. همچنین مسیرهای استخراج شده از روابط ۳، ۶ و همچنین منحنی جلوی تاج سرریز اوجی که تقریباً روی هم افتاده‌اند نتایج قابل قبول‌تری از شبیه‌سازی‌های عددی و معادلات دیگر دارند. علاوه بر موارد ذکر شده، باید به این نکته نیز توجه نمود که یکی از دلایل خطای زیاد نمونه شبیه‌سازی شده نسبت به داده‌های آزمایشگاهی، می‌تواند ناشی از مدل کردن جت ریزشی آزاد به صورت دو بعدی باشد. این درحالی است که جریان واقعی در آزمایشگاه به صورت سه‌بعدی است. همچنین داده‌های آزمایشگاهی متاثر از مقاومت هوا بوده ولی داده‌های استخراجی از نمونه‌های شبیه‌سازی شده تحت تاثیر مقاومت هوا قرار نگرفته‌اند که این عامل نیز می‌تواند یکی دیگر از خطاهای نمونه شبیه‌سازی شده برای پیش‌بینی مسیر حرکت جت‌های ریزشی آزاد باشد.

نمودار شکل ۸ برای مقایسه مسیر حرکت جت ریزشی آزاد برای یک سری آزمایش ارائه شده است. در جدول ۲، خطای نسبی برای کل آزمایشات ارائه شده است.

با توجه به جدول ۲ مشاهده می‌شود که بیشترین خطا در محاسبه مسیر حرکت جت ریزشی آزاد مربوط به معادله ۵ و کمترین خطا مربوط به روابط ارائه شده در تحقیق حاضر می‌باشد.

۳-۲- تاثیر هد و عرض مقطع بر برد جت ریزشی

معادله پیوستگی که به صورت $Q=AV=bH_{\text{ovetop}}V$ تعریف می‌شود، برای یک عرض ثابت، با افزایش دبی جریان ورودی به کانال، عمق و سرعت جریان افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش سرعت جریان و با توجه به معادله پرتابه (رابطه ۱) برد جت ریزشی بیشتر می‌شود. علاوه بر آن با توجه به معادله پیوستگی و معادله پرتابه، برای یک دبی ثابت با افزایش عرض مقطع، سرعت جریان کاهش پیدا می‌کند و برد جت ریزشی کمتر می‌گردد. در شکل ۹ الف و ب به ترتیب نمودار روند تاثیر افزایش عرض برای یک دبی ثابت و افزایش دبی برای یک عرض ثابت بر برد جت ریزشی در ارتفاع ۲ متری از لبه سرریز لبه پهن مستطیلی ارائه شده است.

$$\left(\frac{x}{H}\right)^{1.85} = 2 \times \left(\frac{y}{H}\right) \quad (15)$$

در رابطه ۱۵، x و y مختصات تاج سرریز هستند که مبدا آن در بالاترین نقطه تاج قرار دارد و H هد طراحی می‌باشد.

در شرایط آزمایشگاهی عوامل مختلفی بر مسیر حرکت جت ریزشی آزاد تاثیر دارند که یکی از مهمترین این عوامل مقاومت هوا می‌باشد. مقاومت هوا باعث می‌شود که نیرویی در خلاف جهت حرکت جت ریزشی به آن اعمال شود و مسیر طی شده توسط جت ریزشی کمتر از مقدار محاسبه شده آن با استفاده از روابط مختلف باشد. در تحقیق حاضر نیز مقاومت هوا در استخراج داده‌ها دخیل بوده و داده‌های استخراجی متاثر از مقاومت هوا می‌باشند. با توجه به نمودار شکل ۸ مشاهده می‌گردد که اگر داده‌های آزمایشگاهی به عنوان مبدا در نظر گرفته شوند، کمترین خطا مربوط به روابط استخراج شده در تحقیق حاضر و بیشترین خطا مربوط به رابطه ارائه شده توسط رابطه ۵ می‌باشد. همچنین با توجه به شکل ۸ مشاهده می‌گردد که مسیر حرکت جت ریزشی آزاد استخراج شده از رابطه ۳ و رابطه ارائه شده توسط گروه مهندسی ارتش امریکا (رابطه ۶) با منحنی جلوی تاج سرریز لبه آبریز مطابقت زیادی داشته و مسیر شبیه‌سازی شده در نرم افزار فلوئنت نزدیک این سه مسیر می‌باشد. علاوه بر آن، مسیر محاسبه شده با استفاده از رابطه ۵ و با $k=0.9$ و همچنین با فرض $d+h_v=H_{\text{ovetop}}$ دارای خطای زیادی نسبت به داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد.

معادله ۵ ممکن است در ابتدا ساده به نظر برسد، زیرا با یک تغییر در رابطه ۳ بدست آمده است. در مورد جریان عبوری از روی سد، اگر تلفات نادیده گرفته شود، $d+h_v$ تقریباً برابر با هد عبوری از روی سد است [۲۶، ۲۷]. با مقایسه معادلات ۳ و ۵ که مستقیماً از معادله حرکت پرتابه به دست آمده‌اند، ملاحظه می‌شود که این معادلات حتی زمانی که $K=1$ است، برابر نیستند. زمانی که $K=1$ است، معادله ۳ و ۵ از لحاظ دیمانسیون^۱ برابر (هر سه جمله دارای بعد طول است) ولی از لحاظ عددی برابر نیستند. معادله ۵ در صورتی درست خواهد بود که کل هد گذرنده از روی سد (H_{ovetop}) به هد سرعت (h_v) تبدیل شود. به عنوان اولین تقریب، در جریان از روی سد، عمق و سرعت باید بحرانی باشد. سردرگمی بیشتر به این دلیل ایجاد می‌شود که بیشتر استنادهای رابطه ۵ به وضوح عبارات d و h_v را در متن تعریف

جدول ۲. مقایسه خطای مسیر نسبت به داده‌های آزمایشگاهی (برای کل داده‌ها)

Table 2. Trajectory error comparison, relative to the laboratory data (for total data)

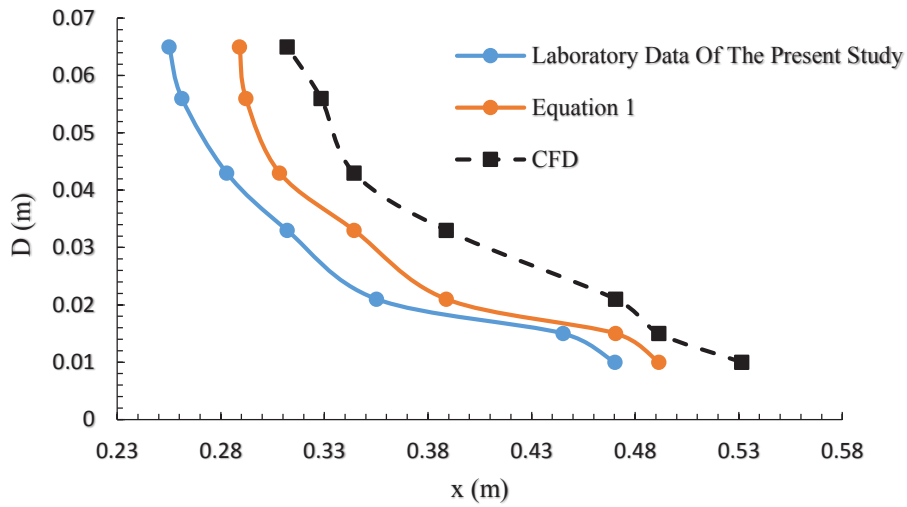
جت ریزشی آزاد		
معادلات	خطای نسبی (RE)	جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)
Laboratory data of the present study	0%	0
Equation 19	3.02%	0.21
Equation 20	9.14%	0.95
Overflow Spillway (Eq. 21)	18.05%	1.67
Equation 3	20.6%	1.88
Equation 7	21.3%	1.89
CFD	25.5%	2.1
Equation 5	38.95%	2.9

شد. ارتفاع جت پرتابی از روی سرریز سد در مدل آزمایشگاهی برابر ۲/۵ متر بود که با توجه به امکانات آزمایشگاهی انتخاب شد. برای شبیه‌سازی عددی از نرم افزار Ansys-Fluent استفاده شد. نتایج نشان داد که بیشترین خطا در محاسبه مسیر حرکت جت ریزشی آزاد، مربوط به معادله ۵ با خطای نسبی ۳۸٫۹۵ درصد و کمترین خطا مربوط به روابط ارائه شده در تحقیق حاضر (معادلات ۱۳ و ۱۴ به ترتیب با خطای ۳٫۰۲ و ۹٫۱۴ درصد) می‌باشند. همچنین مسیرهای استخراج شده از روابط ۳، ۶ و همچنین منحنی جلوی تاج سرریز اوجی (به ترتیب با خطای نسبی ۲۰٫۶، ۲۱٫۳ و ۱۸٫۰۵ درصد) که تقریباً روی هم افتاده‌اند نتایج قابل قبول‌تری از شبیه‌سازی‌های عددی و معادلات دیگر دارند. تاثیر هد گذرنده از روی سازه و عرض مقطع عبوری جریان بر برد جت ریزشی آزاد مورد بررسی قرار گرفت و نتایج به دست آمده نشان داد که کاهش عرض در دبی ثابت و افزایش هد گذرنده از روی سازه در عرض ثابت، باعث افزایش برد جت ریزشی می‌شوند. سرعت و فشار جریان در محل برخورد جت به پای سازه بیشترین مقدار خود را دارد که باید در طراحی مورد توجه قرار گیرد.

با توجه به نمودار شکل ۹ الف و ب مشاهده می‌گردد که برای هر سه حالت بررسی شده در تحقیق حاضر (داده‌های آزمایشگاهی، داده‌های حاصل از شبیه‌سازی عددی و معادله پرتابه)، با افزایش عرض مقطع سرریز لبه پهن مستطیلی، برد جت ریزشی کمتر و با افزایش دبی عبوری از سرریز، برد جت ریزشی بیشتر می‌شود. به بیان دیگر برای یک دبی ثابت با افزایش عرض محل برخورد جت ریزشی به زمین به پای سازه نزدیکتر و برای یک عرض ثابت با افزایش دبی جریان، محل برخورد جت ریزشی به زمین از پای سازه دورتر می‌گردد.

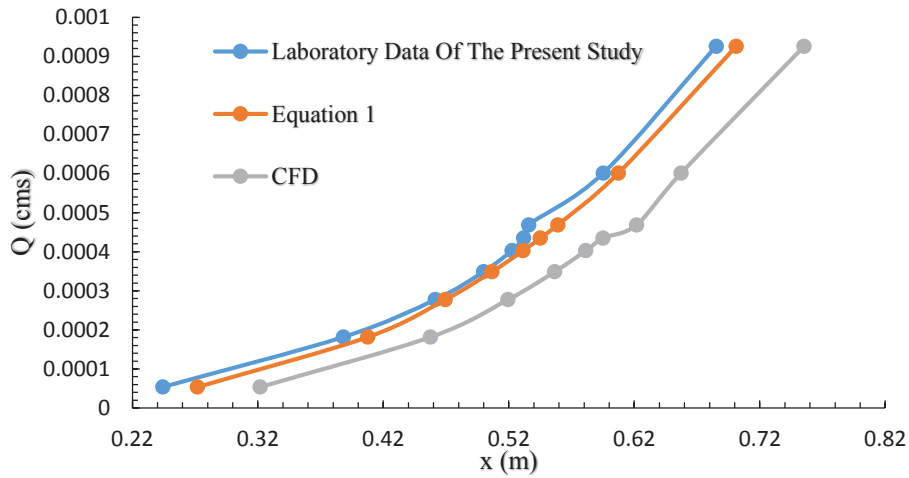
۴- نتیجه‌گیری

درخصوص مسیر حرکت جت‌های ریزشی از روی سدهای ذخیره‌ای تحقیقات اندکی صورت گرفته است. تعیین محل برخورد جت آب به کف رودخانه و نیز سرعت و فشار جریان در محل اصابت به کف رودخانه می‌تواند در طراحی پروژه‌های سدسازی مهم باشد. در تحقیق حاضر، به بررسی مسیر حرکت جت‌های ریزشی به صورت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی پرداخته



الف

(a)



ب

(b)

شکل ۹. تاثیر عرض و دبی بر برد جت ریزشی آزاد، الف: تاثیر افزایش عرض برای یک دبی ثابت بر برد جت ریزشی ، ب: تاثیر افزایش دبی برای یک عرض ثابت بر برد جت ریزشی

Fig. 9. Effect of width and discharge on the domain of a free falling jet, (a) The effect of increasing the width for a constant discharge on the range of the jet plane, (b) The effect of increasing the discharge for a constant width on the range of the jet plane

Society of Civil Engineers, Vol. 82, No. HY4 Paper No. 1038, 1038-30–1038-35, (1956).

- [8] A. Taheri Aghdam, “experimental investigation of the breakup length of free falling jets”. architecture, civil engineering, earth sciences and healthy environment, Hamadan, <https://civilica.com/doc/1893232>. (2024). (In Persian).
- [9] M. Mazidi Sharaf Abadi, SH. Talebi, “Experimental study of water fall jet discretization”, 20th Annual Conference on Mechanical Engineering, ISME20_239, (2012). (In Persian).
- [10] R. Daneshfaraz, R. Norouzi, H. Abbaszadeh, & H. M. Azamathulla, “Theoretical and experimental analysis of applicability of sill with different widths on the gate discharge coefficients”. *Water Supply*, 22(10), 7767-7781. (2022). <https://doi.org/10.2166/ws.2022.354>
- [11] Anonymous, ANSYS FLUENT Tutorial Guide. (2015).
- [12] M. Hamzei, M. Javan, A. Eghbalzadeh, “The effect of the upstream and downstream face slopes of the broad crested weirs on the flow characteristics”, *Journal of Water and Soil Conservation*; 20(2): 23-43, (2012). (In Persian).
- [13] F. Salmasi, B. Nourani, H. Arvanaghi, F. Rezaei, “Undular Flow Conditions and Discharge Coefficient in Rectangular Broad-Crested Weirs”, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(1), 8-8. doi: 10.22060/ceej.2021.18314.6830, (2022). (In Persian).
- [14] R. Daneshfaraz, R. Norouzi, H. Abbaszadeh, A. Kuriqi, & S. Difrancesco, “Influence of sill on the hydraulic regime in sluice gates: an experimental and numerical analysis”. *Fluids*, 7(7), 244. (2022). <https://doi.org/10.3390/fluids7070244>
- [15] R. Daneshfaraz, R. Norouzi, H. Abbaszadeh, “Effect of geometric shapes of chimney weir on discharge coefficient”. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 12(1), 27-38. (2024). DOI: 10.1080/23249676.2023.2192977.
- [16] Bureau of Reclamation, “Design of gravity dams”, United States Department of the Interior, United States

۵- فهرست علائم

- X و Y مختصات لبه پایین جت ریزشی
 V_0 سرعت اولیه جت ریزشی
 θ_0 زاویه اولیه جت از افق
 g شتاب گرانشی
 t_0 ضخامت جت آبی
 q دبی در واحد عرض تاج
 D عرض مقطع خروجی جت ریزشی آزاد
 P ارتفاع ریزش از سطح زمین
 H_{ovetop} هد گذرنده از روی سازه
 y_c عمق بحرانی روی سرریز
 y_b عمق در انتهای سرریز (محل ریزش)

منابع

- [1] A. Salemnia. M. Fathi Moghadam, “Investigation of Break up Length of free Water Jet”, *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* No. 2, Vol. 13, 309-318, (2019). (In Persian)
- [2] T. L. Wahl, K.H. Frizell, E. A. Cohen, “Computing the Trajectory of Free Jets”. *J. Hydraulic. Eng.*, 134_2_, 256-260, (2008).
- [3] A. Taheri Aghdam, F. Salmasi, A., Hosseinzade Dalir, & A. Abbaspour, “Experimental and Numerical Investigation of the Trajectory of Outlet Jets through the Pressurized Discharge Gates of Reservoir Dams”. *Journal of Water and Sustainable Development*, 10(3), 109-120. (2023) doi: 10.22067/jwsd. v10i3.2301-1207. (In Persian).
- [4] S. Salmanzadeh, J. Ahadiyan, “Distribution limit of jet flow in the same and dissimilar phases of ambient fluid”, *Irrigation Sciences And Engineering*, No. 1, Vol. 36, 93 – 107, (2016). (In Persian).
- [5] H. Rouse, “Discharge characteristics of the free overfall”, *Civ.Eng. (N.Y.)*, 6, 257, (1936).
- [6] F. M. Henderson, “Open channel flow, MacMillan”, New York, 191–197, (1966).
- [7] J. W. Delleur, J. C. I. Dooge, & K. W. Gent, “Influence of slope and roughness on the free overfall”, *Proc. American*

- [23] A. Bayon, D. Valero, "Performance assessment of OpenFOAM and FLOW-3D in the numerical modeling of a low Reynolds number hydraulic jump", *Environ. Model. Softw.*, 80:322-335. (2016).
- [24] P. Toro, F. Bombardelli, J. Paik, "Detached eddy simulation of the no narrated skimming flow over a stepped spillway", *J. Hydraul. Eng.*, 143 (2017).
- [25] K. Samani, A.R.S, Bagheri, "Design of channels and water conveyance structures". Arkan Danesh Publications, pp 264–269. (2014). (In Persian).
- [26] A. Taheri Aghdam, F. Salmasi, A. Hossein Zadeh Dalir, A. Abbaspour, J. Abraham. Experimental and numerical investigation of the trajectories of free and pressurized jets through storage dams, *Water Supply*. 23(3), 1297–1318, 2023.
- [27] A. Taheri Aghdam, A. Hossein Zadeh Dalir, F. Salmasi, A. Abbaspour, J. Abraham. Numerical and Experimental Study of Trajectory for Free-Falling Jets, *Iranian journal of science and technology, transactions of civil engineering*, 9(5), 62-70, 2023.
- Government Printing Office, Denver, 198–199, (1976).
- [17] Bureau of Reclamation, "Design of small dams", 1st Ed., United States Department of the Interior, United States Government Printing Office, Denver, 282–291, (1960).
- [18] Bureau of Reclamation, "Design of gravity dams", United States Department of the Interior, United States Government Printing Office, Denver, 198–199, (1976).
- [19] Bureau of Reclamation, "Design of arch dams", United States Department of the Interior, United States Government Printing Office, Denver, 312–313, (1977).
- [20] G. W. Annandale, "Scour technology: Mechanics and engineering practice", McGraw-Hill, New York, 146–151. (2006).
- [21] U.S. Army Corps of Engineers, "High overflow dams, energy dissipators", flip bucket throw distance." Hydraulic design criteria, sheet 112-8, Coastal and Hydraulics Laboratory, Engineer Research and Development Center, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss, (1964).
- [22] W. Hirt, B.D. Nichols, "Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries", *J. Comput. Phys*, 39 :201–225. (1981).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Taheri Aghdam, A. H. Zadeh Dalir, F. Salmasi, A. Abbaspour, *Numerical and experimental study of trajectory for free falling jets, Amirkabir J. Civil Eng.*, 56(9) (2024) 1125-1146.

DOI: [10.22060/ceej.2024.21277.7674](https://doi.org/10.22060/ceej.2024.21277.7674)



