

Research Paper

Numerical Simulation of the Bed Scouring Downstream Triangular Labyrinth Weirs Using Flow-3D

Nazila Kardan^{1*}, Mehdi Komasi², Sara Saminfar³

- 1- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.
- 2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Ayatollah Boroujerdi University, Boroujerd, Iran.
- 3- Graduated Msc Student in Civil Engineering-Water Engineering and Hydraulic Structures, Department of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.



10.22125/IWE.2023.407266.1737

Received:

November 26, 2023

Accepted:

March 20, 2024

Available online:

June 29, 2024**Keywords:****Triangular Labyrinth weir, Scouring, Numerical simulation, Flow-3D.**

Abstract

Labyrinth weirs have always received special attention compared to linear weirs due to the increase in flow capacity through the increase in width. In addition to the importance of flow traversability in congressional weirs, scouring and erosion of the bed downstream of these types of weirs has also a special importance in order to control and protect such structures against destructions; Because due to the increase in the flow discharge over the weir, the amount of scouring at the downstream of the weir also increases. In the present study, the numerical model of labyrinth weirs with a triangular plan has been investigated. The number of 23 models was simulated using Flow-3D software to investigate the effect of various factors such as changing in the height of the dam body, changing the height of the weir apex (weir height), the discharge passing over the weir, and the effects of different angles of the weir apex in the plan on the amount of bed erosion in the downstream of Labyrinth weir was studied. Validation of the numerical simulation results with the experimental model indicated a very good agreement between the numerical simulation and the experimental values. According to the obtained results, it can be expressed that by increasing the height of the weirs and the height of the dam body, the velocity and interference of the flow blades while passing over the weir, increases simultaneously, which in turn it intensifies the erosion of the downstream bed. However, the increase in the flow velocity at the downstream of the dam, the occurrence of hydraulic jump and the flow recursion towards upstream causes a significant decrease in scouring depth in the downstream bed of labyrinth weir. This reduction in the weir with an apex angle of 60 degrees is more than other models and the scour depth is reduced from 31 to about 90%. Also, the amount of flow traversability in this type of weir is more than other models, which made the weir with an angle of 60 degrees to be introduced as the most optimal weir in investigating the efficiency of the weir and the reduction of scouring compared to linear models, 45 and 90.

Corresponding Author: Nazila Kardan**Address: Associate Professor, Department of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran**
Email: n.kardan@azaruniv.ac.ir
Tel:

1. Introduction

Weirs are one of the oldest low head hydraulic structures that are constructed in the waterways for many purposes such as flow measurement, raising the upstream water depth, and decreasing the flow velocity and etc. Local scour at downstream of weirs is an essential issue for researchers in order to differentiate the main variables governing this phenomenon and also to find solutions. A labyrinth weir design and modeling criteria was introduced by Falvey (2003). Important factors such as crest shape, weir height and sidewall angle which affect the discharge characteristics were also studied. Several configurations of spillway prototype of labyrinth crest were also included. Predicting the maximum scour depth at the downstream of grade-control structures was introduced by Guven and Gunal (2008) using the explicit neural networks formulation (ENNF). Saleh et al. (2019) studied experimentally and numerically the suitable dimensions and shape of weir's crest to minimize the hydraulic errors of the weirs and to get the most economically optimum structure by using labyrinth weir. Results illustrated that the crested angle 60° of the labyrinth weir enhanced the hydraulic efficiency and decrease energy losses. A labyrinth weir could be described as a continuous and broken weir plan in a trapezoidal or triangular form. Thus, for a fixed width, labyrinth weirs have a longer crest distance comparing to linear one. Although numerous methods of designing have been published for labyrinth weirs, there is insufficient designing information available regarding local scouring downstream of a labyrinth weir. Present study is an attempt to extend the previous efforts by investigating the influence of the apex angle of triangular labyrinth weir for expecting and controlling of scour activities downstream of triangular labyrinth weir.

2. Materials and Methods

In the present study, investigation of the bed scouring downstream of triangular labyrinth weirs having three different apex angles has been considered. A numerical model was conducted in an artificial small channel of 10 m length, 50 cm width and 80 cm height. The weir has 5 cm crest width; 30 cm crest length, 30 cm height, and slope of 1:1. Four different weir apex angles (90° , 60° and 45°) were tested for the labyrinth weir. A solid floor of 1.2 m was made to avoid the deformations under the action of water. Tests include monitoring different scour parameters downstream of the triangular labyrinth weir. Numerical simulations were also included linear weir crest. It was considered as a reference in order to estimate the changing of using labyrinth weir on scour parameters. Two flow discharges were applied ($Q = 5.0$ and 9.0 l/s) for each set of the models.

A multi-phase computational domain containing water flow in the channel and an air region at the top was simulated by the multi-phase flow model. In numerical simulations, providing an appropriate meshing is very important in preparation of the computational domain. The accuracy of the results, the convergence and the computational time are the main parameters that are strongly influenced by the size and alignment of the cells. Thus, three different number of cells applied the computational domain to investigate the effect of cell size on scouring.

- FLOW-3D Numerical Software

FLOW-3D provides a complete and versatile CFD simulation platform for engineers investigating the dynamical behaviors of liquids and gas in a wide range of industrial applications and physical processes. FLOW-3D focuses on free surface and multi-phase applications, serving a broad range of industries including microfluidics, bio-medical devices, water civil infrastructure, aerospace, consumer products, additive manufacturing, inkjet printing, laser welding, automotive, offshore, energy and automotive.

As a uniquely powerful, multiphase tool, FLOW-3D provides the functionality; ease-of-use and power that helps engineers boost their modelling objectives. Built for the highest level of performance, FLOW-3D seamlessly scales from standard workstations to hundreds of CPU cores on high performance computing solutions.

3. Results

Numerical simulations were conducted to investigate maximum scour depth, maximum scour length, maximum deposition depth, and maximum deposition length on the downstream of the labyrinth weir for varied flow conditions. Models were executed for three different apex angle of the weir ($\theta = 90^\circ$, 60° and 45°) to reach the best apex angle that leads to minimize the scour parameters. The maximum scour parameters were also measured for linear weir crest for the purpose of comparing.

For the regarded flow conditions, when using triangular labyrinth weir with the suggested apex angles, all of the scouring and deposition incidents decreased comparing to the linear weir case. In the series of simulations, it was also observed that the weir apex angle of 60° presents more reduction in all scour and deposition parameters (the values of D_s , L_s , D_d and L_d were smaller than the values of scour parameters for other angles). In other words, about 89%, 77%, 45%, and 49% reduction in the relative scour depth, scour length, deposition depth and deposition length respectively were observed with $\theta = 60^\circ$ comparing with linear weir case. Labyrinth weir decrease water height above weir crest due to the increase of its crest length so the potential head downstream of the weir was smaller than linear crest. Hence, head losses with respect to total head were maximized. Moreover, the maximum values of the dissipated energy through the jump are obtained by the apex angle of $\theta = 60^\circ$. It is obvious that, the effect of the apex angle of 90° on the values of the maximum relative scour and deposition parameters was less significant than that of other apex angles.

4. Discussion and Conclusion

Simulation results indicated the reliability of using the triangular labyrinth weir as a very efficient mean of reducing scour phenomenon. Results demonstrated that for all weir apex angles, a decrease in different scour and deposition parameters were observed. Lower scour parameters are obtained for weir apex angle of $\theta = 60^\circ$ compared to linear weir case. Consequently, the best weir apex angle, $\theta = 60^\circ$ has the potency to minimize scour parameters and it maximizes energy dissipation compared to linear weir case. The scour map is symmetrical and maximum scour occurs either on the left or right side of the longitudinal centerline of the movable bed.

5. Six important reference

- 1) Aly-Elnikhely, E. and Fathy, I. 2020. Prediction of scour downstream of triangular labyrinth weirs. *Alexandria Engineering Journal*, 59(2): 1037-1047.
- 2) Crookston, B.M. and Tullis, B.P. 2013. Hydraulic design and analysis of labyrinth weirs I: discharge relationships. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(5): 363-370.
- 3) Jüstrich, S., Pfister, M. and Schleiss, A.J. 2016. Mobile riverbed scour downstream of a Piano Key weir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(11): 40-46.
- 4) Saleh, O.K., Elnikhely, E.A. and Ismail, F. 2019. Minimizing the hydraulic side effects of weirs construction by using labyrinth weirs. *Flow Measurement and Instrumentation*, 66: 1–11.
- 5) Guven, A. and Gunal, M. 2008. Prediction of scour downstream of gradecontrol structures using neural networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 134(11): 1656–1660.
- 6) Falvey, H.T. 2003. *Hydraulic design of labyrinth weirs*. Reston, VA: ASCE Press (American Society of Civil Engineers).

بررسی عددی میزان آبشستگی در پایین دست سرریزهای کنگره‌ای با پلان مثلثی با استفاده از نرم افزار Flow-3D

نازیلا کاردان^{۱*}، مهدی کماسی^۲، سارا ثمین فر^۳

تاریخ ارسال: ۱۴۰۲/۰۹/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۵

مقاله پژوهشی

چکیده

سرریزهای کنگره‌ای به علت افزایش ظرفیت عبوری از طریق افزایش عرض، نسبت به سرریزهای خطی همواره مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته‌اند. علاوه بر اهمیت گذردهی جریان در سرریزهای کنگره‌ای، آبشستگی و فرسایش بستر در پایین دست این نوع سرریزها جهت کنترل و حفاظت از این گونه سازه‌ها در برابر خرابی‌ها نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ زیرا به واسطه افزایش دبی عبوری از روی سرریز، میزان آبشستگی نیز در پای سرریز افزایش می‌یابد. در پژوهش حاضر مدل عددی سرریزهای کنگره‌ای با پلان مثلثی، مورد ارزیابی قرار گرفته است. تعداد ۲۳ مدل با استفاده از نرم افزار Flow-3D جهت بررسی میزان اثرگذاری عوامل مختلف نظیر تغییر در ارتفاع بدنه سد، تغییر در ارتفاع کنگره‌ها (ارتفاع سرریز)، میزان دبی عبوری از روی سرریز، و زوایای مختلف کنگره‌ها در پلان بر میزان فرسایش بستر در پایین دست سرریزهای کنگره‌ای مورد مطالعه قرار گرفت. صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی عددی با مدل آزمایشگاهی نشان‌دهنده مطابقت بسیار خوب شبیه‌سازی عددی با مقادیر تجربی بود. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان بیان کرد با افزایش ارتفاع کنگره‌های سرریز و افزایش ارتفاع بدنه سد، سرعت و تداخل تیغه‌های جریان به هنگام عبور از روی سرریز به‌طور هم‌زمان افزایش می‌یابد که این امر خود موجب تشدید در فرسایش بستر پایین دست می‌گردد. لیکن افزایش سرعت جریان در پای سد، وقوع پرش هیدرولیکی و برشگت جریان به سمت بالادست موجب کاهش قابل توجه عمق آبشستگی در بستر پایین دست سرریزهای کنگره‌ای می‌گردد. این کاهش در سرریز با زاویه راس ۶۰ درجه بیشتر از سایر مدل‌ها بوده و عمق آبشستگی از ۳۱ تا حدود ۹۰ درصد کاهش می‌یابد. همچنین میزان گذردهی جریان در این نوع سرریز نیز نسبت به سایر مدل‌ها بیشتر بوده که موجب شده است در بررسی توام دو پارامتر راندمان سرریز و عمق آبشستگی، سرریز با زاویه ۶۰ درجه به عنوان بهینه‌ترین سرریز نسبت به مدل‌های خطی، ۴۵ و ۹۰ معرفی گردد.

واژه‌های کلیدی: سرریز کنگره‌ای؛ شبیه‌سازی عددی؛ آبشستگی؛ راندمان هیدرولیکی، نرم افزار Flow-3D.

^۱ دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران. ایمیل: n.kardan@azaruniv.ac.ir

^۲ دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت اله بروجردی (ره)، بروجرد، ایران. ایمیل: komasi@abru.ac.ir

^۳ کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران. ایمیل: sarah.scivil@gmail.com



مقدمه

آب یکی از مهم‌ترین عناصر در زندگی بشر است که جهت بهره‌برداری از آن سازه‌های مختلفی ساخته شده‌اند. سازه‌های هیدرولیکی انواع مختلفی داشته و استفاده از آن‌ها به نوع منبع آب و هدف مورد استفاده بستگی دارد. یکی از مهم‌ترین سازه‌های هیدرولیکی، سرریزها هستند که به منظور عبور و انتقال آب‌های اضافی و سیلاب‌ها از بالادست به پایین دست سدها استفاده می‌شوند. در واقع وظیفه آن‌ها کنترل ارتفاع و حجم آب پشت دریاچه سد است و طراحی دقیق و مناسب آن‌ها از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. از جمله سرریزهایی که در مقایسه با سایر انواع سرریزها، مورد توجه طراحان قرار گرفته، سرریزهای کنگره‌ای می‌باشند که به دلیل افزایش میزان گذردهی آب و نیز پیچیدگی در مباحث اجرایی آن‌ها، از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند؛ از اینرو پژوهشگران در دهه‌های گذشته مطالعات گسترده‌ای بر روی سرریزهای کنگره‌ای انجام داده‌اند (Crookston and Tullis, 2013; Falvey, 2003; Gupta et al., 2015).

جنتلینی (۱۹۴۱) نخستین پژوهشگری بود که به طور مستقیم روی سرریزهای کنگره‌ای کار کرد (Gentilini, 1941). امانیان (۱۹۸۷) سرریزهای خطی و سرریزهای کنگره‌ای مثلثی با تاج نیم‌دایره‌ای را مورد مطالعه قرار داد. ایشان بیان نمودند با افزایش بار آبی، کارایی گذردهی سرریزهای کنگره‌ای به علت استغراق و تداخل تیغه‌ها کاهش می‌یابد. از سویی دیگر نیم‌دایره کردن تاج سرریز نسبت به سرریزهای با شکل تاج مختلف، موجب بهبود کارایی سرریزها می‌گردد (Amanian, 1987).

حیدرپور و همکاران (۲۰۰۷) سرریزهای کنگره‌ای با پلان مستطیلی و U شکل را بررسی نموده و تأثیر پارامترهایی نظیر ارتفاع سرریز، طول موازی جهت جریان، و زاویه رأس سرریز بر ضریب دبی را مورد بررسی قرار داده و نتایج را با نتایج مشابه برای سرریزهای خطی مقایسه نمودند (Heidarpour et al., 2007). قدسیان (۲۰۰۹) مطالعات آزمایشگاهی بر روی سرریز کنگره‌ای مثلثی با شکل تاج‌های متفاوت را انجام داده و پس از انجام تحلیل ابعادی رابطه‌ای برای محاسبه ضریب دبی و هد-

دبی معرفی نمود. ضریب دبی تابعی از نسبت بار آبی روی سرریز به ارتفاع سرریز، نسبت طول سرریز به پهنای سرریز و شکل تاج به دست آمد (Ghodsian, 2009).

کورکستون و تولیس (۲۰۱۲b, ۲۰۱۲a, ۲۰۱۱, ۲۰۱۰) با انجام یکسری آزمایش‌ها به بررسی حالت مختلف قرارگیری سرریز داخل مخزن و کانال پرداختند (Crookston and Tullis, 2010; 2011; 2012a, 2012b).

با وجود بررسی‌ها و مطالعات گسترده‌ای که در زمینه عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای انجام یافته است مطالعات بسیار اندکی در زمینه فرسایش بستر پائین دست این نوع از سرریزها وجود دارد.

اسکورلوک و همکاران (۲۰۱۲) به مطالعه عمق آبشستگی پائین دست سازه‌های کنترل جریان پرداخته و معادلاتی برای تخمین عمق آبشستگی ارائه نمودند (Scurlock et al., 2012). ملویل و لیم (۲۰۱۳) الگوی جریان در گودال آبشستگی پائین دست یک سرریزلبه تیز مستغرق را بررسی نموده و نمودارهای بی‌بعد ساختار جریان در گودال را ارائه کردند (Melville and Lim, 2013). ایلنیکلی (۲۰۱۶) به صورت آزمایشگاهی به مطالعه بیشینه عمق آبشستگی ایجاد شده در پائین دست سرریزهای دارای مانع منحنی شکل پرداختند (Elnikhely, 2016).

یوستریخ و همکاران (۲۰۱۶) به صورت آزمایشگاهی تأثیر پارامترهای عدد فرود جریان، اندازه مصالح، و عمق پایاب را بر ابعاد حفره و پشته رسوبی آبشستگی پائین دست سرریز کلیدپیانویی بررسی نمودند. ایشان دریافتند افزایش دبی و کاهش عمق پایاب، موجب افزایش قابل توجه ابعاد حفره آبشستگی می‌گردد و نیز روابطی برای تخمین ابعاد حفره ارائه نمودند (Jüstrich et al., 2016). کومار و احمد (۲۰۲۰) طی یک پژوهش آزمایشگاهی، آبشستگی در پایین دست سرریز کلیدپیانویی را بررسی نموده و با مطالعه اثر عمق پایاب به ازای دبی‌های مختلف، دریافتند جت‌های ریزشی از کلیدهای ورودی و خروجی سرریز عامل اصلی ایجاد حفره و پشته است (Kumar and Ahmad, 2020). یزدی و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی آزمایشگاهی آبشستگی پائین دست سرریز کلیدپیانویی (در دو مدل شکل تاج مستطیلی و دوزنقه‌ای در



این نوع از سرریزها پدیده‌ای است که باید به طور جامع و گسترده به آن توجه شده و مورد ارزیابی و بحث قرار گیرد. در این پژوهش میزان آبشستگی به صورت عددی و با نرم‌افزار Flow-3D در پایین‌دست سرریزهای کنگره‌ای مثلی اندازه‌گیری شده است. برای سرریز مثلی سه زاویه راس ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه در نظر گرفته شده و هدهای مختلف جریان روی سرریز بررسی شده است. با توجه به استغراق جریان بر روی سرریز در هدهای بالای عبوری، بررسی اثر بار آبی جریان از اهمیت ویژه‌ای در این سرریزها برخوردار است.

مواد و روش‌ها

- آنالیز ابعادی پارامترهای مؤثر

پدیده آبشستگی پایین‌دست سرریزها تابع چهار عامل اصلی، پارامترهای وضعیت هندسی رودخانه (W عرض کانال، S_0 شیب طولی کانال)، پارامترهای مشخصه ذرات بستر و سیال (شامل قطر متوسط ذرات، ρ و ρ_s جرم مخصوص آب و رسوب، σ_g انحراف استاندارد توزیع اندازه ذره، ν لزجت سینماتیک آب)، پارامترهای سرریز کنگره‌ای (L طول تاج سرریز، P ارتفاع سرریز، θ زاویه کنگره سرریز)، پارامترهای مشخصه جریان (V سرعت جریان، D_H عمق هیدرولیکی جریان، H_{cr} بار آبی روی سرریز، t زمان از ابتدا تا لحظه دلخواه از شبیه‌سازی، t_e زمان انتهایی شبیه‌سازی) هستند. بنابراین رابطه (۱) بیانگر پارامترهای مؤثر بر ابعاد حفره آبشستگی لحظه‌ای است:

$$\phi = f(V, D_H, P, H_{cr}, H_1, L_b, Y_1, Y_2, Y_t, \theta, d_{50}, \rho_s, \rho, \sigma_g, g, \nu, W, S_0, t, t_e)$$

در این رابطه ϕ می‌تواند هر یک از ابعاد حفره آبشستگی از قبیل بیشینه عمق لحظه‌ای، طول و حجم حفره آبشستگی لحظه‌ای باشد. با توجه به ثابت بودن شیب کانال، متغیر S_0 حذف می‌شوند. ثابت بودن سیال و مصالح بستر (غیرچسبنده، یکنواخت، کروی) نیز منجر به حذف متغیرهای d_{50} ، ρ ، ρ_s ، ν ، σ_g می‌شود پس متغیرهای باقیمانده به صورت رابطه (۲) خواهد بود که در آن به جای ϕ عبارت d_s برای نشان عمق آبشستگی استفاده شده است.

پلان) پرداختند و نشان دادند بیشینه عمق و طول حفره آبشستگی در مدل مستطیلی بیشتر از مدل دوزنقه‌ای است (Yazdi et al., 2021). باباخانی و مرسلی (۲۰۲۰) به صورت آزمایشگاهی به بررسی تأثیر پارامترهای زاویه کنگره سرریز و بار آبی روی سرریز بر ابعاد حفره آبشستگی و نیز پشته رسوبی پرداختند. ایشان نشان دادند با افزایش ۷ برابری بار آبی روی سرریز بطور متوسط عمق آبشستگی ۱۲ برابر و طول حفره ۱۰ برابر افزایش داشته و افزایش ۶ برابری زاویه کنگره نیز منجر به کاهش ۷۰ درصدی عمق آبشستگی می‌شود (Babakhani and Morsali, 2020). مرسلی و باباخانی (2021) تغییرات زمانی و محل وقوع آبشستگی در پایین‌دست سرریزهای کنگره‌ای بدون کف‌بند را مطالعه نمودند. در این دو پژوهش صرفاً به بررسی عمق آبشستگی در پایین‌دست سرریز کنگره‌ای بدون بدنه شیب‌دار پرداخته شده است (Morsali and Babakhani, 2021). در واقع پژوهش الینکی و فاسی (۲۰۲۰) تنها پژوهشی است که در آن به صورت آزمایشگاهی و به‌طور مستقیم آبشستگی در پایین‌دست سرریزهای کنگره‌ای مثلی و تنها در زاویه راس ۴۵ درجه مورد بررسی قرار گرفته است (Aly Elnikhely and Fathy, 2020).

مطالعاتی که در زمینه‌ی سرریزهای کنگره‌ای انجام یافته نشان می‌دهد عمده این تحقیقات بر روی هیدرویک جریان و بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر ضریب دبی در این نوع از سرریزها بوده است. لیکن پدیده فرسایش بستر در پایین‌دست سرریزهای کنگره‌ای موضوعی است که با وجود اهمیت زیاد، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به گذر حجم بسیار بالایی از جریان به‌خصوص در مواقع سیلابی از روی این نوع سرریزها و نیز به دلیل محدودیت در اجرای طول کف‌بند، فرسایش بستر قابل توجهی در پایین‌دست سرریزهای کنگره‌ای مشاهده می‌گردد که عدم توجه به آن در زمان طراحی موجب ناپایداری بدنه سرریزها و در نهایت تخریب آنها می‌گردد.

با توجه به عبور حجم بالای جریان از روی این سرریزها، و پیچیدگی الگوی جریان در مقادیر بالای بار آبی روی سرریز و نیز محدودیت در اجرای کف بندها، آبشستگی در پایین‌دست



$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left(u_j A_j \frac{\partial u_i}{\partial X_j} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial X_j} + G_i + f_i - k u_i \quad (5)$$

که u_i سرعت متوسط، P فشار، A_i کسر مساحت باز برای جریان در راستای i کسر حجم باز برای جریان، G_i شتاب ناشی از نیروهای وزنی، f_i شتاب ناشی از نیروهای ویسکوز، k ترم دراگ بین ذرات رسوب و ρ دانسیته سیال می‌باشد. تنش برشی بستر با استفاده از تابع دیواره برای جریان‌های آشفته سه‌بعدی محاسبه می‌گردد (Smith and Foster, 2005).

- مدل آبشستگی Flow-3D

مدل آبشستگی نرم افزار Flow-3D با استفاده از تقریب حجمی بقای جرم و معادله انتقال رسوب پخش (انتشار) - انتقال، میزان انتقال رسوب و آبشستگی بستر را برآورد می‌کند و با استفاده از روش کسر حجم سیال، ارتفاع سطح بستر در هر سلول محاسباتی را پیش‌بینی می‌نماید. مدل آبشستگی این نرم‌افزار شامل انتقال رسوبات بستر و رسوبات معلق می‌باشد. با فرض جریان دو فاز ذرات رسوب در سیال، و برقراری رابطه مومنتم در فاز پیوسته سیال، معادله (۶) و فاز ناپیوسته ذرات رسوبی معادله (۷)، و از تفاضل معادله (۶) و معادله (۷)، رابطه (۸) حاصل می‌شود:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla \bar{u} = -\frac{1}{\bar{\rho}} \nabla P + F \quad (6)$$

$$\frac{\partial u_s}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla u_s = -\frac{1}{\rho_s} \nabla P + F - \frac{K}{f_s \rho_s} u_r \quad (7)$$

$$\frac{\partial u_{drift}}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla u_{drift} = \left(\frac{1}{\bar{\rho}} - \frac{1}{\rho_s} \right) \nabla P + F - \frac{K}{f_s \rho_s} u_r \quad (8)$$

که u_s سرعت ذرات رسوب، $\bar{u} = (1-f_s)u + f_s u_s$ سرعت متوسط حجمی سیال، F نیروهای وزنی، $u_r (=u_s - u)$ سرعت نسبی ذرات رسوب و سیال، و $u_{drift} (=u_s - \bar{u})$ سرعت رانشی ذرات رسوب می‌باشد. رابطه بقای جرم برای جریان با سرعت متوسط حجمی سیال $\nabla \cdot \bar{u} = 0$ نیز باید برقرار باشد. تنش برشی سبب فرسایش و جابجا شدن رسوبات در سطح بستر می‌گردد. این فرسایش تابعی از تنش برشی بحرانی τ_{cr} و دانسیته سیال و رسوب است. پارامتر شیلدز بحرانی θ_{cr} کمینه تنش برشی جهت بلند کردن ذرات رسوب از سطح مشترک سیال و بستر فعال را نشان می‌دهد (Brethour, 2001):

$$\theta_{cr,n} = \frac{\tau_{cr,n}}{g(\rho_s - \rho)d_n} \quad (9)$$

$$d_s = f(V, D_H, P, H_{cr}, H_1, L_b, Y_1, Y_2, Y_t, \theta, g, W, t, t_e) \quad (2)$$

شکل کلی رابطه (۳) را با استفاده از تئوری π باکینگهام می‌توان به صورت زیر نوشت:

(۳)

$$\frac{d_s}{Y_t} = f\left(\frac{V}{\sqrt{g Y_1}}, \frac{V}{\sqrt{g Y_2}}, \frac{P}{Y_t}, \frac{H_{cr}}{Y_t}, \frac{H_1}{Y_t}, \frac{L_b}{Y_t}, \frac{W}{Y_t}, \frac{t}{t_e}, \theta\right)$$

مقدار عرض کانال W نیز ثابت می‌باشد. برای $t/t_e=1$ نتایج محاسباتی ابعاد نهایی حفره آبشستگی بدست می‌آید. پس رابطه نهایی به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{d_s}{Y_t} = f(Fr_1, Fr_2, \frac{P}{Y_t}, \frac{H_{cr}}{Y_t}, \frac{H_1}{Y_t}, \theta) \quad (4)$$

- نرم‌افزار Flow-3D

جهت شبیه‌سازی عددی معادلات حاکم بر جریان‌های آشفته، از بسته نرم‌افزاری Flow-3D استفاده شده است که توانایی محاسبات بالا در جریان کانال‌های باز را داراست. در این مدل، معادلات حاکم بر جریان با استفاده از تقریب‌های حجم محدود حل می‌گردند. در این نرم‌افزار از دو تکنیک عددی حجم سیال (VOF) و روش کسر مساحت-حجم مانع (FAVOR) برای شبیه‌سازی هندسی مرزها استفاده می‌شود. روش حجم سیال برای نشان دادن رفتار سیال در سطح آزاد آب (مرز آب و هوا) و روش کسر مساحت - حجم مانع برای شبیه‌سازی سطوح و مرزهای هندسی احجام صلب (مرز آب و جامد) کاربرد دارد. برای شبیه‌سازی اثرات آشفستگی، پنج مدل آشفستگی طول اختلاط پراتل، مدل تک معادله‌ای، مدل دو معادله‌ای ($k-\epsilon$)، مدل RNG و مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ در این نرم‌افزار معرفی شده است (Flow Science, Inc., 2008).

- معادلات مورد استفاده در نرم‌افزار Flow-3D

مدل هیدرودینامیک بر مبنای حل معادلات ناویراستوکس سه‌بعدی و معادله پیوستگی می‌باشد. معادلات ناویراستوکس و پیوستگی مورد استفاده در Flow-3D برای جریان‌های غیرقابل تراکم در ادامه آمده است (Flow Science, Inc., 2008):

$$\frac{\partial}{\partial X_i} (u_i A_i) = 0 \quad (4)$$

خطی (۱۸۰ درجه) در نظر گرفته شده و سرریز کنگره‌ای با پلان مثلثی بررسی شده است. نتایج نشان داد در تمام آزمایش‌ها عمق و طول آبشستگی در سرریزهای کنگره‌ای نسبت به سرریز خطی کم‌تر است و حداکثر عمق و طول آبشستگی در سرریز خطی اتفاق می‌افتد. از این‌رو در مدل عددی حاضر نیز مدل سرریز خطی به عنوان مدل مبنا برای انتخاب پارامترهای مختلف مدل عددی نظیر شرایط مرزی و مدل انتقال رسوب مورد توجه قرار گرفت.

- تعریف شرایط مرزی

در هر بلوک محاسباتی به طور جداگانه شرایط مرزی شش‌گانه تعریف می‌گردد. برای بلوک کلی کانال دیواره‌ها شرط مرزی غیر لغزشی دیواره (Wall)، برای ورودی کانال شرط مرزی فشار معین (Specified pressure) با اعمال تراز سطح آب و سرعت جریان در راستای جریان، شرط مرزی جریان خروجی برای خروجی کانال (Out flow)، و برای سطح آزاد جریان شرط مرزی تقارن (Symmetry) در نظر گرفته شده است (شکل ۲). در جدول ۱ شرایط مرزی تعریف شده در مرزهای مختلف ارائه شده است.

جدول (۱): شرط‌های مرزی تعریف شده در میدان محاسباتی.

موقعیت مرز در شبکه محاسباتی	نوع شرط مرزی
ورودی کانال	Specified pressure
دیواره‌های کانال	Wall
مرز فوقانی کانال	Symmetry
کف کانال	Wall
خروجی کانال	Out flow
وجه مشترک شبکه‌های میانی	Symmetry
ورودی شبکه‌های میانی	Symmetry
خروجی شبکه‌های میانی	Symmetry

d_n قطر ذره رسوب و اندیس n به n امین ذره رسوب اشاره دارد. مقدار پایه برای عدد شیلدز بحرانی در بسترهای صاف افقی تعریف و معمولاً برابر مقدار ثابت 0.05 در نظر گرفته شده و یا از رابطه سالبوی و وایت‌هاوس (Soulsby and Whitehouse, 1997) مقدار دقیق آن تعریف می‌گردد.

برای محاسبه فرسایش بستر، سرعت بلند شدن و کنده شدن هر ذره رسوب از سطح بستر $u_{liff,n}$ ، که از سرعت برشی بحرانی بستر بیشتر است براساس معادله وینرپ و همکاران (۱۹۹۲) حاصل می‌شود:

$$u_{liff,n} = n_b \alpha_n d_{s,n}^{0.3} (\theta - \theta_{cr,n})^{1.5} \sqrt{g d_n (S_n - 1)} \quad (10)$$

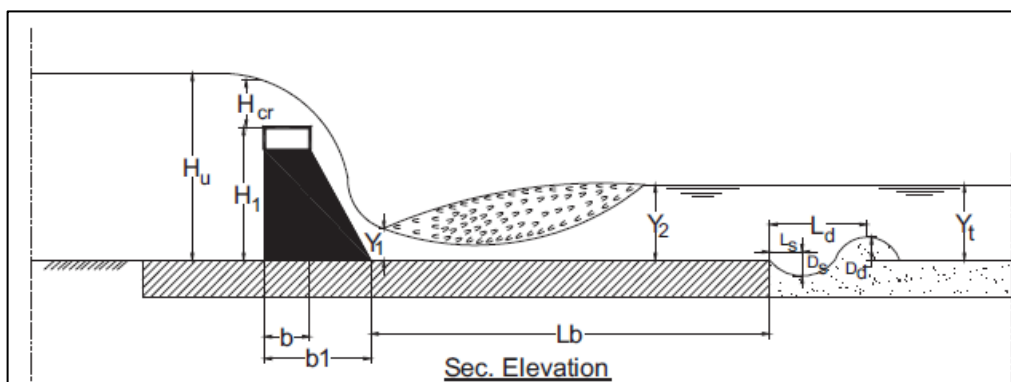
α_n ضریب بلند شدن هر ذره رسوب و n_b بردار نرمال بر سطح بستر رسوبات است. فرم بی‌بعد معادله انتقال رسوب برای ذره رسوب n به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\phi_n = \frac{q_{b,n}}{[g(S_n - 1)d_n^3]^{\frac{1}{2}}} \quad (11)$$

$q_{b,n}$ نرخ انتقال رسوب حجمی به ازای واحد عرض بستر و ϕ_n بر اساس معادلات انتقال رسوب محاسبه می‌گردد (Van Rijn, 1984).

صحت‌سنجی نتایج عددی

مشخصات هندسی سرریز مطالعه شده جهت صحت‌سنجی عددی از داده‌های آزمایشگاهی Aly-Elnikhely and Fathy (2020) اخذ شده است (شکل ۱). آزمایش‌های مربوطه در یک کانال به طول $15/70$ متر، عرض $0/3$ متر و ارتفاع $0/58$ متر انجام شده است. عرض تاج سرریز برابر $0/05$ متر، طول تاج $0/3$ متر، ارتفاع بدنه سد $0/3$ متر و به شیب $1:1$ می‌باشد. برای کف‌بند نیز از صفحه جامد به جنس گرانیت و طول $1/2$ متر استفاده شده است تا از تغییر شکل بستر تحت اثر جت جریان در ناحیه پایین‌دست جلوگیری شود. برای مدل مبنا سرریز



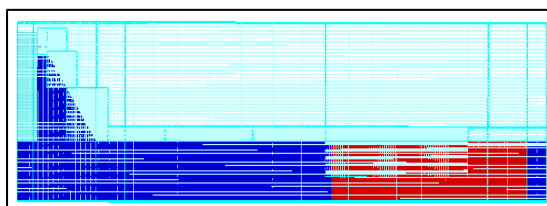
شکل (۱): مشخصات مدل آزمایشگاهی در پژوهش Aly-Elnikhely and Fathy (2020).

آزمون واقع شدند. در محدوده قسمت‌های حساس سازه به دلیل اینکه تمامی جزئیات سرریز توسط مدل عددی شناخته شوند و هیدرودینامیک مدل با دقت بیشتری شبیه‌سازی گردد، از شبکه‌بندی میانی ریزتر بهره گرفته شد. در جدول ۲ نتایج حاصله برای هر نوع شبکه‌بندی و استفاده از سلول‌های ریز در نواحی حساس سرریز در شکل ۳ نشان داده شده است. در شبکه‌بندی میدان محاسباتی مدل مینا، شبکه‌بندی درشت تعداد ۳۰۰،۰۰۰، شبکه‌بندی متوسط ۴۶۰،۰۰۰ و شبکه‌بندی ریز ۶۷۰،۰۰۰ سلول را شامل می‌شود.

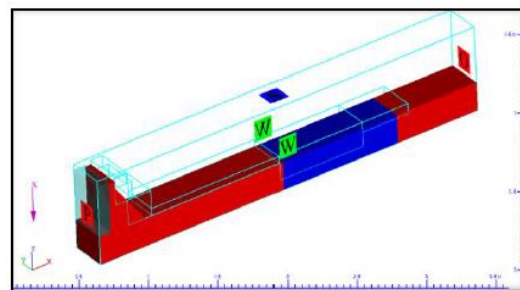
با اعمال شبکه‌بندی میانی ریز، اختلاف نتایج عددی و داده‌های آزمایشگاهی ۶/۴۵ درصد خواهد بود که در مقایسه با سایر شبکه‌بندی‌ها کمتر بوده و برای شبیه‌سازی سایر مدل‌ها اعمال شده است.

جدول (۲): شبکه‌بندی میدان محاسباتی.

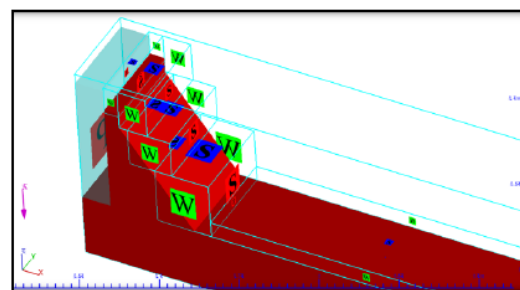
عمق آبستنگی آزمایشگاهی (m)	عمق آبستنگی مدل عددی (m)	نوع شبکه‌بندی
۰/۰۳۱	۰/۰۲۰	شبکه‌بندی کلی
۰/۰۳۱	۰/۰۲۲	شبکه‌بندی میانی (درشت)
۰/۰۳۱	۰/۰۲۵	شبکه‌بندی میانی (متوسط)
۰/۰۳۱	۰/۰۲۹	شبکه‌بندی میانی (ریز)



(الف)



(الف)



(ب)

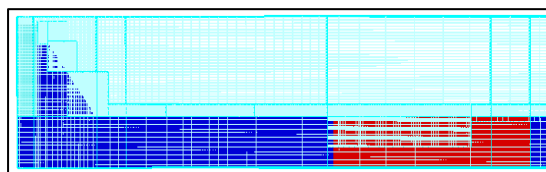
شکل (۲): شرایط مرزی تعریف شده (الف) برای شبکه‌بندی کلی (ب) برای شبکه‌های میانی مدل‌ها.

- تعریف شبکه میدان محاسباتی

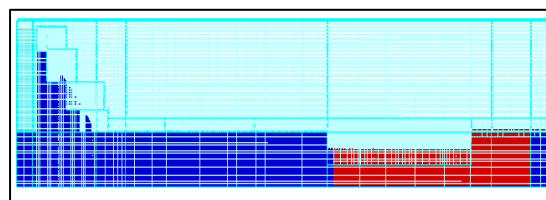
حساسیت مدل عددی به شبکه‌بندی و انفعال میدان، همواره یکی از مسائل مهم در مدل‌سازی عددی بوده است. برای مشخص کردن حدود شبکه‌بندی، بلوک‌های مستطیلی شکل در نرم افزار Flow-3D ارائه شده است که کلیه اندازه‌های سازه مورد نظر و فضای اشغال شده توسط سیالات در داخل آن‌ها تعریف می‌شود. برای مدل عددی حاضر از یک بلوک شبکه‌بندی کلی استفاده شده و تعداد سلول‌های محاسباتی مختلف مورد

جدول (۳): عمق آبشستگی به دست آمده با مدل‌های انتقال رسوب مختلف.

مدل انتقال رسوب	زمان تعادل (s)	عمق تعادلی آبشستگی مدل عددی (m)	عمق تعادلی آبشستگی مدل تجربی (m)	درصد اختلاف (%)
Meyer-Peter-Muller	۲۵۰	۰/۰۲۵	۰/۰۳۱	۱۹/۳۵۴
Vav Rijn	۲۳۰	۰/۰۲۹	۰/۰۳۱	۶/۴۵۱
Nielsen	۳۲۰	۰/۰۲۶	۰/۰۳۱	۱۶/۱۲۹

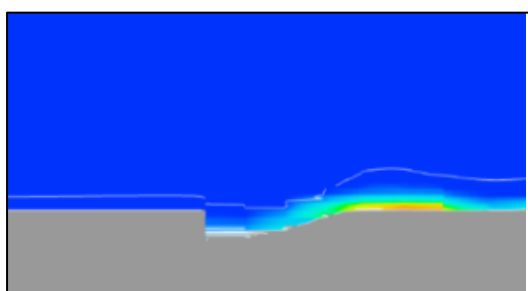


(ب)

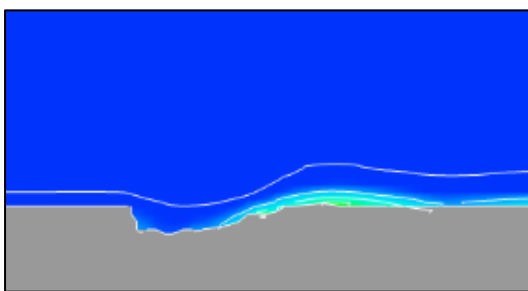


(پ)

شکل (۳): (الف) شبکه‌بندی میانی درشت (ب) شبکه‌بندی میانی متوسط (پ) شبکه‌بندی میانی ریز.



(الف)



(ب)

شکل (۴): نمایش دوبعدی آبشستگی بستر با دو مدل انتقال رسوب (الف) مدل Van Rijn (ب) Meyer-Peter-Muller.

مدل‌های آشفتگی

در بررسی اثر مدل‌های آشفتگی در نرم‌افزار FLOW-3D، سه مدل آشفتگی $k-\epsilon$ ، RNG و LES می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. به دلیل شدت بالای آشفتگی جریان در محل کنگره‌های سرریز، صرفاً به بررسی دو مدل RNG و LES بسنده شده است. نتایج نشان داد داده‌های حاصله با مدل LES بسیار دقیق‌تر از داده‌های به دست آمده با مدل RNG می‌باشد؛ زیرا مدل آشفتگی LES قادر است گردابه‌های بسیار کوچک را نیز در محل مرزهای صلب مدل نماید و از اینرو نتایج دقیق‌تری با این مدل حاصل می‌گردد (کاردان و همکاران، ۱۳۹۳). اگرچه

بررسی مدل‌های انتقال رسوب

سه مدل انتقال رسوب Meyer-Peter-Muller، Van Rijn و Nielsen مورد ارزیابی قرار گرفتند. معیار انتخاب مدل انتقال رسوب مناسب، زمان رسیدن به شرایط تعادل و حداقل اختلاف میان نتایج عددی و داده آزمایشگاهی مدنظر قرار گرفت (جدول ۳). مدل Van Rijn کمترین زمان رسیدن به شرایط تعادل آبشستگی و نیز دقت بالا و درصد خطای کمتری، نسبت به دو مدل Meyer-Peter-Muller و Nielsen دارد. زمان رسیدن به شرایط تعادلی آبشستگی در دو مدل دیگر نسبتاً بالا می‌باشد که در مدل‌سازی‌های عددی بسیار مهم بوده و طولانی شدن آن موجب افزایش هزینه‌های شبیه‌سازی عددی می‌گردد.

بر حسب زمان تعادل و میزان دقت شبیه‌سازی، مدل Vav Rijn به عنوان مدل انتقال رسوب برای شبیه‌سازی آبشستگی پایین‌دست سرریزهای کنگره‌ای انتخاب گردید. شکل ۴ آبشستگی بستر با دو مدل Meyer-Peter-Muller و Van Rijn را نمایش می‌دهد.

همکاران (۱۹۹۵) گسترش زمانی آبشستگی را وابسته به شرایط جریان، هندسه و پارامترهای رسوب دانستند. ملویل و چيو (۱۹۹۹) و شپرد و ميلر (۲۰۰۶) بيان نمودند هرگاه تغييرات عمق آبشستگی موضعی در دوره‌ای ۲۴ ساعته کمتر از ۵ درصد عرض سازه هیدرولیکی باشد، تعادل در آبشستگی حاصل می‌شود. اتما (۱۹۸۰) و کومار و همکاران (۱۹۹۹) نیز تعاریف متفاوتی برای شرایط تعادل ارائه نمودند (Melville and Chiew, 1999; Dey et al., 1995; Sheppard and Miller, 2006; Ettema, 1980; Kumar et al., 1999).

نتایج و بحث

- مدل مینا

مدل (P1-Line) به‌عنوان مدل مینا تعریف شده است که با توجه به نتایج صحت‌سنجی تطابق خوبی با مدل آزمایشگاهی دارد. در این مدل بیشینه عمق آبشستگی بلافاصله بعد از ناحیه صلب اتفاق افتاده است. با توجه به اینکه در ناحیه پایین دست پدیده‌هایی چون پرش هیدرولیکی، استغراق و... اتفاق نیفتاده است، برگشت جریان به سمت بالادست نیز مشاهده نشده و رسوبات ناشی از آبشستگی توسط جریان به پایین دست منتقل شده و انباشته شده‌اند. بیشینه عمق آبشستگی برای مدل مینا ۲۹ میلی‌متر اندازه گرفته شده است (شکل ۶) که در مدل آزمایشگاهی این مقدار برابر ۳۱ میلی‌متر است.

بدیهی است اندازه‌ی سلول‌ها در شبکه‌بندی میدان محاسباتی بر روی نتایج حاصله با مدل LES بسیار تأثیر گذار است. در جدول ۴ مقایسه نتایج با دو مدل آشفتگی ارائه شده است.

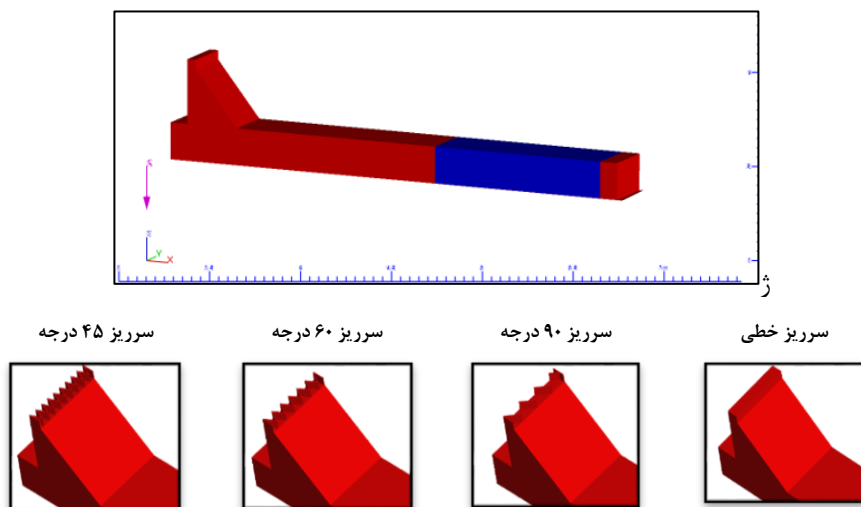
جدول (۴): مقایسه مدل‌های آشفتگی.

مدل آشفتگی	عمق آبشستگی عددی (m)	عمق آبشستگی تجربی (m)
LES	۰/۰۲۸	۰/۰۳۱
RNG	۰/۰۲۳	۰/۰۳۱

- تعریف مدل‌های عددی

برای ایجاد میدان محاسباتی، یک کانال به طول ۲/۷ متر، عرض ۰/۳ متر و ضخامت بستر ۰/۲ متر تعریف گردید. در تمامی مدل‌ها قطر متوسط رسوبات برابر ۰/۷۵ میلی‌متر و چگالی آن‌ها ۲۶۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شد. شکل سه‌بعدی مدل‌ها در شکل ۵ نمایش داده شده و مشخصات آنها در جدول ۵ آورده شده است. این ابعاد برگرفته شده از ابعاد مدل صحت‌سنجی می‌باشد.

با توجه به اینکه پدیده آبشستگی به عوامل هندسی و هیدرولیکی متعددی بستگی دارد، بعد از انجام شبیه‌سازی‌های متعدد، رسیدن مدل‌ها به همگرایی مناسب مدنظر قرار گرفت به طوری که بعد از آن زمان، تغییرات قابل توجهی در ابعاد حفره آبشستگی اتفاق نیفتد؛ این زمان به‌عنوان زمان تعادل شبیه‌سازی تعیین گردید. ملویل و چيو (۱۹۹۹) و دی و

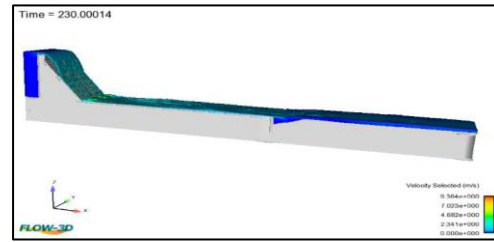
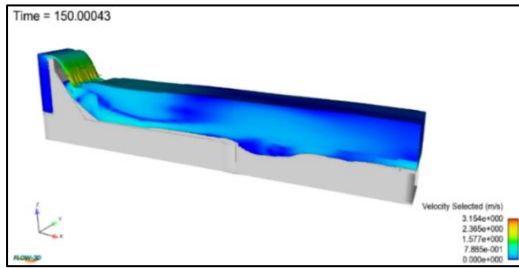


شکل (۵): مدل‌های سه‌بعدی سد و سرریزهای کناره‌ای مورد بررسی.

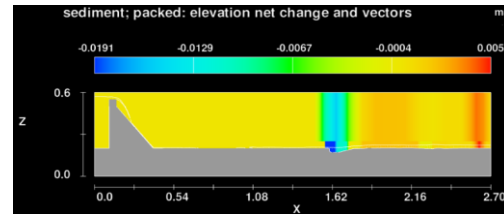
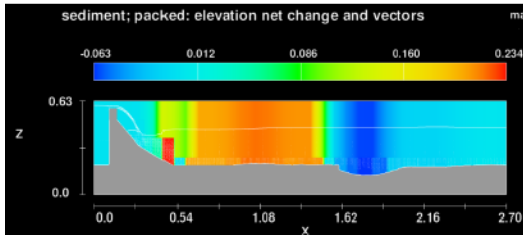


جدول (۵): مشخصات مدل سرریزهای کنگره‌ای.

قطر متوسط رسوبات (mm) d ₅₀	زاویه رأس سرریز (درجه)	ارتفاع سرریز (cm)	ارتفاع سد (cm)	دبی جریان (lit/s)	نام مدل	
۰/۷۵	۱۸۰	۵	۳۰	۵	P1-Line	مدل
۰/۷۵	۱۸۰	۸	۳۰	۵	P2-Line	سرریزهای
۰/۷۵	۱۸۰	۱۲	۳۰	۵	P3-Line	خطی
۰/۷۵	۱۸۰	۵	۲۵	۵	R1-Line	
۰/۷۵	۱۸۰	۵	۳۵	۵	R2-Line	
۰/۷۵	۱۸۰	۵	۴۵	۵	R3-Line	
۰/۷۵	۱۸۰	۵	۳۰	۹	P4-Line	
۰/۷۵	۴۵	۵	۳۰	۵	P1-45	مدل
۰/۷۵	۴۵	۸	۳۰	۵	P2-45	سرریزهای
۰/۷۵	۴۵	۱۲	۳۰	۵	P3-45	۴۵ درجه
۰/۷۵	۴۵	۵	۲۵	۵	R1-45	
۰/۷۵	۴۵	۵	۳۵	۵	R2-45	
۰/۷۵	۴۵	۵	۴۵	۵	R3-45	
۰/۷۵	۴۵	۵	۳۰	۹	P4-45	
۰/۷۵	۴۵	۸	۳۰	۹	P5-45	
۰/۷۵	۴۵	۱۲	۳۰	۹	P6-45	
۰/۷۵	۶۰	۵	۳۰	۵	P1-60	مدل
۰/۷۵	۶۰	۸	۳۰	۵	P2-60	سرریزهای
۰/۷۵	۶۰	۱۲	۳۰	۵	P3-60	۶۰ درجه
۰/۷۵	۶۰	۵	۲۵	۵	R1-60	
۰/۷۵	۶۰	۵	۳۵	۵	R2-60	
۰/۷۵	۶۰	۵	۴۵	۵	R3-60	
۰/۷۵	۶۰	۵	۳۰	۹	P4-60	
۰/۷۵	۶۰	۸	۳۰	۹	P5-60	
۰/۷۵	۶۰	۱۲	۳۰	۹	P6-60	
۰/۷۵	۹۰	۵	۳۰	۵	P1-90	مدل
۰/۷۵	۹۰	۸	۳۰	۵	P2-90	سرریزهای
۰/۷۵	۹۰	۱۲	۳۰	۵	P3-90	۹۰ درجه
۰/۷۵	۹۰	۵	۲۵	۵	R1-90	
۰/۷۵	۹۰	۵	۳۵	۵	R2-90	
۰/۷۵	۹۰	۵	۴۵	۵	R3-90	
۰/۷۵	۹۰	۵	۳۰	۹	P4-90	
۰/۷۵	۹۰	۸	۳۰	۹	P5-90	
۰/۷۵	۹۰	۱۲	۳۰	۹	P6-90	



(الف)



(ب)

شکل (۷): نمای سه بعدی و دوبعدی آبستنگی مدل P2-Line.

شکل (۶): (الف) نمای سه بعدی آبستنگی مدل مبنا P1-Line (ب) نمای دوبعدی فرسایش بستر.

در مدل P2-Line استغراق ناشی از پرش هیدرولیکی اتفاق افتاده است که موجب برگشت جریان به سمت بالادست شده و رسوبات را به پای سد و ناحیه صلب قبل از رسوبات جابجا نموده است. پرش هیدرولیکی رخ داده در این مدل از نوع D است که محاسبات آن در ادامه آورده می شود:

$$Q = AV \rightarrow Q = b \times h \times v$$

$$\rightarrow 0.05 = 0.3 \times h \times 0.85$$

$$\rightarrow h = 0.019607 \text{ (m)}$$

$$Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g d_1}}$$

$$\rightarrow Fr_1 = \frac{0.85}{\sqrt{9.81 \times 0.019607}}$$

$$\rightarrow Fr_1 = 6.132$$

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8 \times Fr_1^2} - 1 \right)$$

$$\rightarrow \frac{y_2}{0.019607} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8 \times 6.132^2} - 1 \right) \rightarrow y_2 = 0.16 \text{ (m)}$$

$$y_t = 0.2602 \text{ (m)}$$

$$0.2602 > 0.16 \rightarrow y_t > y_2$$

- مدل های خطی

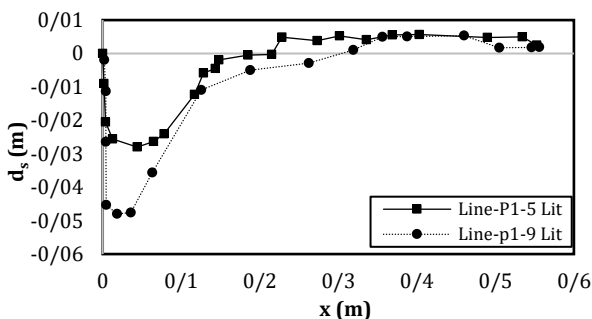
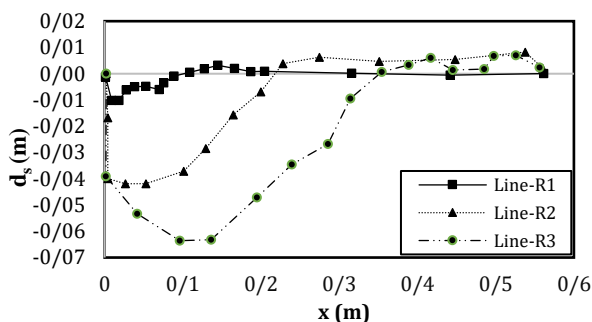
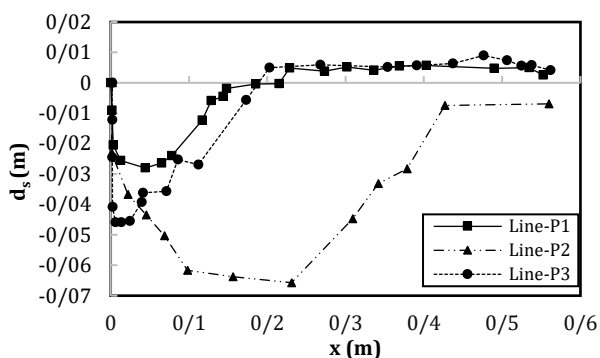
نتایج تمام مدل های خطی در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول (۶): نتایج آبستنگی مدل های خطی.

نام مدل	ds/Yt	Yt (mm)	Ls (mm)	ds (mm)	te (s)
P1-Line	۰/۲۶	۱۱۲	۲۱	۲۹	۲۳۰
P2-Line	۰/۹۵	۷۱	۱۹	۶۸	۱۵۰
P3-Line	۰/۵۰	۹۴	۶۲	۴۷	۱۱۵
R1-Line	۰/۱۰	۱۲۱	۱۰	۱۲	۲۰۰
R1-Line	۰/۴۱	۱۰۲	۲۱	۴۲	۱۹۰
R1-Line	۰/۸۳	۷۶	۳۵	۶۳	۱۴۰
P4-Line	۰/۵۷	۸۴	۳۳	۴۸	۱۴۰

نمای سه بعدی و دوبعدی آبستنگی بستر مدل P2-Line به عنوان نمونه در شکل ۷ نمایش داده شده است.

که $ds(\theta)$ بیانگر عمق آبستگي مدل‌های کنگره‌ای و $ds(line)$ برای نشان دادن عمق آبستگي مدل خطی است. Rd نیز درصد تغییرات را نمایش می‌دهد.



شکل (۸): ابعاد حفره آبستگي مدل‌های خطی.

در نتیجه پرش از نوع D می‌باشد (ابریشمی و حسینی، ۱۳۷۹).

در شکل ۷ رخداد پرش نوع D کاملاً مشخص است. در مدل P3-Line نیز مشابه مدل P2-Line وقوع پرش هیدرولیکی و برگشت جریان به سمت بالادست مشاهده گردید. در این حالت سرعت برگشت جریان و حجم آب برگشتی به بالادست بیش از مدل P2-Line بوده و در نتیجه انباشت رسوب بیشتری در حفره آبستگي مشاهده می‌گردد. به دلیل وقوع پرش هیدرولیکی و برگشت جریان، نوسان در ابعاد حفره آبستگي رخ می‌دهد که عدد گزارش شده، بیشینه عمق آبستگي رخ داده در طی زمان شبیه‌سازی است.

افزایش ارتفاع بدنه سد سبب افزایش عمق آبستگي می‌شود، روند آبستگي با افزایش ارتفاع بدنه سد روند صعودی داشته و بیشینه عمق آبستگي در مدل سد با ارتفاع بالا رخ می‌دهد. در حالت افزایش ارتفاع سد، در مقایسه با حالت افزایش ارتفاع سرریز، پرش هیدرولیکی رخ نداده و عمق آبستگي مستقیماً با افزایش ارتفاع سد افزایش می‌یابد. در مدل‌های با افزایش ارتفاع سرریز، وقوع پرش هیدرولیکی و برگشت جریان به بالادست کاهش بیشینه عمق آبستگي در طی زمان شبیه‌سازی را به دنبال دارد، لیکن در انتهای زمان شبیه‌سازی و در شرایط تعادل افزایش عمق آبستگي با افزایش ارتفاع سرریز ثبت شده است.

در مدل P4-Line، افزایش دبی موجب افزایش عمق آبستگي شده است. این افزایش در حدود ۲ برابر است، به عبارتی با افزایش دبی جریان در حدود ۲ برابر، عمق آبستگي نیز تقریباً ۲ برابر می‌گردد. در شکل ۸ مقایسه عمق حفره آبستگي برای تمام مدل‌های خطی ارائه داده شده است.

- مدل‌های با زاویه راس ۴۵ درجه

بیشینه عمق آبستگي برای مدل‌های سرریز کنگره‌ای با زاویه راس ۴۵ درجه در جدول ۷ ارائه شده است.

- کارایی مدل‌های کنگره‌ای نسبت به مدل خطی

به منظور بررسی میزان تأثیر کنگره‌های سرریز و زاویه راس آن‌ها، عمق آبستگي مدل‌های کنگره‌ای نسبت به مدل خطی سنجیده شده است تا مشخص گردد هر مدل تا چه اندازه‌ای بر کاهش عمق آبستگي مؤثر بوده است. رابطه (۱۰) مقدار کمی این تأثیر را نشان می‌دهد:

$$Rd = \frac{ds(\theta) - ds(line)}{ds(line)} \times 100 \quad (12)$$



در مدل‌های گروه دوم نیز کاهش عمق آبشستگی مشاهده گردید، لیکن افزایش کم ارتفاع سد تاثیر قابل توجهی بر تغییرات عمق آبشستگی نداشت ولی با افزایش بیشتر ارتفاع سد، عمق آبشستگی نیز به میزان قابل توجه ۸۵ درصد کاهش یافت. این نتیجه معلوم می‌کند گرچه افزایش ارتفاع بدنه سد موجب افزایش سرعت جریان در پایین دست شده و احتمال می‌رود فرسایش بستر با شدت بیشتری رخ دهد، لیکن وقوع پرش هیدرولیکی شدید به دلیل سرعت بالای جریان در پای سد، موجب برگشت جریان شده و پر شده حفره آبشستگی را موجب می‌گردد.

در زاویه ۴۵ درجه تعداد سیکل‌های موجود در عرض ثابت، زیاد می‌باشد پس فضای کمتری جهت عبور سیال مابین کنگره‌ها وجود دارد که سبب تداخل بیشتر تیغه‌های جریان با یکدیگر شده و عبور جریان از روی سرریز را دشوار می‌کند و باعث می‌شود میزان جریان عبوری از روی سرریز کاهش یابد به صورتی که بیشتر شدن ارتفاع جریان از یک مقدار معین، سبب کاهش شدید راندمان شده تا حدی که عملکرد سد و سرریز را مختل نموده و عملاً وجود سرریز کنگره‌ای را بی‌معنی می‌کند. در این حالت به دلیل عدم اثر کنگره‌های سرریز، روند افزایشی آبشستگی بستر با افزایش ارتفاع جریان ادامه می‌یابد. لذا می‌توان پیشنهاد نمود، در صورتی که دو گزینه افزایش ارتفاع سرریز کنگره‌ای، و ارتفاع بدنه سد مورد توجه باشد، افزایش ارتفاع سد به لحاظ اینکه فرسایش بستر کمتری در پایین دست ایجاد می‌کند می‌تواند گزینه مناسب‌تری باشد.

- مدل سرریزهای کنگره‌ای با زاویه راس ۶۰ درجه

در شکل ۹، مقایسه حفره آبشستگی مدل‌های با زاویه راس ۶۰ درجه ارائه شده است. با توجه به افزایش زاویه راس کنگره‌های سرریز، میزان تداخل تیغه‌های جریان در ۶۰ درجه نسبت به ۴۵ درجه کمتر می‌باشد که این کاهش تداخل سبب کاهش استغراق موضعی در سرریز کنگره‌ای شده همچنین سبب افزایش گذردهی آب و افزایش راندمان هیدرولیکی سد می‌شود. از سویی دیگر در مقایسه نتایج دو مدل سرریز کنگره‌ای با زاویه ۴۵ و ۶۰ درجه می‌توان نتیجه گرفت، در بار آبی ثابت، میزان دبی عبوری از روی سرریز ۶۰ درجه بیش از سرریز

جدول (۷): آبشستگی مدل‌های با زاویه راس ۴۵ درجه.

نام مدل	ds (mm)	Ls (mm)	Y _t (mm)	ds/Y _t	t _e (s)	Rd (%)
P1-45	۲۲	۱۹	۵۶	۰/۳۹	۱۰۰	-۲۴
P2-45	۱۴	۱۲	۷۹	۰/۱۸	۱۰۰	-۸۰
P3-45	۱۱	۹	۹۴	۰/۱۲	۱۲۵	-۷۶
R1-45	۱۲	۱۰	۸۸	۰/۱۴	۶۸	۰
R2-45	۱۱	۹	۹۲	۰/۱۲	۸۰	-۷۴
R3-45	۹	۷	۹۹	۰/۱۰	۱۲۰	-۸۵
P4-45	۱۵	۱۵	۸۳	۰/۱۸	۹۵	-۶۹

با افزایش ارتفاع در سرریز کنگره‌ای همانند سرریز خطی، سرعت سیال عبوری افزایش می‌یابد، از طرفی با توجه به کنگره‌ای بودن پلان سرریز، هنگام عبور جریان از روی سرریز به دلیل وجود سرعت اولیه در سیال، تیغه‌های جریان باهم برخورد می‌کنند، این برخورد مانع از عبور راحت جریان از روی سرریز می‌شود که منجر به کاهش راندمان هیدرولیکی سد می‌شود تا حدی که می‌تواند عملکرد سرریز را مختل نموده و عملاً کارایی سرریز را از بین ببرد. همچنین این تداخل سبب کاهش انرژی سیال در حال عبور از سرریز شده که موجب می‌گردد در سرریزهای کنگره‌ای با پلان مثلثی نسبت به سرریزهای خطی آبشستگی کمتری رخ دهد.

در تمامی مدل‌های گروه اول سرریز کنگره‌ای ۴۵ درجه، عمق آبشستگی در حدود ۲۴ الی ۸۰ درجه نسبت به مدل خطی کاهش داشته است. عمق آب در پایاب نشان می‌دهد که در این مدل‌ها برگشت جریان زیادی به سمت بالادست رخ داده و موجب شده است که عمق آبشستگی به میزان قابل توجهی کاهش یابد.

در مدل R2-45 تاثیر افزایش ارتفاع بدنه سد مورد بررسی قرار گرفته است. میزان گذردهی جریان در این مدل‌ها مشابه مدل‌های پیشین (مدل‌های P-45) است هرچند در این مدل‌ها نیز تداخل تیغه‌ها اتفاق افتاده و منجر به کاهش گذردهی جریان از روی تیغه‌ها شده است. در این مدل‌ها نیز، مشابه حالت خطی، افزایش ارتفاع بدنه موجب افزایش عمق آبشستگی می‌گردد و نیز پرش هیدرولیکی رخ نداده و برگشت جریان به سمت بالادست مشاهده نمی‌گردد.

جدول (۸): نتایج آبخستگی مدل‌های با زاویه راس ۶۰ درجه.

نام مدل	ds (mm)	Ls (mm)	Yt (mm)	ds/Yt	te (s)	Rd (%)
P1-60	۲۰	۵۶	۵۵	۰/۳۶	۱۱۵	-۳۱
P2-60	۹	۱۳	۹۷	۰/۰۹	۶۵	-۸۷
P3-60	۵	۶/۲	۱۱۸	۰/۰۴	۱۰۰	-۸۹
R1-60	۴	۴۰	۱۳۱	۰/۰۳	۶۸	-۶۶
R2-60	۷	۴/۵	۹۷	۰/۰۷	۸۰	-۸۳
R3-60	۶	۳/۲	۱۰۴	۰/۰۵	۱۲۰	-۹۰
P4-60	۱۷	۴۸	۷۹	۰/۲۱	۹۵	-۶۴

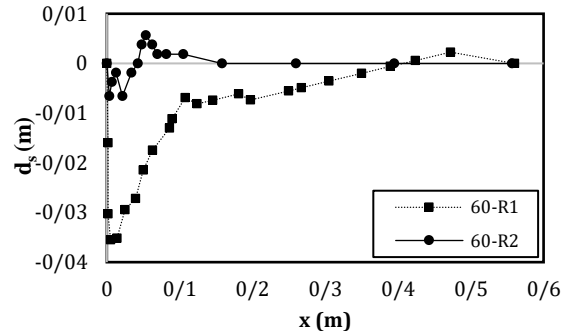
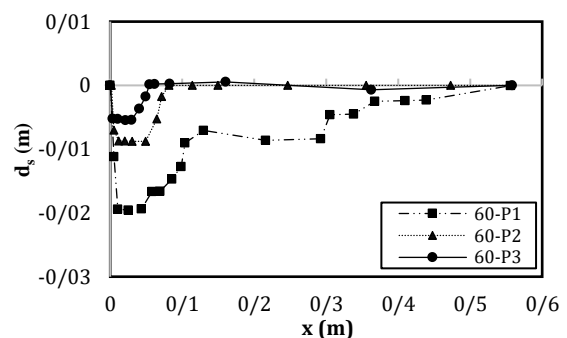
مدل سرریزهای کنگره‌ای با زاویه راس ۹۰ درجه

نتایج مربوط به مدل‌های سرریز با زاویه راس ۹۰ درجه در جدول ۹ و شکل ۱۰ جمع‌بندی شده است. مطابق جدول، با افزایش ارتفاع سرریز، به دلیل تداخل لایه‌های جریان عبوری از روی تیغه‌ها بر روی سرریز و تشکیل موج برگشتی ناشی از پرش هیدرولیکی در پایین‌دست، آبخستگی کاهش می‌یابد. همین نتیجه در حالت افزایش بار آبی روی سرریز نیز صادق می‌باشد.

جدول (۹): نتایج آبخستگی مدل‌های با زاویه راس ۹۰ درجه.

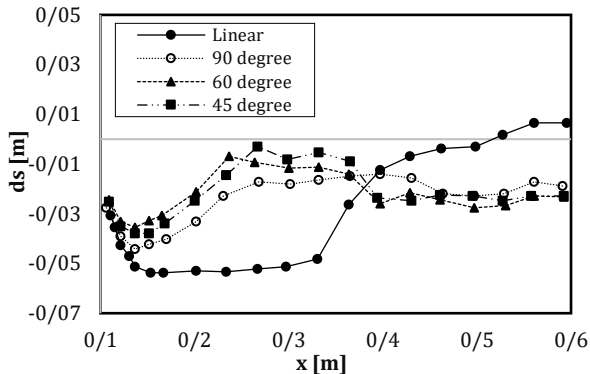
نام مدل	ds (mm)	Ls (mm)	Yt (mm)	ds/Yt	te (s)	Rd (%)
P1-90	۲۶	۷۸	۷۲	۰/۳۶	۲۰	-۱۰
P2-90	۱۸	۵۱	۸۱	۰/۲۲	۱۰	-۷۳
P3-90	۱۳/۵	۴۰	۸۴	۰/۱۶	۱۰	-۷۱
R1-90	۱۵	۴۵	۸۰	۰/۱۹	۱۲	+۲۵
R2-90	۱۴	۴۳	۸۲	۰/۱۷	۱۰	-۶۶
R3-90	۱۱/۵	۳۸	۹۷	۰/۱۲	۹۰	-۸۲

۴۵ درجه می‌باشد این امر موجب افزایش بیشتر سرعت جریان در پای سرریز شده و به طبع آن پرش هیدرولیکی در پایین دست رخ می‌دهد. وقوع پرش هیدرولیکی نوع D در پایین دست باعث برگشت جریان به بالادست شده و در نتیجه از عمق حفره آبخستگی به مرور زمان کاسته می‌گردد. از اینرو میزان آبخستگی در مدل P3-60 کمتر از مدل P1-60 می‌باشد. در جدول ۸ نتایج حاصله ارائه شده است. در تمامی مدل‌های سرریز کنگره‌ای ۶۰ درجه، کاهش قابل توجه عمق آبخستگی نسبت به مدل سرریز خطی مشاهده می‌گردد که از مقدار ۳۱ تا حدود ۹۰ درصد متغیر است. همان‌طور که ذکر شد این امر به دلیل وقوع پرش هیدرولیکی در پایین‌دست سد علیرغم افزایش سرعت جریان است، و آنچه که بدیهی است افزایش ارتفاع جریان در پشت سد، چه به دلیل افزایش ارتفاع سرریز، و چه به دلیل افزایش ارتفاع بدنه سد، موجب کاهش فرسایش بستر پایین‌دست می‌گردد.



شکل (۹): حفره آبخستگی در مدل‌های سرریز کنگره‌ای با زاویه راس ۶۰ درجه.

بدست آمده برای تمام زوایا به ازای دبی ۵ لیتر بر ثانیه به صورت مقایسه‌ای ترسیم شده است.



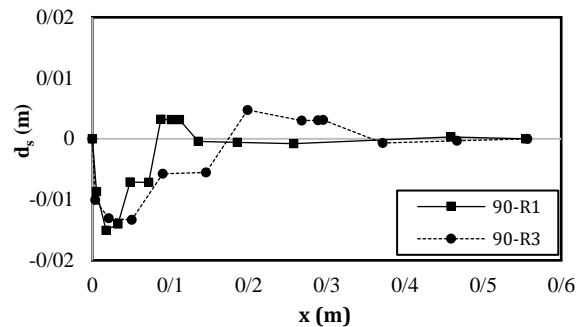
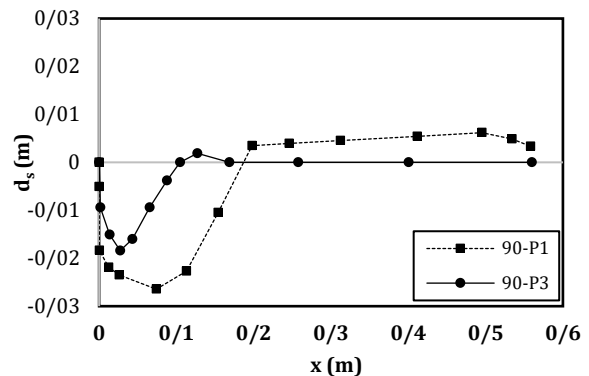
شکل (۱۱): منحنی حفره آبستنگی در خط مرکزی بستر برای مدل‌های سرریز (دبی ۵ لیتر بر ثانیه).

تغییرات بستر نشان داد حفره آبستنگی در سرریز خطی دارای تقارن نبوده و این حفره بر حسب دبی و ارتفاع جریان‌های مختلف به صورت نامتقارن نسبت به خط مرکز کانال تشکیل می‌گردد. در سرریزهای کنگره‌ای برای تمام زوایا، تقارن در حفره و در پشته آبستنگی مشاهده گردید که بیشینه عمق آبستنگی در لبه بستر صلب بوده و پشته رسوبات در یک سوم انتهایی بستر رسوبی تشکیل می‌گردد.

مشخصات کلی جریان و حفره آبستنگی برای دبی جریان ۵ لیتر بر ثانیه در جدول ۱۰ ارائه شده است.

- مقایسه نتیجه پژوهش حاضر با نتایج سایر پژوهشگران

با وجود پژوهش‌های بسیار زیادی که در زمینه آبستنگی پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی انجام یافته و نتایج آنها در مقالات مختلف ارائه شده‌اند، واضح است که در هیچ پژوهشی بر بررسی آبستنگی پایین‌دست سرریزهای کنگره‌ای تمرکز نشده است. لذا برای بررسی بیشتر صحت نتایج شبیه‌سازی‌های عددی، با توجه به عدم وجود فرمول برای محاسبه عمق آبستنگی در این نوع سرریزها، از سایر فرمول‌های موجود برای محاسبه عمق آبستنگی در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی



شکل (۱۰): حفره آبستنگی مدل سرریزهای کنگره‌ای با زاویه رأس ۹۰ درجه.

نتایج مدل‌سازی‌های عددی نشان داد سرریز کنگره‌ای با زاویه راس ۶۰ درجه کمترین عمق آبستنگی را نسبت به سایر مدل‌ها دارد. میزان کاهش طول حفره آبستنگی و ابعاد پشته رسوبات تجمع یافته در پایین‌دست نیز در این مدل بیش از سایر مدل‌ها می‌باشد. به عبارتی در حدود ۴۵، ۷۷، ۸۹ و ۴۹ درصد کاهش به ترتیب در عمق آبستنگی، طول حفره آبستنگی، عمق رسوبات تجمع یافته و طول پشته رسوب برای مدل سرریز ۶۰ درجه نسبت به مدل خطی مشاهده گردید. در سرریز کنگره‌ای، به ازای دبی ثابت، بار آبی روی سرریز به دلیل افزایش طول عبوری سرریز کاهش می‌یابد؛ از اینرو، پتانسیل تخریبی جریان در پایین‌دست سرریز کنگره‌ای نسبت به سرریز خطی کمتر است. از سویی دیگر استهلاک انرژی نیز در این نوع سرریزها بیشتر است که بیشترین میزان استهلاک ناشی از پرش هیدرولیکی در سرریز با زاویه ۶۰ درجه مشاهده گردید. از اینرو سرریز کنگره‌ای با زاویه راس ۶۰ درجه به عنوان بهترین حالت برای کنترل آبستنگی در پایین‌دست سرریزهای کنگره‌ای معرفی می‌گردد.

همچنین تأثیر زاویه راس ۹۰ درجه بر پارامترهای آبستنگی بسیار کمتر از سایر زوایا است. در شکل ۱۱ حفره آبستنگی

$$\frac{y_s}{y_0} = 1.5 \quad 1 < \frac{v}{v_c} \leq 2 \quad (19)$$

که y_s عمق آبشستگی، y_0 عمق جریان در پایاب، C_s ضریب ثابت که برابر $4/75$ در نظر گرفته می‌شود، q دبی در واحد عرض، H اختلاف تراز بین مخزن و تراز آب در پایاب، y_{max} ماکزیمم عمق آبشستگی، h_0 بار آبی جریان، عمق تعادلی آبشستگی، Z ارتفاع ریزش جریان، b عرض سرریز، B عرض کانال، v سرعت جریان نزدیک شونده، و v_c سرعت بحرانی جریان برای ذرات در آستانه حرکت می‌باشد. در شکل ۱۳ مقایسه بین عمق آبشستگی به دست آمده با شبیه‌سازی عددی در پژوهش حاضر برای سرریز خطی ($\theta = 180^\circ$)، و عمق آبشستگی به دست آمده با فرمول‌های ذکر شده در قسمت بالا ارائه شده است.

شکل ۱۳ نشان می‌دهد با سه فرمول پیشنهادی نواک، ملویل، دی‌آگیستینو و فرری نتایج نزدیک‌تری به نتایج شبیه‌سازی عددی پژوهش حاضر حاصل می‌شود. در حالی که فرمول پیشنهادی درگاهی (۲۰۰۳) عمق آبشستگی بسیار بزرگتری را نتیجه می‌دهد. با استفاده از فرمول اسکاتیش (۱۹۳۲) عمق آبشستگی بسیار کمتر به دست آمده است که این مساله به دلیل غیریکنواختی دانه‌های بستر در پژوهش‌های ایشان می‌باشد.

بهره گرفته شده است. همچنین نتایج تجربی الینکی و فاسی (۲۰۲۰) آورده شده است.

اسکاتیش (۱۹۲۳) رابطه زیر را برای محاسبه عمق آبشستگی در پایین دست جت‌های جریان پیشنهاد نمود:

$$y_s + y_0 = \frac{C_s q^{0.57} H^{0.2}}{d_{90}^{0.32}} \quad (13)$$

این رابطه برای دبی‌های در عرض واحد (q) برابر $0.7/0.9$ مترمربع بر ثانیه دارای اعتبار است.

به همین ترتیب نواک (۱۹۶۱) رابطه مشابه دیگری ارائه نمود:

$$y_s = 0.55 \left(6H^{0.25} q^{0.5} \left(\frac{y_0}{d_{90}} \right)^{1/3} - y_0 \right) \quad (14)$$

رابطه درگاهی (۲۰۰۳) به این صورت ارائه شده است:

$$\frac{y_{max}}{h_0} = 1.7 \left(\frac{h_0}{d_{90}} \right)^{1/45} \quad (15)$$

$$\frac{X_{max}}{h_0} = 0.5 \left(\frac{h_0}{d_{90}} \right)^3 \quad (16)$$

دی‌آگیستینو و فرری (۲۰۰۴) رابطه زیر را ارائه نمودند:

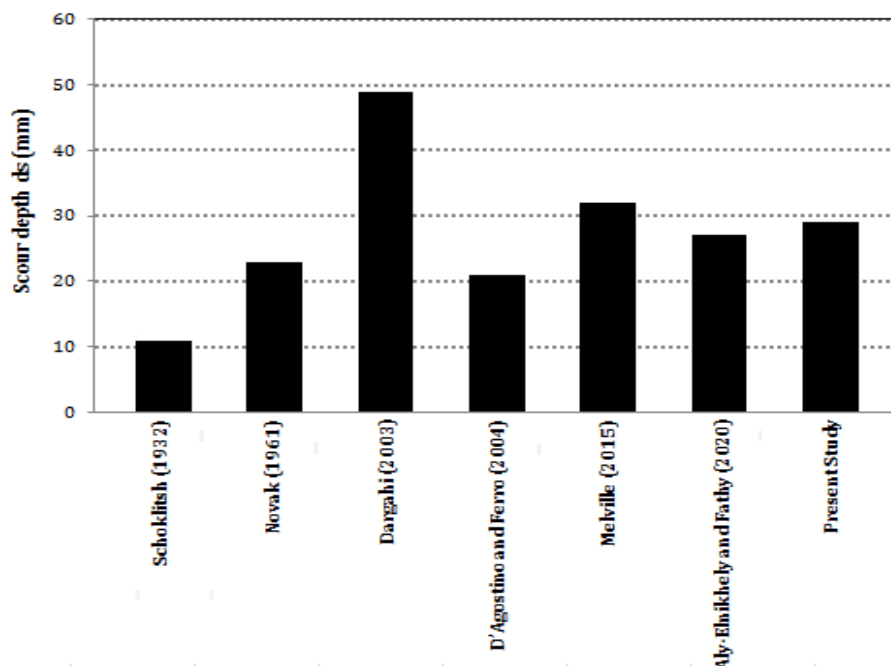
$$\frac{y_{SE}}{Z} = 2.00 \left(\frac{H_s}{Z} \right)^{0.59} \left(\frac{b}{B} \right)^{2.34} \left(\frac{\Delta d_{90}}{Z} \right)^{-0.09} \quad (17)$$

رابطه ملویل که در سال ۲۰۱۵ نیز ارائه شد به این صورت است:

$$\frac{y_s}{y_0} = 2.5 \left(\frac{v}{v_c} - 0.4 \right) \quad (18)$$

جدول (۱۰): مشخصات کلی جریان و حفره آبشستگی مدل‌ها به ازای دبی جریان ۵ لیتر بر ثانیه.

L _D (mm)	d _D (mm)	L _S (mm)	d _S (mm)	Fr ₂	Y _t (mm)	Y ₂ (mm)	Fr ₁	V ₁ (m/s)	Y ₁ (mm)	مدل
۲۷/۵۰	۱۵/۰۰	۲۱/۰۰	۲۸/۰۰	۰/۴۲	۵۱/۰۰	۵۱/۰۰	۲/۶۸	۱/۰۵	۱۶/۵۰	خطی
۲۳/۰۰	۱۳/۵۰	۷۸/۵۰	۲۶/۱۰	۰/۴۵	۵۴/۰۰	۵۴/۰۰	۲/۵۱	۰/۹۴	۱۴/۴۰	P1-90
۲۰/۵۰	۱۱/۰۰	۵۶/۰۰	۱۹/۶۰	۰/۳۴	۶۲/۲۰	۶۲/۲۰	۳/۸۳	۱/۲۷	۱۱/۲۰	P1-60
۲۵/۰۰	۱۳/۰۰	۱۹/۵۰	۲۱/۲۰	۰/۳۰	۸۷/۰۰	۸۷/۰۰	۴/۵۳	۱/۶۵	۱۳/۵۰	P1-45



شکل ۱۳- مقایسه عمق آبشستگی به دست آمده با شبیه‌سازی عددی و مقادیر به دست آمده با فرمول‌های مختلف برای سرریز خطی ($\theta = 180^\circ$).

نتیجه‌گیری

۳- سرریز کنگره‌ای با پلان مثلثی شکل با زاویه 60° درجه با توجه به عدم برخورد مستقیم لایه‌های عبوری از روی سرریز و حداکثری طول مؤثر تاج نسبت به سایر زوایا، به لحاظ عملکرد هیدرولیکی بهینه بوده و کاربرد آن‌ها توصیه می‌شود.

۵- شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان به خوبی قادر به پیش‌بینی عمق آبشستگی و پشته رسوبات انتقال یافته است، همچنین نتایج شبیه‌سازی‌های عددی بسیار سازگار با نتایج تجربی بوده و نشان می‌دهند تطابق خوبی بین شبیه‌سازی‌های عددی و تجربی وجود دارد. از اینرو می‌توان نتیجه گرفت نرم‌افزار Flow-3D جهت شبیه‌سازی هیدرولیکی و نیز آبشستگی سازه هیدرولیکی سرریز کنگره‌ای بسیار مناسب بوده و تحلیل‌های هیدرولیکی با توجه به حجم اطلاعات خروجی از نرم‌افزار امکان‌پذیر می‌باشد.

۶- خروجی‌های نرم‌افزار نشان داد سرریز کنگره‌ای در عین حال که موجب بهبود راندمان عبوری جریان می‌گردد، در کاهش عمق آبشستگی در پایین دست نیز بسیار مؤثر می‌باشد؛ به عبارتی کاهش در ابعاد حفره آبشستگی به وضوح در تمامی مدل‌های سرریز کنگره‌ای مشاهده می‌گردد. بیشترین کاهش در سرریز با زاویه راس 60° درجه اندازه گرفته شد که این کاهش در حدود ۸۹، ۷۷، ۴۵ و ۴۹ درصد به ترتیب برای عمق و طول حفره آبشستگی و برای عمق و طول پشته رسوبات تجمع یافته

هدف از انجام تحقیق حاضر، یافتن مدلی برای سرریزهای کنگره‌ای مثلثی بود که بهترین راندمان هیدرولیکی با کمترین میزان آبشستگی در پایین دست سد را ایجاد نماید. با انجام شبیه‌سازی‌های عددی می‌توان نتایج زیر را بیان نمود:

۱- به هنگام عبور جریان از روی سرریز کنگره‌ای برخورد تیغه‌های جریان می‌تواند باعث استغراق موضعی در آن ناحیه گردد؛ ناحیه استغراق می‌تواند از رئوس بالادست سرریز شروع شود و با افزایش بار هیدرولیکی سراسر سرریز را در برگیرد. با افزایش طول سرریزها، یا به عبارتی با افزایش تعداد مثلث‌های (N) موجود در سرریز، تداخل جریان افزایش و ضریب دبی (Cd) و نیز راندمان سرریز کاهش می‌یابد، با اینکه با افزایش یافتن طول سرریزها طول تاج افزایش می‌یابد ولی افزایش مؤثر طول تاج محقق نمی‌شود، یعنی مناطق وسط که لایه‌های جریان به هم برخورد خواهند کرد افزایش می‌یابد؛ بیشتر شدن این مناطق مانع از عبور آسان جریان از روی سرریز می‌شود. در نتیجه این امر، راندمان دبی متأثر از افزایش تداخل جریان بوده و با افزایش طول سرریزها و سپس افزایش ناحیه تداخل جریان، راندمان آبگذری روند کاهشی می‌یابد.



نیز در پایین دست افزایش می‌یابد. با این وجود، با افزایش سرعت جریان، شدت پرش هیدرولیکی افزایش و برگشت جریان به سمت بالادست و پای سرریز مشاهده می‌گردد که این امر موجب می‌شود حفره آبشستگی مجدداً با رسوبات برگشتی پر شده و ابعاد حفره آبشستگی کاهش یابد.

می‌باشد. در مدل سرریز ۶۰ درجه، علاوه بر بیشترین میزان کاهش ابعاد حفره آبشستگی، بیشترین میزان استهلاك انرژی جریان نیز ثبت گردید.

۷- افزایش ارتفاع سرریز، موجب کاهش راندمان سرریز می‌گردد لیکن سرعت جریان در پای سرریز افزایش و آبشستگی

دسترسی به داده‌ها

داده‌های استفاده شده (یا تولید شده) در این پژوهش در متن مقاله ارائه شده است.

" نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در رابطه با نوشتن و یا انتشار این مقاله ندارند."

منابع

- Aly-Elnikhely, E. and Fathy, I. 2020. Prediction of scour downstream of triangular labyrinth weirs. *Alexandria Engineering Journal*, 59(2): 1037-1047.
- Amanian, N. 1987. Performance and design of labyrinth spillways, M.S. thesis, Utah State University, Logan, Utah.
- Babakhani, A. and Morsali, M. 2020. Investigation on the effect of different parameters on maximum scour depth at triangular labyrinth weir without apron. *Modarres Civil Engineering journal*, 20(1): 1-10.
- Brethour, J.M. 2001. Transient 3-d model for lifting, transporting and depositing solid material. *International Symposium on Environmental University Hydraulics*, Tempe, Arizona.
- Crookston, B.M. and Tullis, B.P. 2010. Hydraulic performance of labyrinth weir". *Proc. of the Int. Junior Researcher and Engineer Workshop on Hydraulic Structures (IJREWS'10)*. Edinburgh, U.K.
- Crookston, B.M. and Tullis, B.P. 2011. Hydraulic characteristics of labyrinth weirs, Labyrinth and Piano Key weirs (PKW). *Taylor and Francis Group*, London, 25-32.
- Crookston, B.M. and Tullis, B.P. 2012a. Discharge efficiency of reservoir-application-specific labyrinth weirs. *American Society of Civil Engineering, Journal of Hydraulic Engineering*, 138(6): 564-568.
- Crookston, B.M. and Tullis, B.P. 2012b. Arced labyrinth weirs. *American Society of Civil Engineering, Journal of Hydraulic Engineering*, 138(6): 555-562.
- Crookston, B.M. and Tullis, B.P. 2013. Hydraulic design and analysis of labyrinth weirs I: discharge relationships. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(5): 363-370.
- D'Agostino, V. and Ferro, V. 2004. Scour on alluvial bed downstream of grade-control structures. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 130 (1): 24-37.
- Dargahi, B. (2003). Scour development downstream of a spillway. *Journal of Hydraulic Research*, 41(4): 417-426.
- Dey, S., Bose, S.K. and Sastry, G.L.N. 1995. Clear-water scour at circular piers: a model. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 121(12): 869-876.
- Elnikhely, E.A. 2016. Minimizing scour downstream of spillways using curved vertical sill. *Nineteenth International Water Technology Conference*. Ettema, R. 1980. Scour at bridge piers. PhD Thesis, Auckland University, Auckland, New Zealand.
- Falvey, H.T. 2003. Hydraulic design of labyrinth weirs. *ASCE Press*, Reston, VA, United States.
- Flow Science, Inc. 2008. *FLOW-3D User's Manual*. Flow Science, Inc.
- Gentilini, B. 1940. *Stramazzi con cresta a planta obliqua e a zig-zag*, *Memorie e Studi dell Istituto di Idraulica e Construzioni Idrauliche del Regil Politecnico di Milano*, Italian.
- Ghodsian, M. 2009. Stage-discharge relationship for a triangular labyrinth spillway, in *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Water Management*, 162(3): 173-178.
- Gupta, K.K., Kumar, S. and Ahmad, Z. 2015. Effect of weir height on flow performance of sharp crested rectangular - planform weir. *World Applied Sciences Journal*, 33(1): 168-175.



- Guven, A. and Gunal, M. 2008. Prediction of scour downstream of gradecontrol structures using neural networks. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 134(11): 1656–1660.
- Heidarpour, M., Mousavi, S.F. and Roshanimehr, A.R. 2007. Investigation of polyhedron weirs with rectangular plan and U-shaped, (in Persian). *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 3(A): 1-11.
- Jüstrich, S., Pfister, M. and Schleiss, A.J. 2016. Mobile riverbed scours downstream of a Piano Key weir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(11): 40-46.
- Kardan, N., Hakimzadeh, H. and Hassanzadeh, Y. (2013). 3D Numerical simulation of hydrodynamic parameters around the bridge piers using various turbulence models. *Journal of Irrigation Science and Engineering*, 37(4): 39-54 (in Persian).
- Kumar, V., Rang Raju, K.G. and Vittal, N. 1999. Reduction of local scour around bridge piers using slot and collars. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 125(12): 1302-1305.
- Kumar, B. and Ahmad, Z. 2020. Experimental study on scour downstream of a piano key weir with nose. 8th IAHR ISHS, Santiago, Chile.
- Melville, B.W. and Chiew, Y.M. 1999. Time scale for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 125(1): 59-65.
- Melville, B.W. and Lim, S.Y. 2013. Scour caused by 2D horizontal jet. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(2): 149-155.
- Melville, B.W. 2015. Scour at various hydraulic structures: sluice gates, submerged bridges and low weirs, in: Conference: 5th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, Brisbane, Australia, 2014, Conference Paper, Australasian. *Journal of Water Resources*, 18(2): 101–117.
- Morsali M. 2019. Investigation on scour downstream of triangular labyrinth weir. M.Sc. thesis. University of Zanjan, Zanjan, Iran.
- Novak, P.J. 1961. Influence of bed load passage on scour and turbulence downstream of stilling basin, in: 9th Congress, IAHR, Dubrovnik, Croatia.
- Saleh, O.K., Elnikhely, E.A. and Ismail, F. 2019. Minimizing the hydraulic side effects of weirs construction by using labyrinth weirs. *Flow Measurement and Instrumentation*, 66: 1–11.
- Scurlock, S.M., Thornton, L.C. and Abt, S.R. 2012. Equilibrium scours downstream of three-dimensional grade control structure. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(2): 167-176.
- Schoklitsch Kolkbildungunteru, A. 1932. Berfallstrahlen, Scour formation below overfall jets, *Dieasserwirtschaft*, 25(24): 341–343 (in German).
- Sheppard, D.M. and Miller, W. 2006. . Live Bed Local pier scour experiments. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 132(7): 635-642.
- Smith, H. and Foster, D. 2005. Modeling of flow around a cylinder over a scoured Bed. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 14(1): 121-137.
- Van Rijn, L.C. 1984. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. University of Utrecht, the Netherlands.
- Yazdi, A.M., Hoseini, S.A., Nazari, S. and Amanian, N. 2021. Effects of weir geometry on scour development in the downstream of Piano Key Weirs. *Water Supply*, 21(1): 289-298.