

Research Article

Experimental Investigation of the Effect of Circular and Triangular Ski-Jump Bucket Geometries on Downstream Scour Characteristics

Seyed Mohammad Zare¹, Sohrab Nazari^{2*} 

1-M.Sc. Graduate in Civil Engineering – Water and Hydraulic Structures, Eghlid Branch, Islamic Azad University, Eghlid, Iran.

*Corresponding Author: 2- Department of Civil and Water Engineering, Eghlid Branch, Islamic Azad University, Eghlid, Iran

(✉ Corresponding Author: Nazari1351@iau.ac.ir)

ARTICLE INFO	HOW TO CITE THIS ARTICLE
Received: 19 July 2026	Zare, M., & Nazari, S., (2026). Experimental Investigation of the Effect of Circular and Triangular Ski-Jump Bucket Geometries on Downstream Scour Characteristics. V.27, No.102, P:89-114
Revised: 22 August 2026	
Accepted: 5 September 2026	
Available Online: 15 September 2026	https://doi.org/10.22092/idser.2026.373612.1654

Extended Abstract

Introduction

Local scour downstream of hydraulic structures is an important concern in the design and long-term safety of spillways and energy dissipation systems. High-velocity flow issuing from ski-jump buckets interacts with the downstream water and movable bed, resulting in the formation of scour holes. The characteristics of these scour holes depend on hydraulic conditions, sediment properties, tailwater depth, and bucket geometry. Among these factors, bucket geometry can influence the measured scour response downstream. Although numerous studies have investigated scour downstream of ski-jump buckets, comparative experimental studies focusing on different bucket geometries remain limited. Therefore, the present study investigated the influence of circular and triangular ski-jump bucket geometries on downstream scour characteristics. The main hypothesis of this study was that changing the bucket geometry under similar hydraulic and sediment conditions could significantly modify the downstream scour response. Accordingly, the objective was to experimentally compare the effects of circular and triangular ski-jump buckets on the maximum scour depth (d_s) and the distance from the bucket to the location of maximum scour (L_s). In addition, power-law regression models were developed to predict these scour characteristics.

Materials and Methods

A series of physical model experiments was conducted using circular and triangular ski-jump buckets under controlled laboratory conditions. The experimental program included different hydraulic and geometric conditions and consisted of 108 experimental runs. A movable sediment bed was used to evaluate the downstream scour response. The maximum scour depth (d_s) and the distance to the location of maximum scour (L_s) were considered as the principal dependent variables. The effects of discharge, tailwater conditions, and characteristic geometric parameters of the buckets were investigated. Dimensional analysis was used to identify the governing dimensionless parameters. Based on the experimental data, separate multivariable power-law regression models were developed for each bucket geometry and scour parameter. The performance of the proposed models was evaluated using the coefficient of determination (R^2), Nash–Sutcliffe efficiency (NSE), root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), and mean absolute percentage error (MAPE). One-to-one plots and residual analyses were also used to assess the agreement between measured and predicted values and to identify possible systematic errors. Furthermore, statistical tests were performed to evaluate the significance of differences between the scour characteristics produced by the two bucket geometries at a 5% significance level. Each experimental condition was conducted once, and independent repeated tests were not performed for all conditions. Consequently, between-run variability could not be directly quantified. However, the sediment bed was prepared and leveled before each

experiment, and the hydraulic and geometric conditions were controlled according to the experimental design.

Results and Discussion

The results showed that discharge was one of the principal parameters affecting downstream scour development. Increasing discharge generally increased both the maximum scour depth and the distance to the location of maximum scour for both circular and triangular buckets. Comparison of the two geometries revealed clear differences in their measured scour responses. Within the investigated range of experimental conditions, the triangular ski-jump bucket produced a lower average maximum scour depth than the circular bucket. The average reduction in maximum scour depth was approximately 11%. The distance to the location of maximum scour also differed between the two configurations. The triangular bucket increased this distance by approximately 40% compared with the circular bucket. Therefore, under the investigated laboratory conditions, the maximum scour occurred farther downstream when the triangular configuration was used. Statistical comparisons confirmed that the differences between the circular and triangular buckets were significant at the 5% significance level for both maximum scour depth and the location of maximum scour. These results indicate that bucket geometry has a significant effect on the measured scour response. The proposed power-law regression models provided satisfactory predictions within the range of the experimental data. The statistical performance indices showed good overall agreement between measured and predicted values. In addition, the one-to-one plots demonstrated that the predicted values were reasonably distributed around the line of equality. Residual analyses also supported the overall adequacy of the proposed models. The residuals were generally distributed around zero, with no pronounced systematic pattern. However, the normality assumption was not equally supported for all models. Therefore, model performance was assessed using a combination of statistical indices and graphical analyses. The results provide direct experimental evidence that bucket geometry affects downstream scour characteristics. However, hydraulic variables such as velocity distribution, residual jet energy, pressure distribution, and bed shear stress were not directly measured. Therefore, the detailed hydrodynamic mechanisms responsible for the observed differences cannot be confirmed directly and require further investigation.

Conclusions

This study experimentally investigated the influence of circular and triangular ski-jump bucket geometries on downstream local scour characteristics. The results demonstrated that discharge and bucket geometry significantly affected the maximum scour depth and the location of maximum scour. Increasing discharge generally increased both scour depth and the downstream distance to the location of maximum scour. Within the investigated experimental range, the triangular bucket reduced the average maximum scour depth by approximately 11% compared with the circular bucket. In contrast, the distance to the location of maximum scour increased by approximately 40% for the triangular configuration. Statistical analyses confirmed that the differences between the two geometries were significant for both investigated scour parameters. Furthermore, the proposed multivariable power-law regression models showed satisfactory predictive capability within the range of the experimental data. The combined use of statistical performance indices, one-to-one plots, and residual analyses supported the overall applicability of the developed models. Overall, the findings confirm that ski-jump bucket geometry is an important factor influencing downstream scour characteristics. Under the laboratory conditions investigated, the triangular bucket showed more favorable performance in terms of reducing maximum scour depth while shifting the location of maximum scour farther downstream. The absence of repeated tests and the lack of direct measurements of jet hydrodynamic characteristics are limitations of the present study. Future investigations should include repeated experiments under representative conditions and direct measurements of flow characteristics to provide a better understanding of the mechanisms governing downstream scour.

Conflict of Interest

The authors declare that they have no conflict of interest regarding the preparation and publication of the materials and findings presented in this study.

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship, or publication of this article.

Data Availability Statements

The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Author Contribution

Seyed Mohammad Zare: Data Collection, Working in Laboratory and Sohrab Nazari: Writing, Methodology, Investigation and Data Curation, Analysis, Guidance and Supervision, Text Editing, Completion and Data Collection.

Acknowledgement

The authors wish to express their sincere gratitude to the Editor, two anonymous reviewers and the copy editor for their insightful comments and constructive feedback, which significantly improved the quality of this manuscript.

Keywords: Local scour; Ski-jump bucket geometry; Circular bucket; Triangular bucket; Power-law regression.



© 2026, The Author(s). Published by [Agricultural Engineering Research Institute](#). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). Which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

[https:// 10.22092/idser.2026.373612.1654](https://10.22092/idser.2026.373612.1654)

نوع مقاله: پژوهشی

بررسی آزمایشگاهی اثر هندسه جام‌های پرتابی دایره‌ای و مثلی بر مشخصات آبشستگی پایین‌دست

سید محمدزارع^۱، سهراب نظری^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۲۸ | تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۳۱ | تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۱۴ | تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۲۴

چکیده

آبشستگی موضعی در پایین‌دست جام‌های پرتابی یکی از مسائل مهم در طراحی و ایمنی سازه‌های هیدرولیکی است و هندسه جام می‌تواند بر ویژگی‌های حفره فرسایشی تأثیرگذار باشد. هدف این پژوهش، بررسی آزمایشگاهی اثر هندسه جام‌های پرتابی دایره‌ای و مثلی بر مشخصات آبشستگی پایین‌دست و توسعه روابط پیش‌بینی‌کننده برای پارامترهای اصلی فرسایش است. آزمایش‌ها در شرایط مختلف هیدرولیکی و هندسی اجرا شد و حداکثر عمق فرسایش (d_s) فاصله محل وقوع حداکثر عمق فرسایش (L_s) به عنوان متغیرهای وابسته اندازه‌گیری شدند. به منظور تحلیل داده‌ها، از تحلیل ابعادی و مدل‌های رگرسیونی توانی چندمتغیره استفاده شد و عملکرد مدل‌ها با شاخص‌های آماری شامل ضریب تعیین (R^2)، ضریب نش-ساتکلیف (NSE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین قدر مطلق خطا (MAE) و درصد میانگین قدر مطلق خطا (MAPE) ارزیابی گردید. برای مقایسه عملکرد دو هندسه، آزمون‌های آماری استنباطی و تحلیل باقیمانده‌ها صورت گرفت و نتایج نشان داد که با افزایش دبی جریان، حداکثر عمق فرسایش و فاصله محل وقوع آن در هر دو نوع جام افزایش می‌یابد. مقایسه دو هندسه نشان داد که جام مثلی، در محدوده شرایط آزمایشگاهی مورد بررسی، به طور متوسط موجب کاهش حدود ۱۱ درصد در حداکثر عمق فرسایش و افزایش حدود ۴۰ درصد در فاصله محل وقوع حداکثر فرسایش نسبت به جام دایره‌ای می‌شود. نتایج آزمون‌های آماری نیز معنی‌دار بودن تفاوت مشاهده‌شده بین دو هندسه را تأیید کرد. مدل‌های رگرسیونی پیشنهادی دقت قابل قبولی داشتند و بررسی نمودارهای یک‌به‌یک و باقیمانده‌ها کفایت کلی مدل‌ها و نبود خطای سیستماتیک قابل توجه را نشان داد. در مجموع، نتایج بیانگر تأثیر معنی‌دار هندسه جام پرتابی بر پاسخ فرسایشی پایین‌دست است. با این حال، نتایج در محدوده شرایط آزمایشگاهی مطالعه حاضر قابل تفسیر است و بررسی مستقیم مشخصات هیدرودینامیکی جت و اجرای آزمایش‌های تکراری می‌تواند موضوع پژوهش‌های آینده باشد.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی موضعی؛ جام پرتابی؛ هندسه جام؛ حداکثر عمق فرسایش؛ تحلیل رگرسیون توانی

مقدمه

دارند. با این همه، جریان‌های فوق‌بحرانی عبوری از این سازه‌ها انرژی جنبشی زیادی دارند و اگر استهلاک مناسب نباشد موجب فرسایش شدید در پایین‌دست، تشکیل حفره‌های آبشستگی و تهدید ایمنی سازه و بستر رودخانه می‌شوند. از این رو، استهلاک انرژی جریان و کنترل آبشستگی پایین‌دست همواره یکی از مسائل اساسی در طراحی سازه‌های هیدرولیکی به شمار می‌رود. یکی از متداول‌ترین

سرریزها از مهم‌ترین سازه‌های هیدرولیکی محسوب می‌شوند که وظیفه انتقال ایمن جریان‌های سیلابی، تنظیم تراز مخزن و حفاظت از پایداری سدها را بر عهده دارند. در میان انواع مختلف سرریزها، سرریزهای اوجی و شوت به دلیل ظرفیت بالای عبور جریان و عملکرد مناسب هیدرولیکی، کاربرد گسترده‌ای در پروژه‌های بزرگ منابع آب

^۲ گروه مهندسی عمران - آب، واحد اقلید، دانشگاه آزاد اسلامی، اقلید، ایران. (نویسنده مسئول: Email: So.Nazari1351@iau.ac.ir)

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران - آب و سازه‌های هیدرولیکی، واحد اقلید، دانشگاه آزاد اسلامی، اقلید، ایران.

روش‌های استهلاک انرژی در سرریزهای با بار آبی، استفاده از پرتاب‌کننده‌های جامی^۱ است. در این روش، جریان پس از عبور از شوت و برخورد با پرتاب‌کننده، به صورت جت آزاد به هوا پرتاب شده و بخشی از انرژی آن پیش از برخورد با بستر پایین‌دست مستهلک می‌شود. با وجود عملکرد مناسب این سیستم، رفتار هیدرولیکی جت خروجی و شدت فرسایش پایین‌دست به شدت تحت تأثیر ویژگی‌های هندسی پرتاب‌کننده قرار دارد. پارامترهایی مانند شعاع انحنای جام، زاویه خروج جریان، ارتفاع پرتاب جت و شکل هندسی پرتاب‌کننده می‌توانند نحوه توزیع انرژی، محل برخورد جت و ابعاد حفره فرسایش را تغییر دهند.

مطالعات اولیه درباره فرسایش ناشی از جت‌های آزاد را ورونزه (Veronese, 1937) شروع کرد و پس از آن پژوهشگران دیگر رفتار حوضچه‌های فرسایش در پایین‌دست سرریزهای جامی را بررسی کردند. نتایج تحقیقات بورمن و جولین در ۱۹۹۱ و ماسون و آروموگام در ۱۹۸۵ (Bormann, 1985) نشان داد که افزایش انرژی جریان و عدد فرود موجب توسعه حفره آبشستگی و افزایش عمق فرسایش می‌شود. هوفمنس در ۱۹۹۸ و هوفمنس و ورهییج در ۲۰۰۹ (Hoffmans, 1998; Hoffmans & Verheij, 2009) گزارش دادند اندرکنش پیچیده میان جت برخوردی و مصالح بستر نقش تعیین‌کننده‌ای در نحوه توسعه حفره فرسایش دارد. ییلدیز و ازوچک (Yildiz & Uzucek, 1994) روشی ساده بر اساس فرمول ورونزه (Veronese, 1937) برای بررسی اثرهای جت جام پرتابی در پایین‌دست سرریز ارائه دادند. این پژوهشگران عمق آبشستگی پایین‌دست سرریز هفت سد در کشورهای مختلف (سد کبان^۲ ترکیه، سد کاراکایا^۳ ترکیه، سد اوکایا^۴ هند، سد کلیکایا^۵ ترکیه، سد تاربل^۶ پاکستان، سد کبورا^۷ باساز^۸ موزامبیک و سد پیکوت^۸

پرتغال) را با استفاده از فرمول ساده ورونزه بررسی و برآورد کردند، نتایج بررسی‌ها نشان داد فرمول ورونزه با دقت مناسبی قابلیت برآورد عمق آبشستگی را دارد. امانیان و اوروز (Amanian & Urroz, 1993) برای بررسی هندسه گودال آبشستگی، آزمایش‌هایی را روی سرریز با جام پرتابی و حوضچه آبگیر با بستر شنی اجرا کردند و معادلاتی را برای توصیف شکل گودال و ابعاد مواد رسوبی انباشته شده انتهای آن ارائه دادند. نتایج بررسی‌های آنها نشان داد گودال‌های از پیش حفاری‌شده عملکردی مشابه گودال‌های طبیعی ایجاد شده دارند. این محققان یک نمونه طراحی برای کاربرد عملی گودال‌های از پیش حفاری‌شده ارائه کردند. عظمت‌اله و همکاران (Azmathullah et al., 2004, 2006) با بررسی فرسایش پایین‌دست سرریزهای جامی نشان دادند که پارامترهایی مانند زاویه خروج جام، شعاع انحنای پرتاب‌کننده، هد جریان و شرایط پایاب تأثیری مستقیم بر عمق و ابعاد حفره آبشستگی دارند. نتایج این تحقیق بیانگر آن بود که افزایش زاویه پرتاب، موجب افزایش طول جت و انتقال محل حداکثر فرسایش به نقاط دورتر از لبه جام می‌شود. این پژوهش همچنین نشان داد که روابط غیرخطی مبتنی بر تحلیل ابعادی می‌توانند دقت مناسبی در پیش‌بینی عمق و طول حفره آبشستگی داشته باشند. در پژوهشی با عنوان "بررسی آزمایشگاهی آبشستگی پایین‌دست پرتاب‌کننده جامی شکل" اکبری و همکاران (Akbari et al., 2014) رفتار حفره فرسایش ناشی از جت خروجی پرتاب‌کننده را بررسی کردند و نشان دادند عدد فرود جریان مهم‌ترین پارامتر مؤثر بر توسعه حفره آبشستگی است و افزایش آن باعث افزایش عمق، طول و عرض حفره فرسایش می‌شود. همچنین گفته شد مدل‌های غیرخطی ارائه‌شده توانایی مناسبی در پیش‌بینی بیشترین عمق فرسایش و طول حفره دارند و ضریب‌های همبستگی بالایی برای روابط تجربی

⁵ Kilickaya dam (Turkey)

⁶ Tarbela dam (Pakistan)

⁷ Cabora Bassa dam (Mozambique)

⁸ Picot dam (Portugal)

¹ Flip Bucket or ski- jump buckets

² Keban dam (Turkey)

³ Karakaya dam (Turkey)

⁴ Ukai dam (India)

تمرکز موضعی جریان و افزایش فرسایش شوند. (S. Abdollahi et al., 2024) به بررسی تأثیر طول لبه سرریز جام پرتابی بر میزان آب‌شستگی پایین‌دست پرداختند. نتایج آزمایش‌ها در فلولم آزمایشگاهی نشان داد که افزایش طول لبه موجب افزایش استهلاک انرژی جریان و کاهش عمق آب‌شستگی می‌شود. افزایش ۷۰ درصد در طول نسبی لبه در زاویه ۴۵ درجه، عمق آب‌شستگی را حدود ۸۸ درصد کاهش داد. این پژوهشگران سرانجام رابطه‌ای تجربی برای پیش‌بینی حداکثر عمق نسبی آب‌شستگی ارائه کردند که دقت قابل قبولی دارد. پلگرینو و تولدو (Pellegrino & Toledo, 2023) با اجرای آزمایش‌های آزمایشگاهی موقعیت، ابعاد و شکل حوضچه فرسایشی ایجادشده در پایین‌دست سرریز جام پرتابی را بررسی کردند و نشان دادند طراحی مناسب جام پرتابی نقش مهمی در انتقال ایمن جریان به رودخانه و کاهش خطرهای ناشی از فرسایش دارد. این محققان همچنین روشی برای پیش‌بینی و تعیین مشخصات حوضچه فرسایشی بر اساس ویژگی‌های طراحی سرریز ارائه دادند. دیاز و همکاران (Diaz et al., 2024) با هدف تعیین مشخصات حوضچه فرسایشی بر اساس ویژگی‌های طراحی سرریز، عملکرد جام پرتابی سرریز سد پرادو^۶ را تحت شرایط دبی سیلاب حداکثر محتمل جدید (PMF) ارزیابی کردند. در این پژوهش از ترکیب روابط تجربی، مدل‌سازی عددی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و مدل فیزیکی برای بررسی کفایت هندسه جام پرتابی، میزان استهلاک انرژی و پتانسیل آب‌شستگی پایین‌دست استفاده شد. نتایج تحقیق نشان داد تلفیق مدل‌سازی عددی و فیزیکی می‌تواند در پیش‌بینی الگوی فرسایش و برآورد حداکثر عمق آب‌شستگی عملکرد قابل قبولی داشته باشد و به‌عنوان ابزاری مؤثر در ارزیابی ایمنی و عملکرد هیدرولیکی سرریزها به کار رود. رجائی و همکاران (Rajaei et al., 2024) آب‌شستگی موضعی

به دست آمده است. هنگ و همکاران (Heng et al., 2012, 2013) با استفاده از مدل فیزیکی سرریز سد نام نگوم^۱ به بررسی شبیه‌سازی گودال آب‌شستگی حوضچه آرامش ناشی از جت خروجی سرریز جام پرتابی توسط مصالح صلب پرداختند و گزارش دادند گودال شبیه‌سازی شده به خوبی رفتار پیچیده جریان را نشان می‌دهد. همچنین مشخص شد که شرایط بهره‌برداری سرریز، مورفولوژی رودخانه و توپوگرافی طبیعی حوضچه از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر توسعه آب‌شستگی است. در سال‌های اخیر در زمینه اصلاح شکل هندسی پرتاب‌کننده‌ها و افزایش بازده استهلاک انرژی پژوهش‌های متعددی شده است. نتایج مطالعات اسکندری و همکاران (Eskandari et al., 2020) نشان می‌دهد استفاده از جام‌های شیاردار و زیگزagi^۲ موجب توزیع بهتر انرژی و کاهش تمرکز تنش بر بستر می‌شود. چی و کونگ (Chee & Kung, 1971) به بررسی ویژگی‌های گودال‌های آب‌شستگی ناشی از جت‌های خروجی از جام‌های پرتابی سرریز پرداختند. این محققان در آزمایش‌ها اثر زاویه‌های مختلف جام و اندازه مصالح بستر بر فرسایش را بررسی کردند. آنها همچنین روابطی برای تعیین حداکثر عمق و شکل سه‌بعدی گودال‌های آب‌شستگی و طراحی حوضچه‌های استهلاک انرژی ارائه دادند. هی و همکاران (He et al., 2021) در مطالعه‌ای با استفاده از تکنیک‌های شبیه‌سازی عددی^۳ توسط نرم افزار فلوئنت^۴ عملکرد جام پرتابی در سرریز سد شاهه^۵ را بررسی کردند. این پژوهشگران سه طرح هندسی را بر اساس شعاع و زاویه جت ارزیابی و پارامترهای هیدرولیکی را تحلیل کردند و نتیجه گرفتند زاویه ۱۹/۴۲ درجه و شعاع ۳۳/۸۴ متر بهترین عملکرد را در کاهش فرسایش پایین‌دست دارد. از سوی دیگر، ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2024) گزارش کردند اگرچه جام‌های دیفرانسیلی عملکرد مناسبی در استهلاک انرژی دارند، اما در برخی شرایط می‌توانند موجب

⁴ Fluent software

⁵ Shahe Reservoir dam (China)

⁶ Prado Dam Spillway (located in southern California)

¹ Nam Ngum dam (Laos)

² Labyrinth

³ Computational Fluid Dynamics (CFD)

علاوه بر مطالعات آزمایشگاهی، استفاده از مدل‌های داده‌محور و هوش مصنوعی برای پیش‌بینی فرسایش پایین‌دست نیز توسعه یافته است. نتایج تحقیقات فولادی‌پناه و همکاران (Fuladipناه et al., 2023) نشان می‌دهد پارامترهایی مانند سرعت خروجی جریان، ارتفاع سقوط جت و شکل هندسی پرتاب‌کننده تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر توسعه حفره آبشستگی دارند و مدل‌های هوشمند می‌توانند رفتار پیچیده جریان را با دقت مناسبی شبیه‌سازی کنند. عظمت-اله و همکاران در سال ۲۰۱۰ و گوون و عظمت‌الله در سال ۲۰۱۲ (Azamathulla et al., 2010; Guven & 2012) با استفاده از روش برنامه‌ریزی الگوریتم ژنتیک، روابط مناسبی برای پیش‌بینی عمق فرسایش ارائه کردند. نو و مقدم (Nou & Moghaddam, 2022) به بررسی عمق آبشستگی ناشی از جام‌های پرتابی در سرریزها پرداختند و برای تخمین عمق آبشستگی از سه روش هوش مصنوعی شامل GBDT، Extra Trees و Random Forest استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد روش GBDT دقیق‌ترین عملکرد را با کمترین خطا در پیش‌بینی عمق آبشستگی دارد. اوگراس و اونن (Ogras & Onen, 2026) با استفاده از مدل‌سازی عددی Flow3D و نتایج مدل‌های فیزیکی عملکرد هیدرولیکی سرریز سد ایلوسو^۱ و سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی را ارزیابی کردند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که مدل‌های آشفستگی RNG و k-ε توانایی مناسبی در شبیه‌سازی جریان دارند. همچنین با بررسی ۱۶ طرح مختلف جام پرتابی، تأثیر زاویه و شعاع جام بر میزان استهلاك انرژی و عملکرد هیدرولیکی سرریز بررسی گردید.

با وجود مطالعاتی که درباره آبشستگی پایین‌دست جام‌های پرتابی شده است، هنوز اثر مستقل شکل هندسی جام بر مشخصات اصلی حفره فرسایشی، تحت شرایط هیدرولیکی و رسوبی کنترل‌شده، نیازمند بررسی بیشتر

پایین‌دست شوت‌های پله‌ای مجهز به جام پرتابی را بررسی و به این نتیجه دست یافتند که استفاده از شوت پله‌ای در مقایسه با شوت صاف، بسته به شرایط هیدرولیکی و هندسی، می‌تواند عمق آبشستگی پایین‌دست را حدود ۱۵ تا ۵۱ درصد کاهش دهد و کاهش شیب شوت از ۱:۱ به ۱:۲ موجب کاهش بیشتر میزان فرسایش و بهبود عملکرد استهلاك انرژی می‌شود. این نتایج بیانگر نقش قابل توجه هندسه شوت و نحوه استهلاك انرژی پیش از خروج جریان از جام پرتابی در کنترل آبشستگی پایین‌دست است. خلیفه‌ای و همکاران (Khalifehei et al., 2020) به صورت آزمایشگاهی آبشستگی رسوبات در پایین‌دست جام پرتابی سرریزهای جانبی را در شرایط مختلف دبی جریان و عمق آب پایین‌دست بررسی کردند. در این پژوهش، مشخصات اصلی حوضچه آبشستگی شامل حداکثر عمق و فاصله گودال آبشستگی از سازه ارزیابی شد. نتایج نشان داد که با افزایش دبی جریان، عمق و طول حوضچه آبشستگی افزایش می‌یابد. همچنین، الگوی انتقال و تجمع رسوبات به عمق آب پایین‌دست وابسته است به گونه‌ای که در عمق‌های بیشتر، تمایل به تجمع رسوبات در بخش بالادست حوضچه افزایش می‌یابد. در نهایت، رابطه‌ای تجربی برای پیش‌بینی مشخصات آبشستگی ارائه شد که میانگین خطای نسبی مطلق را حدود ۳۴/۲ درصد نشان می‌دهد. در مجموع، مطالعات پیشین نشان می‌دهند که دبی جریان، عمق آب پایین‌دست، هندسه شوت و جام پرتابی و شرایط بستر از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر توسعه ابعاد حوضچه آبشستگی هستند. با وجود این، رفتار آبشستگی در پایین‌دست جام‌های پرتابی همچنان به شدت وابسته به شرایط هندسی و هیدرولیکی هر سازه است و توسعه روابط عمومی برای پیش‌بینی دقیق حداکثر عمق و موقعیت آبشستگی نیازمند مطالعات آزمایشگاهی و مدل‌سازی بیشتر است.

¹ Ilisu Baraji dam (Turkey)

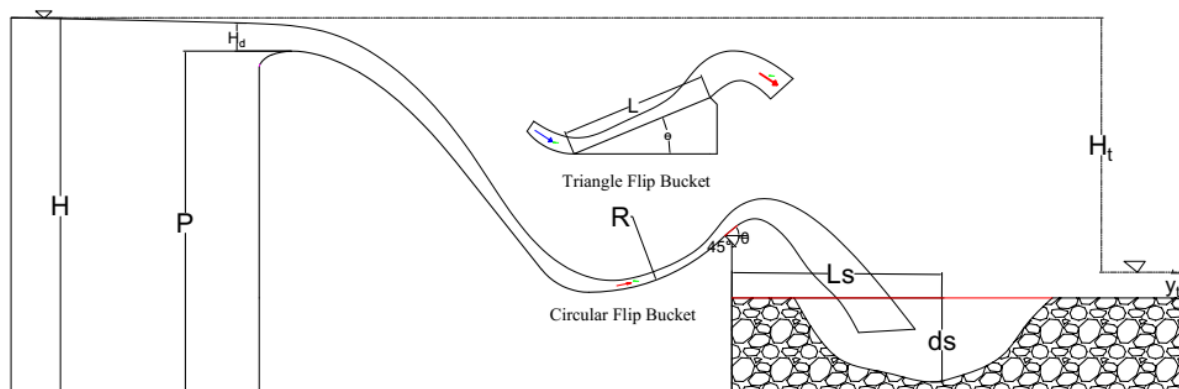
عملکرد دو هندسه با استفاده از تحليل‌های آماری ارزیابی خواهد شد تا مشخص شود آیا اختلاف مشاهده شده در پاسخ فرسایشی از نظر آماری معنی دار است یا خیر.

مواد و روش‌ها

آنالیز ابعادی

فرسایش پايين دست سرریزهای جامی تابعی از اندرکنش پیچیده میان مشخصات هیدرولیکی جریان، ویژگی‌های هندسی پرتاب کننده و خصوصیات مصالح بستر است. به منظور بررسی رفتار فرسایش و ارائه روابط حاکم، استفاده از آنالیز ابعادی یکی از روش‌های مناسب برای تعیین پارامترهای بی‌بعد مؤثر بر این پدیده به شمار می‌رود. در این پژوهش، با توجه به هدف بررسی تأثیر شکل هندسی پرتاب کننده‌های مثلثی و ربع دایره‌ای بر پارامترهای آبستگي پايين دست براساس شکل (۱) مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر فرسایش در نظر گرفته شد.

است. بر این اساس، فرضیه اصلی پژوهش حاضر این است که تغییر هندسه جام پرتابی از دایره‌ای به مثلثی، تحت شرایط هیدرولیکی و بستر مشابه، موجب تغییر معنی دار در مشخصات آبستگي پايين دست شامل حداکثر عمق فرسایش (ds) و فاصله محل وقوع حداکثر عمق فرسایش (L_s) می‌شود. برای آزمون این فرضیه، دو نوع جام پرتابی دایره‌ای و مثلثی در سه سطح مقیاس هندسی متناظر بررسی شدند. آزمایش‌ها تحت شش دبی و سه نسبت عمق پایاب اجرا شد و در مجموع ۱۰۸ آزمایش مستقل برای ارزیابی اثر پارامترهای هیدرولیکی و هندسی بر پاسخ فرسایشی بستر تحلیل گردید. هدف اصلی این پژوهش، بررسی و مقایسه آزمایشگاهی اثر هندسه جام‌های پرتابی دایره‌ای و مثلثی بر حداکثر عمق فرسایش و فاصله محل وقوع آن و توسعه روابط تجربی مبتنی بر تحلیل ابعادی برای پیش‌بینی این پارامترها در محدوده شرایط آزمایشگاهی است. افزون بر این، تفاوت



شکل ۱- شماتیک سرریز اوجی و جام پرتابی مورد استفاده در مطالعه آزمایشگاهی

Fig. 1- Schematic view of the ogee spillway and flip bucket used in the experimental study.

P: ارتفاع سازه ای سرریز، H: کل عمق آب داخل مخزن، H_d : عمق آب روی سرریز، R: شعاع جام دایره ای، L: طول وتر جام مثلثی، θ : زاویه جام پرتابی، ds : حداکثر عمق فرسایش، L_s : فاصله تا محل وقوع حداکثر فرسایش، y_t : عمق پایاب و H_t : اختلاف سطح آب بالا دست و پايين دست مخزن

پس از آن با حذف ابعاد وابسته، گروه‌های بی‌بعد حاکم استخراج گردیدند. با توجه به مکانیزم تشکیل حفره آبستگي در اثر برخورد جت خروجی با بستر رسوبی، پارامترهای مؤثر در این پژوهش شامل ویژگی‌های

به‌منظور ارائه روابط تجربی قابل تعمیم برای پیش‌بینی مشخصات آبستگي پايين دست جام‌های پرتابی، از تحلیل ابعادی بر پایه قضیه باکینگهام^۱ استفاده شد. در این روش، ابتدا تمامی پارامترهای مؤثر بر آبستگي شناسایی شدند و

¹ Buckingham π Theorem

هیدرولیکی جریان، مشخصات هندسی جام پرتابی و خصوصیات رسوبات بستر در نظر گرفته شدند- برای حداکثر عمق آبشستگی (c_r) و فاصله تا محل وقوع آبشستگی از لبه

(۱) جام پرتابی دایره ای

(۲) جام پرتابی مثلثی

$$d_s, L_s = f(Q, H_t, y_t, R, d_{50}, \rho_s, \rho, g, \mu)$$

$$d_s, L_s = f(Q, H_t, y_t, L, d_{50}, \rho_s, \rho, g, \mu)$$

تجهیزات آزمایشگاهی

به منظور بررسی تأثیر شکل هندسی پرتاب کننده جامی بر فرسایش پایین دست سرریز اوجی، آزمایش‌ها در یک کانال آزمایشگاهی مطابق شکل (۲) با بدنه شفاف از جنس پلکسی گلاس اجرا شد. کانال مورد استفاده در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد اقلید دارای طول ۱۲ متر، عرض ۳۰/۰ و ارتفاع ۵۰/۰ متر است که قابلیت تنظیم شیب را نیز دارد. شفاف بودن دیواره‌های کانال امکان مشاهده رفتار جریان، تشکیل جت خروجی و روند توسعه حفره فرسایشی را فراهم می‌کند- جریان ورودی کانال توسط یک سامانه پمپاژ تأمین می‌گردد و دبی با استفاده از دبی‌سنج اولتراسونیک با دامنه تغییرات ۰/۵ لیتر بر ثانیه نصب شده روی لوله ورودی کانال اندازه‌گیری می‌شود. برای اندازه‌گیری عمق جریان از یک سطح سنج نقطه‌ای استفاده شد با ورثه ای با دقت ۰/۱۰ میلی متر که روی یک اربه با قابلیت حرکت طولی و عرضی نصب شده است. عمق پایاب نیز توسط دریچه نصب شده در انتهای کانال تنظیم می‌شود- در این پژوهش، بستر فرسایش پذیر از مصالح رسوبی با دانه بندی یکنواخت مطابق شکل (۳) با قطر متوسط (d_{50})

برابر ۲/۵ میلی متر استفاده شد. مصالح رسوبی در بخشی به طول ۲ متر و با ضخامت ۲۰ سانتی متر در پایین دست پرتاب کننده پخش و تسطیح گردید تا شرایط یکنواخت اولیه بستر برای تمامی آزمایش‌ها فراهم شود- بر اساس توصیه‌های محققان (Chanson 2015; Julien 2018; Pierre Y. Julien 2010; Vanoni 1975; Yang 1996)، با توجه به مقادیر

انحراف معیار هندسی ذرات $\sigma_g = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}}$ ، ضریب یکنواختی

در این دو رابطه: c_r : حداکثر عمق آبشستگی (متر)، p : دبی در واحد عرض جریان (متر مربع بر ثانیه)، G_s : اختلاف ارتفاع سطح آب داخل مخزن و پایین دست جام (متر)، 9 y_t : عمق پایاب (متر)، Q : شعاع جام دایره ای (متر)، K : طول مشخصه جام مثلثی (متر)، d_{50} : قطر متوسط مصالح بستر (متر)، ρ : چگالی آب (کیلوگرم بر متر مکعب) ρ_s : چگالی مصالح بستر (کیلوگرم بر متر مکعب) f : شتاب جاذبه (متر بر مجذور ثانیه) و μ : ویسکوزیته دینامیکی آب (پاسکال ثانیه) است. با انتخاب سه کمیت تکرارشونده p ، f و طول مشخصه جام (برای جام دایره‌ای Q و برای جام مثلثی K)، گروه‌های بی بعد استخراج شدند- از آنجا که در تمامی آزمایش‌ها، جنس رسوبات، قطر متوسط ذرات ۲/۵۰ میلی متر و چگالی ذرات رسوبی ۲/۶۵ ثابت بود، و همچنین خواص آب و شتاب گرانش تغییر نمی‌کردند، پارامترهای مربوط به خواص سیال و رسوبات به عنوان پارامترهای ثابت در نظر گرفته شدند و از روابط نهایی حذف گردیدند. با توجه به آشفتگی بالای جریان تأثیر لزوجت دینامیکی و عدد رینولدز ناچیز فرض شد. بنابراین گروه‌های بی بعد حاکم به صورت زیر به دست آمدند.

$$\frac{d_s}{y_t}, \frac{L_s}{y_t} = f\left(\frac{q}{\sqrt{gy_t^3}}, \frac{H_t}{y_t}, \frac{R}{y_t}\right) \quad (3)$$

$$\frac{d_s}{y_t}, \frac{L_s}{y_t} = f\left(\frac{q}{\sqrt{gy_t^3}}, \frac{H_t}{y_t}, \frac{L}{y_t}\right)$$

بنابراین رابطه بی بعد ۳ حاصل از تحلیل ابعادی می‌تواند مبنای مناسبی برای تحلیل نتایج آزمایشگاهی و ارائه روابط تجربی پیش‌بینی فرسایش پایین دست جام پرتابی دایره ای و مثلثی باشد.

$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$ و ضریب خمیدگی منحنی دانه بندی $C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{60} \times d_{10}}$ مشخص شده در جدول (۱) می‌توان گفت، دانه‌بندی مصالح بستر یکنواخت و دارای توزیع مناسب است و پیوستگی منحنی دانه‌بندی دارد از این رو برای اجرای آزمایش‌های کنترل‌شده فرسایش و رسوب کاملاً مناسب است.

برای اجرای آزمایش‌ها و ایجاد شرایط جریان، از یک سرریز از نوع اوجی تیپ سازمان عمران امریکا^۱ استفاده شد که به صورت دقیق براساس ضوابط طراحی و ساخته شده بود. با اجرای تعدادی آزمایش اولیه با اندازه گیری دبی جریان و عمق نمودار دبی - عمق برای این سرریز به صورت شکل (۴) ترسیم شد. از شکل (۴) مشخص شد ضریب دبی عبوری برای این سرریز براساس برآزش نم، دار توانی مقدار $0/645$ است. ب برای آنکه امکان مقایسه اثر هندسه جام‌های پرتابی فراهم آید، سه سطح اندازه هندسی برای هر دو نوع جام در نظر گرفته شد. در جام دایره‌ای، شعاع‌های $0/10$ ، $0/15$ و $0/20$ متر و در جام مثلثی، طول وترهای $0/0766$ ، $0/1148$ و $0/1531$ متر انتخاب شدند. شعاع جام دایره‌ای و طول وتر جام مثلثی اگرچه از نظر هندسی کمیت‌های معادل محسوب نمی‌شوند، نسبت ابعاد هندسی در سه سطح مورد بررسی برای هر دو هندسه تقریباً یکسان بود به گونه‌ای که مقیاس‌های هندسی متناظر برابر با $1/5$ و 2 در نظر گرفته شدند. از این رو، مقایسه عملکرد دو هندسه بر اساس سه سطح مقیاس هندسی متناظر و تحت شرایط هیدرولیکی و بستر یکسان صورت گرفت. این رویکرد امکان بررسی اثر شکل هندسی جام را بر مشخصات آبشستگی فراهم کرد. با توجه به تفاوت ماهوی در شکل هندسی جام‌های دایره‌ای و مثلثی، شعاع جام دایره‌ای و طول مشخصه جام مثلثی لزوماً معیارهای کاملاً معادل هندسی محسوب نمی‌شوند. از این رو، هدف از انتخاب ابعاد مختلف برای دو نوع جام، ایجاد تشابه هندسی کامل میان آنها نبوده است. در این پژوهش، شعاع

انحنای جام دایره‌ای به عنوان طول مشخصه هندسی این نوع جام و طول مشخصه تعریف شده برای جام مثلثی به عنوان پارامتر هندسی متناظر آن به کار گرفته شد. ابعاد هر دو گروه از جام‌ها در چند سطح هندسی انتخاب شدند تا ضمن بررسی اثر تغییر اندازه هندسی در هر نوع جام، امکان مقایسه پاسخ فرسایشی آن‌ها تحت شرایط هیدرولیکی و رسوبی یکسان فراهم شود. بنابراین، مقایسه ارائه شده در این پژوهش بر مبنای شرایط جریان، بستر رسوبی و هندسه‌های مشخص آزمایش شده بوده است و نه بر اساس فرض برابری مستقیم شعاع جام دایره‌ای با طول جام مثلثی. بر این اساس، در تحلیل نتایج، هر جام با استفاده از طول مشخصه هندسی مربوط به خود بررسی شد. در روابط بی بعد نیز پارامترهای هندسی به صورت مستقل برای هر نوع جام تعریف شدند تا از ایجاد هم‌ارزی هندسی مصنوعی بین دو شکل متفاوت جلوگیری شود. بنابراین، نتایج حاصل بیانگر تفاوت عملکرد هیدرولیکی و فرسایشی دو هندسه جام در محدوده شرایط آزمایشگاهی مورد بررسی هستند.

به منظور برداشت دقیق پروفیل فرسایش یافته بستر، از یک متر لیزری نصب شده روی ارابه متحرک با قابلیت جابه‌جایی در طول و عرض کانال استفاده شد. این سامانه امکان تهیه دقیق توپوگرافی سه بعدی بستر را پس از هر آزمایش فراهم می‌کرد. برای اجرای هر آزمایش، ابتدا دبی مورد نظر تنظیم و پس از رسیدن جریان به شرایط پایدار، عمق پایاب توسط دریچه انتهایی کانال تنظیم شد. به منظور تعیین زمان مناسب برای اجرای آزمایش‌ها، یک آزمایش مقدماتی وابسته به زمان تحت شرایط دبی $0/012$ مترمکعب بر ثانیه، به عنوان یکی از شدیدترین شرایط هیدرولیکی مورد بررسی در نظر گرفته شد. تغییرات حداکثر عمق فرسایش در فاصله‌های زمانی مختلف ثبت گردید. نتایج در شکل (۵) نشان داد که میزان توسعه فرسایش در مراحل اولیه زیاد است و با گذشت زمان به تدریج کاهش می‌یابد. پس از حدود 200 دقیقه، منحنی تغییرات عمق فرسایش به سمت حالت

¹ United State Brea Reclamation (USBR)

با وجود کنترل شرایط آزمایشگاهی، نبود آزمایش‌های تکراری یکی از محدودیت‌های این پژوهش محسوب می‌شود زیرا بخشی از تغییرات مشاهده‌شده در فرآیند آبشستگی ممکن است ناشی از ماهیت متغیر اندرکنش جریان و بستر رسوبی باشد. بنابراین، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، تعدادی از شرایط نماینده در محدوده‌های مختلف دبی و هندسه به‌صورت تکراری اجرا و پراکندگی نتایج و عدم قطعیت اندازه‌گیری‌ها به‌طور مستقیم ارزیابی شود.

معیار تشابه و ملاحظات اثر مقیاس

در مدل‌سازی فیزیکی پدیده آبشستگی پایین‌دست جام‌های پرتابی، رعایت تشابه بین مدل و نمونه واقعی برای تفسیر و تعمیم نتایج اهمیت اساسی دارد. با توجه به اینکه جریان خروجی از جام پرتابی دارای سطح آزاد است و رفتار آن عمدتاً تحت تأثیر نیروهای اینرسی و ثقلی قرار دارد، تشابه فرودی به‌عنوان معیار اصلی تشابه هیدرولیکی در این پژوهش مورد توجه قرار گرفت. در آزمایش‌های حاضر، عدد فرود جریان روی جام در محدوده ۶ تا ۱۳ قرار داشت که بیانگر جریان فوق‌بحرانی و اهمیت غالب نیروهای اینرسی و ثقلی در رفتار جت خروجی است. از نظر هندسی، تمامی شرایط آزمایش در یک فلوم و با مشخصات ثابت سرریز به‌اجرا در آمد و دو نوع جام تحت شرایط هیدرولیکی و رسوبی مشابه مقایسه شدند. جام دایره‌ای با شعاع‌های ۰/۱۰، ۰/۱۵، ۰/۲۰ متر و جام مثلثی با سه طول مشخصه ۰/۰۷۶۶، ۰/۱۱۴۸ و ۰/۱۵۳۱ متر و نسبت‌های عمق پایاب به طول مشخصه جام در سه سطح ۰/۳۰، ۰/۴۵ و ۰/۶۰ بررسی شد.

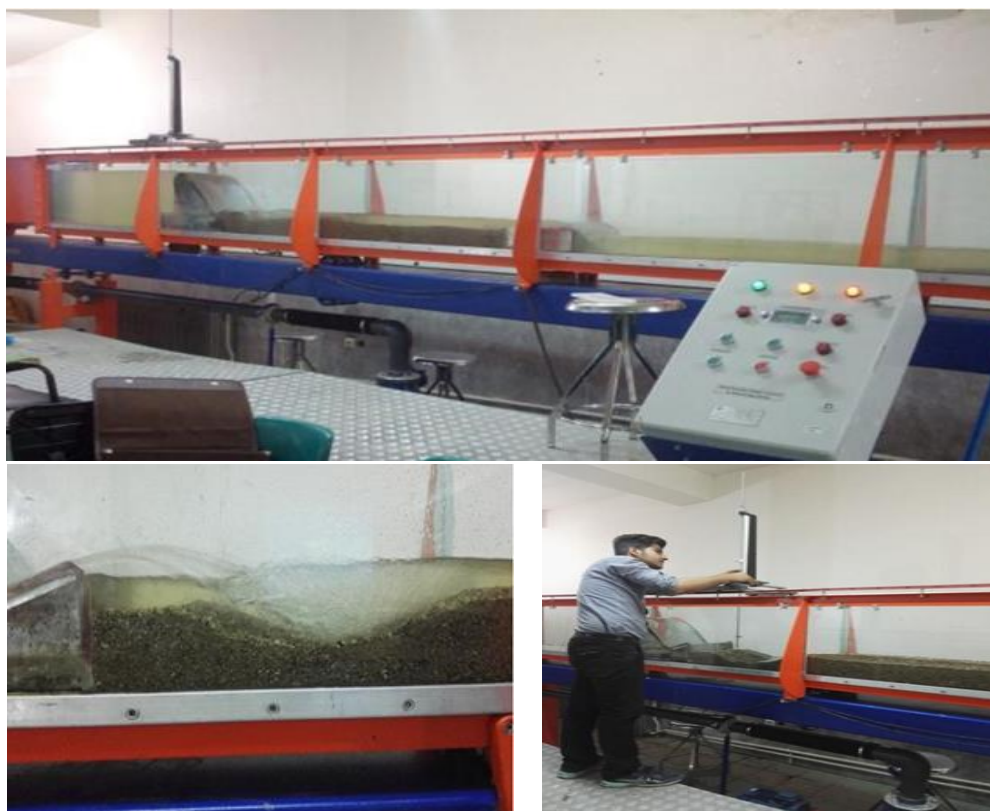
برای کنترل شرایط رسوبی، در تمامی آزمایش‌ها از مصالح بستر یکسان با دانه‌بندی تقریباً یکنواخت، قطر میانه ۲/۵۰ میلی‌متر و وزن مخصوص نسبی رسوبات ۲/۶۵، استفاده شد. ضخامت لایه رسوبی و طول بستر فرسایش نیز به‌ترتیب ۲۰ سانتی‌متر و ۲ متر ثابت نگه داشته شدند. بنابراین، تغییرات مشاهده‌شده در مشخصات فرسایش عمدتاً به تغییر شرایط هیدرولیکی و هندسه جام نسبت داده شد.

پایدار میل کرد و از زمان ۲۴۰ دقیقه به بعد افزایش عمق فرسایش بسیار محدود بود. بر این اساس، مدت زمان ۲۴۰ دقیقه به‌عنوان زمان استاندارد اجرای آزمایش‌ها انتخاب شد. لازم است گفته شود در این پژوهش منظور از تعادل، شرایط شبه‌تعادلی است زیرا تغییرات اندک عمق فرسایش ممکن است در زمان‌های طولانی‌تر نیز ادامه یابد. پس از پایان زمان آزمایش، جریان قطع و آب موجود در حفره فرسایشی به‌آرامی تخلیه شد تا از تغییر شکل بستر جلوگیری شود. پس از زهکشی کامل، پروفیل فرسایش‌یافته بستر برداشت و داده‌های مربوط به تغییرات توپوگرافی ثبت گردید- در مجموع، آزمایش‌ها برای دو نوع پرتاب‌کننده جامی مثلثی و دایره‌ای در شش دبی مختلف در محدوده ۰/۰۰۲۵ تا ۰/۰۱۲ و متر مکعب بر ثانیه و سه نسبت عمق پایاب ۰/۳۰، ۰/۴۵ و ۰/۶۰ اجرا گردید که در مجموع ۱۰۸ آزمایش مستقل به‌اجرا در آمد. داده‌های برداشت‌شده به نرم‌افزار Excel وارد شد و پس از کنترل براساس موارد لازم، مقادیر عمق فرسایش و فاصله تا محل وقوع حداکثر عمق فرسایش استخراج گردید. مقادیر بی بعد براساس رابطه ۳ محاسبه و تجزیه و تحلیل شدند. شکل (۲) و جدول (۱) مشخصات مدل، شرایط هیدرولیکی و رسوب آزمایش‌ها را نشان می‌دهند.

در مجموعه آزمایش‌های اصلی، هر یک از شرایط آزمایشگاهی به دلیل محدودیت‌های زمانی و آزمایشگاهی تنها یک‌بار با دقت اجرا شد و آزمایش‌های تکراری مستقل برای تمامی حالات در نظر گرفته نشد. بنابراین، امکان ارزیابی مستقیم پراکندگی بین تکرارها و تعیین عدم قطعیت ناشی از تکرارپذیری برای هر یک از شرایط آزمایش فراهم نبود. با این حال، به‌منظور کاهش تغییرپذیری ناشی از عوامل اجرایی، پیش از هر آزمایش، بستر رسوبی مجدداً آماده و تسطیح شد و ضخامت لایه رسوبی، طول بستر فرسایش، مشخصات مصالح بستر و شرایط هندسی مدل مطابق طرح آزمایش کنترل گردید. دبی جریان و عمق پایاب نیز برای هر آزمایش تنظیم و روش اندازه‌گیری مشخصات حفره فرسایشی در تمامی آزمایش‌ها به‌صورت یکسان اعمال شد.

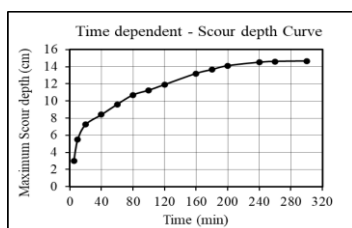
بررسی آزمایشگاهی اثر هندسه جام پرتابی دایره‌ای و مثلثی بر مشخصات آبستگي پایین دست

با این همه باید توجه داشت که در مدل‌های فیزیکی آبستگي، رعایت همزمان تشابه کامل جریان و تشابه رسوبي همواره امکان‌پذیر نیست. از این‌رو، نتایج حاضر در درجه نخست برای مقایسه نسبی عملکرد دو هندسه جام پرتابی در محدوده شرایط آزمایشگاهی تفسیر می‌شوند. تعمیم مستقیم روابط تجربی به نمونه‌های واقعی مستلزم بررسی نسبت مقیاس هندسی، شرایط فرودی و اثرهای مقیاس مربوط به مصالح بستر است.

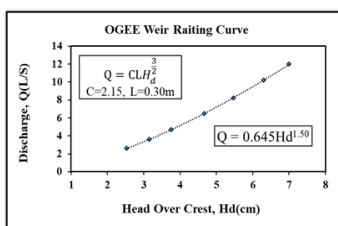


شکل ۲- تجهیزات و کانال آزمایشگاهی و مراحل انجام آزمایش‌ها

Fig. 2- Laboratory flume, experimental equipment, and testing procedure.

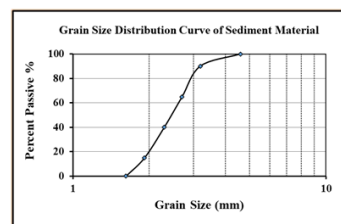


شکل ۵- تغییرات حداکثر عمق فرسایش بر حسب زمان در دبی $0.012 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ مترمکعب بر ثانیه و تعیین زمان شبه تعادلی فرسایش
Fig. 5- Variation of maximum scour depth with time at a discharge of $0.012 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ and determination of the quasi-equilibrium scour time.



شکل ۴- نمودار دبی - عمق برای سرریز اوجی

Fig. 4- Discharge-Head Rating Curve for the Ogee Spillway



شکل ۳- نمودار دانه بندی مواد رسوبي مورد استفاده در آزمایش‌ها

Fig. 3- Grain Size Distribution Curve of the Sediment Material Used in the Experiments

جدول ۱- مشخصات مدل فیزیکی، ابعاد جام‌های پرتابی و شرایط آزمایش

Table 1- Specifications of the physical model, ski-jump buckets dimension, Excremental conditions,

مقدار	پارامتر	گروه پارامتر
OGEE USBR, C=2.15	نوع سرریز	مشخصات سرریز
۰/۳۵ متر	(P) ارتفاع سرریز	
۰/۳۰ متر	(L) عرض سرریز	
(۱، ۱/۵ و ۲) (۰/۱۵، ۰/۱۰ و ۰/۲۰ متر)	(مقیاس هندسی) و (R) شعاع جام	مشخصات جام دایره‌ای
۴۵ درجه	زاویه مرکزی جام	
(۱، ۱/۵ و ۲) (۰/۷۶۶، ۰/۱۱۴۸ و ۰/۱۵۳۱ متر)	(مقیاس هندسی) و (L) طول جام	مشخصات جام مثلثی
۲۲/۵۰ درجه	زاویه جام	
$0.0025 - 0.012 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$	(Q) دبی جریان	شرایط هیدرولیکی
0.025- 0.07 m	(Ha) عمق آب روی سرریز	
0.375- 0.420 m	(H) عمق کل آب پشت سرریز	
0.30, 0.45 and 0.60	(yt/R) نسبت عمق پایاب به شعاع جام	
0.006 – 0.017 m	(yb) عمق آب روی جام پرتابی	
$2.30 - 2.70 \text{ ms}^{-1}$	(vb) سرعت آب روی جام پرتابی	
6 - 13	(Fr) عدد فرود جریان روی جام پرتابی	
0.30, 0.45 and 0.60	(yt/L) نسبت عمق پایاب به طول جام	
ماسه با دانه بندی یکنواخت	جنس رسوبات	مشخصات بستر فرسایش
$d_{50}=2.50, d_{10}=1.81, d_{30}=2.16$ $d_{60}=2.56, d_{16}=1.95, d_{84}=3.18\text{mm}$	دانه بندی مواد رسوبی	
$Cu=1.41, Cc=1.10$ and $\sigma_g = 1.28$	ضرائب خصوصیات فیزیکی مواد رسوبی	
2.65	(Gs) وزن مخصوص نسبی رسوبات	
0.20 m	ضخامت لایه رسوب	
2.0 m	طول بستر فرسایش	
(ds)	توپوگرافی بستر و حداکثر عمق فرسایش	متغیرهای اندازه‌گیری شده
(Ls)	فاصله محل وقوع حداکثر فرسایش	
54 حالت (۶ دبی $\times$ ۳ شعاع $\times$ ۳ نسبت عمق پایاب)	جام دایره‌ای	تعداد حالت‌های آزمایش
54 حالت (۶ دبی $\times$ ۳ طول جام $\times$ ۳ نسبت عمق پایاب)	جام مثلثی	
۱۰۸ آزمایش	مجموع آزمایش‌ها	

تحلیل نتایج

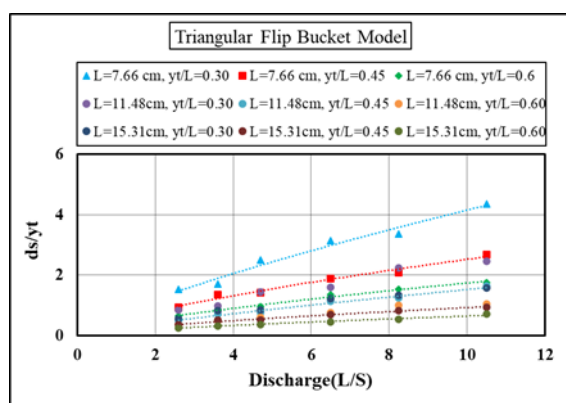
پرتابی را از نظر کنترل شدت فرسایش و تغییر محل تمرکز

آن فراهم کرد.

نمودار تغییرات دبی با حداکثر عمق فرسایش در جام پرتابی دایره‌ای برای شعاع‌های (۰/۱۰، ۰/۱۵ و ۰/۲۰ متر) و سه نسبت عمق پایاب (۰/۳۰، ۰/۴۵ و ۰/۶۰) در شکل (۶) رسم شده است. در این شکل با افزایش دبی، حداکثر عمق فرسایش نسبی (d_s/y_t) در تمامی شرایط افزایش می‌یابد. این افزایش در شعاع‌های کوچک‌تر جام، به‌ویژه شعاع ۰/۱۰ متر، شدیدتر است. با افزایش نسبت y_t/R از ۰/۳۰ به ۰/۶۰ مقدار

به منظور بررسی تأثیر شکل هندسی جام پرتابی بر شرایط فرسایش پایین‌دست، ابتدا نتایج حاصل از آزمایش‌های مدل فیزیکی برای دو نوع جام پرتابی دایره‌ای و مثلثی به صورت نمودار ارزیابی گردید. در این راستا، دو شاخص اصلی شامل حداکثر عمق فرسایش و فاصله محل وقوع حداکثر عمق فرسایش به عنوان مهم‌ترین مشخصه‌های حفره فرسایشی تحلیل شدند. مقایسه مستقیم نتایج آزمایشگاهی امکان ارزیابی عملکرد نسبی هر یک از جام‌های

نسبی (d_s/y_t) در تمامی شرایط جام مثلثی افزایش می‌یابد. کاهش طول جام، به‌ویژه در طول هندسی وتر 0.0766 متر و نسبت بی بعد (y_t/L) برابر 0.30 ، با افزایش شدت فرسایش همراه است. با افزایش نسبت y_t/L از 0.30 به 0.60 ، مقادیر عمق فرسایش کاهش می‌یابد. افزایش طول جام از 0.0766 به 0.1531 متر نیز موجب کاهش قابل توجه حداکثر عمق فرسایش می‌شود. در مجموع، دبی و پارامترهای هندسی جام مثلثی نقش مهمی در کنترل شدت فرسایش پایین‌دست دارند.



شکل ۷- تغییرات دبی و حداکثر عمق فرسایش برای جام مثلثی با طول وتر مختلف

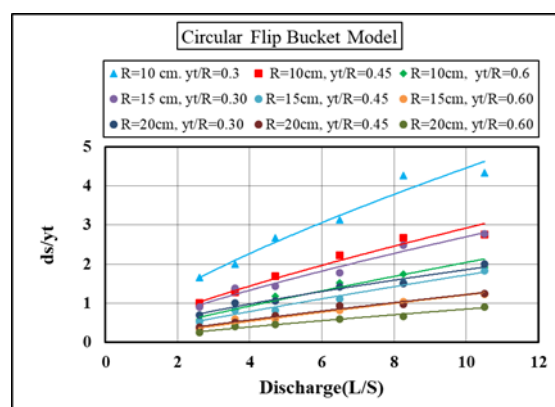
Fig. 7- Variation of maximum scour depth with discharge for triangular flip buckets with different chord lengths.

و y_t/R برابر 0.60 مشاهده شد. در مجموع، دبی و مشخصات هندسی جام دایره‌ای نقش مهمی در تعیین موقعیت تشکیل حداکثر فرسایش در پایین‌دست دارند.

تغییرات دبی با فاصله نسبی محل وقوع حداکثر فرسایش در جام پرتابی مثلثی نسبت به دبی جریان برای سه طول هندسی (0.0766 ، 0.1148 و 0.1531 متر) و سه نسبت عمق پایاب (0.30 ، 0.45 و 0.60) در شکل (۹) رسم شده است که نشان می‌دهد با افزایش دبی جریان، فاصله نسبی محل وقوع حداکثر فرسایش (L_s/y_t) در تمامی شرایط جام مثلثی افزایش می‌یابد. بیشترین مقادیر در حالت طول هندسی وتر 0.0766 متر و y_t/L برابر 0.30 مشاهده می‌شود.

عمق فرسایش کاهش می‌یابد. افزایش شعاع جام از 0.10 به 0.20 متر نیز با کاهش قابل توجه عمق فرسایش همراه است. در مجموع، نتایج بیانگر نقش مؤثر دبی و پارامترهای هندسی جام در کنترل شدت فرسایش پایین‌دست هستند.

تغییرات حداکثر عمق فرسایش در جام پرتابی مثلثی نسبت به دبی جریان برای سه طول هندسی (0.0766 ، 0.1148 و 0.1531 متر) و سه نسبت عمق پایاب (0.30 ، 0.45 و 0.60) در شکل (۷) رسم شده است. در شکل (۷) دیده می‌شود با افزایش دبی جریان، حداکثر عمق فرسایش

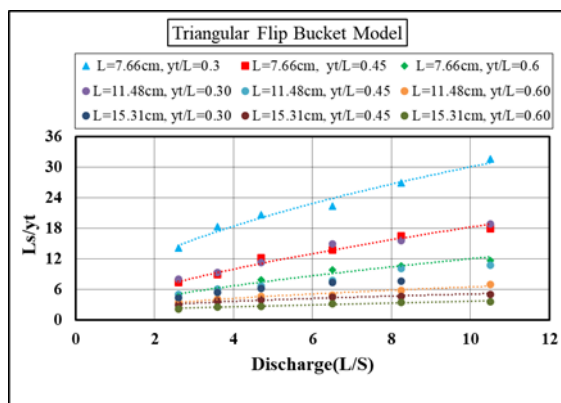


شکل ۶- تغییرات دبی و حداکثر عمق فرسایش برای جام دایره‌ای با شعاع مختلف

Fig. 6- Variation of maximum scour depth with discharge for circular flip buckets of different radii.

نمودار تغییرات دبی با فاصله نسبی محل وقوع حداکثر فرسایش در جام پرتابی دایره‌ای برای شعاع‌های (0.10 ، 0.15 و 0.20 متر) و سه نسبت عمق پایاب (0.30 ، 0.45 و 0.60) در شکل (۸) رسم گردیده است. این شکل نشان می‌دهد با افزایش دبی جریان، فاصله نسبی محل وقوع حداکثر فرسایش (L_s/y_t) در تمامی شرایط افزایش می‌یابد. بیشترین مقادیر در شعاع 0.10 متر و نسبت y_t/R برابر 0.30 مشاهده می‌شود. با افزایش نسبت y_t/R از 0.30 به 0.60 ، فاصله محل وقوع حداکثر فرسایش کاهش می‌یابد. افزایش شعاع جام از 0.10 به 0.20 متر با کاهش مقادیر (L_s/y_t) همراه است. کمترین فاصله نسبی در شرایط شعاع 0.20 متر

مشاهده شد. به‌طور کلی، دبی و ویژگی‌های هندسی جام مثلی نقش مهمی در تعیین موقعیت تشکیل حداکثر فرسایش در پایین دست دارند.

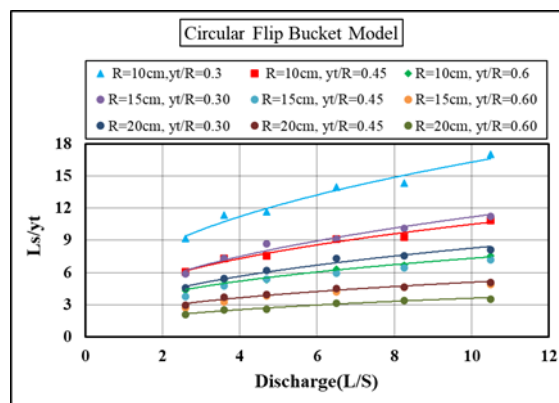


شکل ۹- تغییرات دبی و فاصله حداکثر عمق فرسایش برای جام مثلی با طول وتر مختلف

Fig. 9 - Variation of the distance to the maximum scour depth with discharge for triangular flip buckets with different chord lengths.

نمودار مقایسه‌ای فاصله نسبی محل وقوع حداکثر فرسایش در جام‌های پرتابی دایره‌ای و مثلی در شکل (۱۱) نشان داده شده است. در این نمودار مشخص است با افزایش پارامتر بدون بعد شدت جریان، فاصله نسبی محل وقوع حداکثر فرسایش (L_s/y_t) در هر دو نوع جام افزایش می‌یابد. در مقادیر یکسان شدت جریان، مقادیر (L_s/y_t) برای جام مثلی به‌طور محسوسی بیشتر است تا برای جام دایره‌ای. شیب بیشتر خط روند جام مثلی بیانگر حساسیت بیشتر محل وقوع حداکثر فرسایش به افزایش شدت جریان است. با افزایش شدت جریان، اختلاف بین دو جام افزایش می‌یابد و انتقال محل حداکثر فرسایش به فاصله دورتری از پای سازه در جام مثلی آشکارتر می‌شود. در مجموع، هندسه جام نقش مهمی در تعیین موقعیت حفرة فرسایشی دارد و انتقال محل فرسایش به فاصله بیشتر می‌تواند از نظر مهندسی در کاهش خطر فرسایش در مجاورت سازه مؤثر باشد.

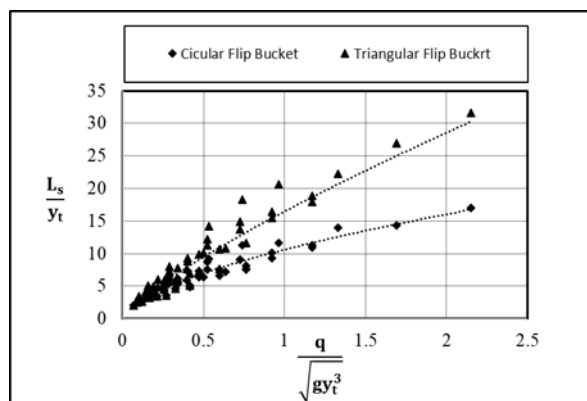
با افزایش نسبت y_t/L از ۰/۳۰ به ۰/۶۰، فاصله محل وقوع حداکثر فرسایش کاهش می‌یابد. با دو برابر شدن طول جام کاهش محسوسی در نسبت (L_s/y_t) به‌وجود می‌آید. کمترین مقادیر در شرایط طول ۰/۱۵۳۱ و نسبت y_t/L برابر ۰/۶۰



شکل ۸- تغییرات دبی و فاصله حداکثر عمق فرسایش برای جام دایره‌ای با شعاع مختلف

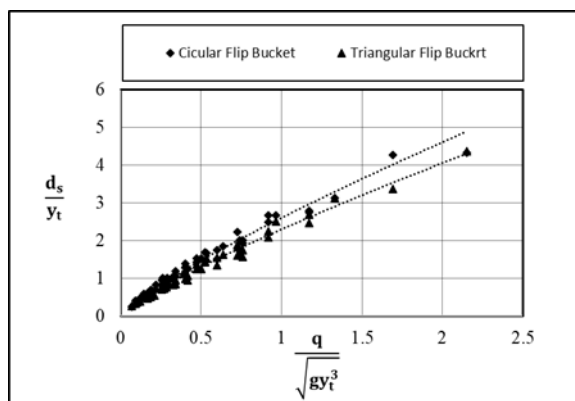
Fig. 8 - Variation of the distance to the maximum scour depth with discharge for circular flip buckets of different radii.

نمودار مقایسه‌ای تغییرات حداکثر عمق فرسایش نسبی در جام‌های پرتابی دایره‌ای و مثلی در شکل (۱۰) نشان داده شده است. از این نمودار مشخص است که با افزایش پارامتر بدون بعد شدت جریان، حداکثر عمق فرسایش نسبی (d_s/y_t) در هر دو نوع جام روندی افزایشی و تقریباً خطی دارد. در مقادیر یکسان شدت جریان، عمق فرسایش نسبی در جام مثلی عموماً کمتر است تا در جام دایره‌ای. شیب کمتر خط روند جام مثلی نیز بیانگر حساسیت کمتر عمق فرسایش نسبت به افزایش شدت جریان است. با افزایش شدت جریان، اختلاف عملکرد دو جام بیشتر و کاهش فرسایش در جام مثلی آشکارتر می‌شود. این نتایج نشان‌دهنده تأثیر معنی‌دار هندسه جام بر پاسخ فرسایشی بستر پایین دست است. با این حال، تبیین دقیق تفاوت عملکرد دو جام از نظر میدان سرعت و انتقال انرژی نیازمند اندازه‌گیری‌های هیدرودینامیکی تکمیلی است.



شکل ۱۱- مقایسه تغییرات پارامترهای بی بعد فاصله تا محل حداکثر عمق فرسایش و دبی در دو جام دایره‌ای و مثلثی

Fig. 11 - Comparison of the variation of the dimensionless distance to the maximum scour depth with discharge for circular and triangular flip buckets.



شکل ۱۰- مقایسه تغییرات پارامترهای بی بعد حداکثر عمق فرسایش و دبی در دو جام دایره‌ای و مثلثی

Fig. 10 - Comparison of the variation of the dimensionless maximum scour depth with discharge for circular and triangular flip buckets.

شامل R و L) و هیدرولیکی $\frac{H_t}{y_t}$ هر جام پرتابی به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند. برای مدل‌سازی رفتار فرسایش از مدل رگرسیون توانی چند متغیره مطابق رابطه کلی ۴ استفاده شد. در جدول (۲) روابط مرتبط با هر جام و نتایج تحلیل آماری ارائه شده است.

$$\frac{d_s}{y_t}, \frac{L_s}{y_t} = a \left(\frac{q}{\sqrt{g y_t^3}} \right)^b \left(\frac{H_t}{y_t} \right)^c \left(\frac{S_h}{y_t} \right)^d \quad (4)$$

مدل‌های رگرسیونی و تحلیل آماری

به منظور ارزیابی تأثیر شکل هندسی جام پرتابی بر مشخصات حفره فرسایشی پایین‌دست، داده‌های آزمایشگاهی مربوط به جام‌های پرتابی دایره‌ای و مثلثی تحلیل شدند. در این پژوهش، پارامتر بی بعد حداکثر عمق فرسایش $\frac{L_s}{y_t}$ و فاصله تا محل وقوع حداکثر عمق فرسایش به عنوان متغیر وابسته و پارامترهای هیدرولیکی و هندسی شامل پارامترهای بی بعد دبی $\frac{q}{\sqrt{g y_t^3}}$ و پارامترهای هندسی

جدول ۲- روابط رگرسیونی و پارامترهای آماری مدل‌های پیشنهادی

Table 2. Regression equations and statistical performance of the proposed models

Flip Bucket	Equation	R ²	RMSE	MAE	MAPE %	NSE	RRMSE (%)
Circular	$\frac{d_s}{y_t} = 2.026 \left(\frac{q}{\sqrt{g y_t^3}} \right)^{0.690} \left(\frac{H_t}{y_t} \right)^{0.185} \left(\frac{R}{y_t} \right)^{-0.131}$	0.949	0.191	0.116	8.93	0.949	7.11
Triangular	$\frac{d_s}{y_t} = 1.703 \left(\frac{q}{\sqrt{g y_t^3}} \right)^{0.745} \left(\frac{H_t}{y_t} \right)^{0.260} \left(\frac{L}{y_t} \right)^{-0.239}$	0.990	0.084	0.062	5.06	0.990	6.76
Circular	$\frac{L_s}{y_t} = 4.963 \left(\frac{q}{\sqrt{g y_t^3}} \right)^{0.404} \left(\frac{H_t}{y_t} \right)^{0.396} \left(\frac{R}{y_t} \right)^{0.072}$	0.994	0.253	0.198	3.12	0.994	3.87
Triangular	$\frac{L_s}{y_t} = 5.784 \left(\frac{q}{\sqrt{g y_t^3}} \right)^{0.524} \left(\frac{H_t}{y_t} \right)^{0.734} \left(\frac{L}{y_t} \right)^{-0.407}$	0.977	0.969	0.714	8.40	0.977	9.32

نتایج رگرسیون توانی چند متغیره مطابق جدول (۲) کنند. مقادیر بالای ضریب تعیین R^2 در تمامی مدل‌ها نشان داد که روابط ارائه‌شده می‌توانند با دقت مناسبی رفتار فرسایش پایین‌دست جام‌های پرتابی را پیش‌بینی کرده‌ای آزمایشگاهی توسط پارامترهای مستقل شامل

انطباق مقادیر برآوردشده با مقادیر مشاهده‌شده و شناسایی احتمالی خطاهای سیستماتیک به‌کار گرفته شدند. اعتبارسنجی مستقل مدل‌ها با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی جدید یا مجموعه داده جداگانه می‌تواند در مطالعات آینده در نظر گرفته شود.

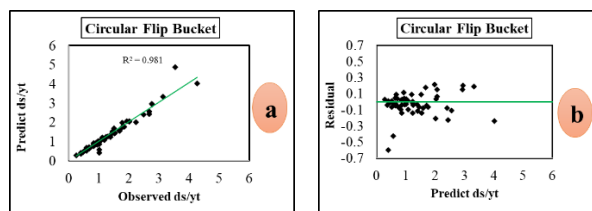
تحلیل نمودارهای یک به یک^۱ و باقیمانده^۲

نمودارهای یک‌به‌یک مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده مطابق شکل‌های (۱۲ تا ۱۵) نشان می‌دهند که اغلب داده‌ها در مجاورت خط برابری قرار گرفته‌اند. نزدیکی نقاط به خط ۱:۱ و نبود پراکندگی قابل توجه بیانگر عملکرد مناسب مدل‌های توانی در پیش‌بینی حداکثر عمق فرسایش است. علاوه بر این، بررسی نمودارهای باقیمانده‌ها نشان داد که خطاها به صورت تصادفی حول محور صفر توزیع شده‌اند و روند سیستماتیک خاصی مشاهده نمی‌شود؛ بنابراین، فرض همسانی واریانس‌ها و کفایت مدل برقرار است. مطابق این شکل‌ها، نمودارهای باقیمانده برای تمامی مدل‌ها نشان می‌دهد خطاهای پیش‌بینی به صورت تصادفی در اطراف خط صفر پراکنده شده‌اند و الگوی مشخصی از افزایش یا کاهش باقیمانده‌ها مشاهده نمی‌شود. این رفتار نشان‌دهنده نبود خطای سیستماتیک در مدل و مناسب بودن ساختار رگرسیون توانی انتخاب‌شده است. پراکندگی محدود باقیمانده‌ها و مشاهده‌نشدن روند کیفی شکل نشان می‌دهد که واریانس خطاها تقریباً ثابت است و مدل‌ها از نظر آماری و در محدوده داده‌های آزمایشگاهی پایداری مناسبی دارند.

دبی و مشخصات هندسی جام توضیح داده می‌شود. در تمامی مدل‌ها، دبی جریان مهم‌ترین پارامتر هیدرولیکی دارای اثر افزایشی بر توسعه حفره فرسایشی است به‌گونه‌ای که با افزایش دبی، انرژی و مومنوم جت خروجی افزایش می‌یابد و باعث افزایش حداکثر عمق فرسایش و همچنین انتقال محل وقوع حداکثر فرسایش به فاصله بیشتری از پای جام می‌شود. از طرف دیگر، پارامترهای هندسی جام‌ها در کنترل نحوه توزیع انرژی جت و کاهش تمرکز تنش‌های برشی بر بستر نقش مهمی دارند. مقایسه عملکرد مدل‌ها نشان می‌دهد مدل‌های مرتبط با جام پرتابی مثلثی دقت بسیار مناسبی دارند و به‌ویژه مدل پیش‌بینی فاصله محل وقوع حداکثر فرسایش با مقدار $R^2=0.977$ و $MAPE=8/40\%$ توانسته است رفتار آزمایشگاهی را با خطای کمی بازسازی کند. شاخص‌های آماری نیز دقت بالای مدل‌ها را تأیید می‌کنند. مقادیر پایین $RMSE$ و MAE و مقادیر بالای NSE نشان می‌دهند روابط پیشنهادی توانایی مناسبی در بازتولید رفتار واقعی فرسایش دارند. یادآوری می‌شود شاخص‌های آماری ارائه‌شده در این پژوهش برای ارزیابی عملکرد روابط رگرسیونی در محدوده داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده در توسعه مدل محاسبه شده‌اند. از این‌رو مقادیر R^2 ، NSE ، $RMSE$ و MAE بیانگر میزان برازش و کفایت مدل‌ها در بازسازی داده‌های مورد مطالعه است و به‌عنوان اعتبارسنجی مستقل برون‌نمونه‌ای تفسیر نمی‌شوند. نمودارهای یک‌به‌یک و باقیمانده‌ها برای بررسی میزان

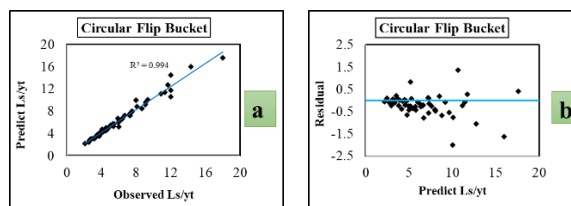
² Residuals vs Predicted (Residuals plot)

¹ Observed vs Predicted (one-to-one plot)



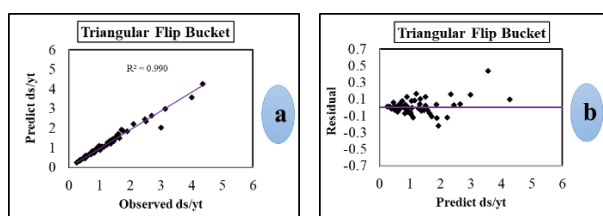
شکل ۱۳- ارزیابی عملکرد مدل رگرسیونی پارامتر بدون بعد حداکثر عمق فرسایش برای جام‌های پرتابی دایره‌ای: (الف) نمودار یک‌به‌یک و (ب) نمودار باقیمانده

Fig. 13 - Evaluation of the regression model for the dimensionless maximum scour depth of circular flip buckets: (a) one-to-one plot and (b) residual plot.



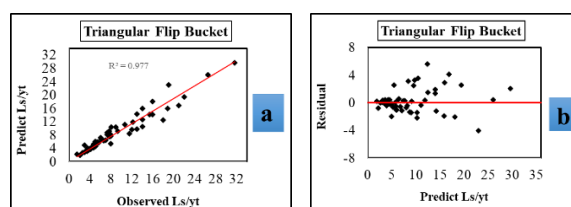
شکل ۱۲- ارزیابی عملکرد مدل رگرسیونی پارامتر بدون بعد فاصله تا محل وقوع حداکثر عمق فرسایش برای جام‌های پرتابی دایره‌ای: (الف) نمودار یک‌به‌یک و (ب) نمودار باقیمانده

Fig. 12 - Evaluation of the regression model for the dimensionless distance to the maximum scour depth of circular flip buckets: (a) one-to-one plot and (b) residual plot



شکل ۱۵- اعتبارسنجی مدل رگرسیونی پارامتر بدون بعد حداکثر عمق فرسایش برای جام‌های پرتابی مثلثی: (الف) نمودار یک‌به‌یک و (ب) نمودار باقیمانده

Fig. 15 - Evaluation of the regression model for the dimensionless of the maximum scour depth of triangular flip buckets: (a) one-to-one plot and (b) residual plot



شکل ۱۴- ارزیابی عملکرد مدل رگرسیونی پارامتر بدون بعد فاصله تا محل وقوع حداکثر عمق فرسایش برای جام‌های پرتابی مثلثی: (الف) نمودار یک‌به‌یک و (ب) نمودار باقیمانده

Fig. 14 - Evaluation of the regression model for the dimensionless distance to the maximum scour depth of triangular flip buckets: (a) one-to-one plot and (b) residual plot

در مجموع سوگیری سیستماتیک معنی‌داری در برآورد مقادیر آزمایشگاهی ندارند. نتایج آزمون Breusch-Pagan نیز برای تمامی مدل‌ها در سطح معنی‌داری ۵ درصد غیرمعنی‌دار بود که بیانگر نبود شواهد آماری کافی برای وجود ناهمسانی واریانس در باقیمانده‌ها است. بررسی نمودارهای باقیمانده نیز نشان داد که خطاها عمدتاً در اطراف محور صفر پراکنده‌اند و روند صعودی، نزولی یا الگوی منظم مشخصی نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده مشاهده نمی‌شود. بنابراین، نتایج گرافیکی با یافته‌های آزمون‌های آماری همخوانی دارند و کیفیت نسبی روابط پیشنهادی را در محدوده داده‌های آزمایشگاهی مورد مطالعه تأیید می‌کنند. با این حال، نتایج آزمون Shapiro-Wilk - نشان داد که باقیمانده‌های مدل پیش‌بینی حداکثر

تحلیل آماری باقیمانده‌های مدل‌های رگرسیونی

به‌منظور ارزیابی دقیق‌تر کیفیت مدل‌های رگرسیونی پیشنهادی، علاوه بر شاخص‌های آماری و نمودارهای یک‌به‌یک، رفتار باقیمانده‌ها نیز به‌صورت گرافیکی و آماری بررسی شد. در این راستا، میانگین باقیمانده‌ها، آزمون معنی‌داری میانگین خطا نسبت به صفر، آزمون Shapiro-Wilk برای بررسی نرمال بودن باقیمانده‌ها و آزمون Breusch-Pagan برای ارزیابی همسانی واریانس استفاده شدند. نتایج در جدول (۳) نشان داد که میانگین باقیمانده‌ها در هر چهار مدل مربوط به پیش‌بینی حداکثر عمق فرسایش و فاصله محل وقوع آن برای جام‌های دایره‌ای و مثلثی، تفاوت معنی‌داری با صفر ندارد (p>0/05). این موضوع نشان می‌دهد مدل‌های پیشنهادی

عمق فرسایش برای جام دایره‌ای از توزیع نرمال فاصله دارند ($p < 0/001$)، در حالی که برای سایر مدل‌ها شواهد آماری کافی برای رد نرمال بودن باقیمانده‌ها مشاهده نشد. از این‌رو، نتایج ارزیابی مدل‌ها صرفاً بر مبنای فرض نرمال بودن خطاها تفسیر نشد و مجموعه‌ای از شاخص‌های عملکرد، آزمون‌های آماری و بررسی‌های گرافیکی برای ارزیابی جامع مدل‌ها به کار گرفته شد.

جدول ۳ - نتایج آزمون‌های آماری باقیمانده‌های مدل‌های رگرسیونی پیشنهادی
Table 3. Results of statistical tests for the residuals of the proposed regression models

نوع جام پرتابی	متغیر وابسته	میانگین باقیمانده	آزمون میانگین صفر pp-value	آزمون pp-value Shapiro-Wilk	آزمون pp-value Breusch-Pagan	نتیجه
دایره‌ای	حداکثر عمق فرسایش (ds)	0.0088	0.738	<0.001	0.078	نبود سوگیری معنی‌دار و ناهمسانی واریانس؛ تأیید نشدن نرمال بودن
دایره‌ای	فاصله محل حداکثر فرسایش (Ls)	0.0045	0.898	0.763	0.094	نبود سوگیری معنی‌دار و ناهمسانی واریانس؛ نرمال بودن رد نشد
مثلثی	حداکثر عمق فرسایش (ds)	0.0024	0.835	0.479	0.800	نبود سوگیری معنی‌دار و ناهمسانی واریانس؛ نرمال بودن رد نشد
مثلثی	فاصله محل حداکثر فرسایش (Ls)	0.1068	0.423	0.112	0.598	نبود سوگیری معنی‌دار و ناهمسانی واریانس؛ نرمال بودن رد نشد

* یادداشت: آزمون میانگین صفر برای بررسی وجود سوگیری سیستماتیک در باقیمانده‌ها اجرا گردید. آزمون Shapiro-Wilk برای بررسی نرمال بودن باقیمانده‌ها و آزمون Breusch-Pagan برای بررسی همسانی واریانس به کار رفت. مقدار $p > 0/05$ بیانگر نبود شواهد آماری کافی برای رد شدن فرض صفر در سطح معنی‌داری ۵ درصد است.

بنابراین، نتایج جدول (۳) نشان می‌دهد که میانگین باقیمانده‌ها در هیچ‌یک از چهار مدل اختلاف معنی‌داری ($p > 0/05$) با صفر ندارد که بیانگر نبود سوگیری سیستماتیک معنی‌دار در برآوردهاست. آزمون Breusch-Pagan نیز برای تمامی مدل‌ها غیرمعنی‌دار بود و بنابراین شواهد آماری کافی برای وجود ناهمسانی واریانس مشاهده نشد. با این حال، آزمون Shapiro-Wilk برای مدل پیش‌بینی حداکثر عمق فرسایش در جام دایره‌ای ($p < 0/001$) نرمال نبودن باقیمانده‌ها را نشان داد، در حالی که در سه مدل دیگر فرض نرمال بودن رد نشد.

مقایسه آماری عملکرد جام‌های پرتابی دایره‌ای و مثلثی

به منظور بررسی معنی‌داری آماری تفاوت عملکرد جام‌های پرتابی دایره‌ای و مثلثی، مقادیر حداکثر عمق

فرسایش (ds) و فاصله محل وقوع حداکثر فرسایش (Ls) در شرایط آزمایش متناظر مقایسه شدند. از آنجا که مقایسه دو هندسه بر اساس شرایط هیدرولیکی متناظر بوده است، آزمون t زوجی در سطح معنی‌داری ۵ درصد برای بررسی اختلاف میانگین‌ها به کار گرفته شد. علاوه بر این، آزمون ناپارامتری Wilcoxon نیز به عنوان ارزیابی تکمیلی صورت گرفت.

جدول (۴) نشان می‌دهد میانگین حداکثر نسبت بی بعد عمق فرسایش برای جام دایره‌ای برابر با ۱/۳۹۹ و برای جام مثلثی برابر با ۱/۲۳۷ است. بنابراین، استفاده از جام مثلثی در شرایط مورد بررسی موجب کاهش متوسط ۱۱/۵۵ درصد در حداکثر عمق فرسایش شده است. نتایج آزمون t زوجی ($t = 5/235$, $p < 0/001$) و آزمون Wilcoxon ($p < 0/001$) نشان می‌دهد اختلاف مشاهده شده بین دو

هندسه از نظر آماری معنی‌دار است. این نتیجه بیانگر آن است که کاهش عمق فرسایش در جام مثلثی صرفاً ناشی از پراکندگی تصادفی داده‌ها نیست و می‌تواند به تفاوت در هندسه و نحوه توزیع انرژی جریان نسبت داده شود. از سوی دیگر، میانگین نسبت بی بعد فاصله محل وقوع حداکثر فرسایش در جام دایره‌ای برابر با $6/556$ و در جام مثلثی برابر با $9/208$ به دست آمد. به عبارت دیگر، محل وقوع حداکثر فرسایش در جام مثلثی به‌طور متوسط $40/46\%$ درصد دورتر از محل خروج جریان قرار گرفته است. نتایج آزمون t زوجی ($t=-5/794$, $p<0/001$) و آزمون Wilcoxon ($p<0/001$) نیز معنی‌دار بودن این اختلاف را در سطح 5% درصد تأیید کرد.

جدول ۴ - مقایسه آماری مشخصات فرسایش بین جام‌های پرتابی دایره‌ای و مثلثی
Table 4- Statistical comparison of scour characteristics between circular and triangular ski-jump buckets

نتیجه	آزمون Wilcoxon	PP-value	t آزمون زوجی	درصد تغییر	جام مثلثی	جام دایره‌ای	مشخصه
تفاوت معنی‌دار	<0.001	<0.001	5.235	11.55% کاهش	1.237	1.399	حداکثر عمق فرسایش، d_s
تفاوت معنی‌دار	<0.001	<0.001	-5.794	40.46% افزایش	9.208	6.556	فاصله محل حداکثر فرسایش، L_s

* یادداشت: در آزمون‌ها سطح معناداری 5% درصد در نظر گرفته شد.

در مجموع، نتایج مقایسه آماری نشان می‌دهد که هندسه جام پرتابی تأثیر معنی‌داری بر هر دو مشخصه اصلی حفره فرسایشی دارد. جام مثلثی در محدوده شرایط آزمایشگاهی مورد بررسی، ضمن کاهش معنی‌دار حداکثر عمق فرسایش، موجب انتقال محل وقوع حداکثر فرسایش به فاصله‌ای بیشتر از سازه شد. این ویژگی می‌تواند از دیدگاه کاهش تمرکز فرسایش در نزدیکی پای سازه و توزیع مناسب‌تر انرژی جریان اهمیت داشته باشد. یادآوری می‌شود، در پژوهش حاضر متغیرهای هیدرودینامیکی مانند سرعت خروجی جت، انرژی باقیمانده، توزیع فشار و تنش برشی بستر به‌طور مستقیم اندازه‌گیری نشدند. بنابراین، نتایج مربوط به تفاوت عملکرد دو جام صرفاً بر اساس پاسخ اندازه‌گیری شده بستر، شامل حداکثر عمق فرسایش و فاصله محل وقوع آن، تفسیر می‌شوند. هرگونه ارتباط میان هندسه جام و نحوه انتشار یا تمرکز جت باید به‌عنوان تبیین فیزیکی

مقایسه رابطه پیشنهادی با روابط مطالعات پیشین به‌منظور ارزیابی قابلیت کاربرد روابط تجربی موجود، نتایج حداکثر عمق فرسایش حاصل از آزمایش‌های جام پرتابی دایره‌ای با پیش‌بینی پنج رابطه منتخب مطابق جدول (۵) انتخاب شد و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی مقادیر حداکثر عمق فرسایش از هر یک از این روابط محاسبه و از لحاظ تحلیل آماری مقایسه گردید. از آنجا که عمق فرسایش در آزمایش‌های حاضر نسبت به سطح اولیه بستر اندازه‌گیری شده است، در حالی که متغیر عمق در روابط منتخب عمدتاً نسبت به سطح آب پایاب تعریف می‌شود، مقدار عمق مشاهده شده برای مقایسه به‌صورت $D_s = y_t + d_s$ محاسبه شد.

جدول ۵- روابط تجربی منتخب در پیش‌بینی حداکثر عمق فرسایش پایین‌دست جام پرتابی دایره‌ای

Table 5- Selected Empirical Equations for Predicting the Maximum Scour Depth Downstream of a Circular Ski-Jump Bucket

ردیف	محقق و سال	روابط منتخب	ملاحظات
۱	(Veronese, 1937)	$D_s = 1.90q^{0.54}H_1^{0.225}$	رابطه کلاسیک و پرکاربرد
۲	(Wu, 1973)	$\frac{D_s}{H_1} = 2.11 \left(\frac{q}{\sqrt{gH_1^3}} \right)^{0.51}$	توسعه یافته برای شرایط جام پرتابی
۳	(Martins, 1975)	$D_s = 1.50q^{0.60}H_1^{0.10}$	رابطه کلاسیک با ساختار متفاوت
۴	(INCYTH LHA, 1981)	$D_s = 1.413q^{0.50}H_1^{0.25}$	عملکرد مناسب در مطالعات مقایسه‌ای
۵	(Azmathullah et al., 2006)	$\frac{d_s}{y_t} = 6.914 \left(\frac{q}{\sqrt{gy_t^3}} \right)^{0.694} \left(\frac{H_t}{y_t} \right)^{0.0815} \left(\frac{R}{y_t} \right)^{-0.233} \left(\frac{d_{50}}{y_t} \right)^{0.196} \phi^{0.196}$	توسعه یافته برای شرایط جام پرتابی

تحلیل و مقایسه نتایج حاصل از روابط تجربی منتخب و همچنین رابطه پیشنهادی تحقیق حاضر در شکل (۱۶) و جدول (۶) ارائه شده است. جدول (۶) نشان می‌دهد که رابطه پیشنهادی پژوهش حاضر در مقایسه با تمامی رابطه‌های مورد بررسی دقت بالاتری دارد. این رابطه با مقادیر $RMSE=0/0104$ ، $NSE=0/844$ ، $R^2=0/856$ ، $MAE=0/0067$ متر و $MAPE=10/03\%$ ، بهترین عملکرد را در پیش‌بینی حداکثر عمق فرسایش نشان داد. مقدار Bias برابر با $0/0003$ متر بیانگر نبود گرایش سیستماتیک قابل توجه در پیش‌بینی مقادیر آزمایشگاهی است. در میان روابط موجود، رابطه ورونزه (Veronese 1937) با مقدار $RMSE=0/0325$ متر و $MAPE=34/71\%$ عملکرد بهتری نسبت به دیگر روابط بررسی شده داشت، اما دقت آن همچنان به‌طور محسوسی کمتر از رابطه پیشنهادی پژوهش حاضر

است. مقایسه نتایج نشان داد که رابطه پیشنهادی توانسته است $RMSE$ و MAE را به ترتیب حدود ۶۸ و ۷۶ درصد نسبت به بهترین رابطه موجود کاهش دهد. برخی رابطه‌های موجود دارای مقادیر بالای ضریب همبستگی هستند، اما مقادیر منفی NSE و خطاهای نسبتاً زیاد آنها نشان می‌دهد همبستگی بالا به تنهایی نمی‌تواند بیانگر دقت مناسب پیش‌بینی باشد. به‌طور کلی، نتایج تحقیق نشان می‌دهد رابطه پیشنهادی پژوهش حاضر، در محدوده شرایط هیدرولیکی و هندسی آزمایش‌ها توانایی بالاتری در پیش‌بینی حداکثر عمق فرسایش پایین‌دست جام پرتابی دایره‌ای دارد. با این حال، از آنجا که رابطه پیشنهادی بر اساس داده‌های همین مجموعه آزمایشگاهی توسعه یافته است، ارزیابی آن با داده‌های مستقل برای بررسی تعمیم‌پذیری در شرایط مختلف توصیه می‌شود.

جدول ۶- مقایسه عملکرد رابطه‌های تجربی منتخب و رابطه پیشنهادی پژوهش حاضر در پیش‌بینی حداکثر عمق فرسایش پایین‌دست جام پرتابی دایره‌ای

Table 6- Comparison of the Performance of Selected Empirical Equations and the Proposed Equation of the Present Study in Predicting the Maximum Scour Depth Downstream of a Circular Ski-Jump Bucket

رتبه	Bias (m)	MAPE (%)	MAE (m)	RMSE (m)	NSE	R ²	نام محقق و سال
1	+0.0003	10.03	0.0067	0.0104	0.844	0.856	Present Study (1405)
2	+0.0193	34.71	0.0275	0.0325	-0.530	0.859	Veronese(1937)
3	+0.0280	37.87	0.0286	0.0340	-0.670	0.789	Azamathulla et al.(2006)
4	+0.0346	49.76	0.0346	0.0354	-0.808	0.927	Wu(1973)
5	+0.0439	59.99	0.0439	0.0454	-1.985	0.916	Martins(1975)
6	+0.0594	83.08	0.0594	0.0603	-4.251	0.928	INCYTH(1982)

به منظور ارزیابی فاصله محل وقوع حداکثر عمق فرسایش (L_s) فقط با رابطه ارائه شده در زیر اجرا گردید که برای جام پرتابی دایره‌ای پیشنهاد شده بود. با توجه به محدودیت وجود رابطه‌های تجربی، مقایسه و تحلیل

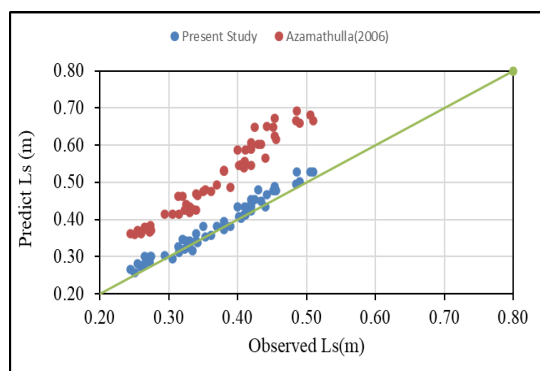
$$\frac{L_s}{y_t} = 9.85 \left(\frac{q}{\sqrt{g y_t^3}} \right)^{0.42} \left(\frac{H_t}{y_t} \right)^{0.28} \left(\frac{R}{y_t} \right)^{0.043} \left(\frac{d_{50}}{y_t} \right)^{0.037} \phi^{0.34661} \quad (\text{Azmathullah et al., 2006})$$

عملکرد رابطه پیشنهادی پژوهش حاضر در پیش‌بینی فاصله محل وقوع حداکثر فرسایش، با نتایج رابطه ارائه‌شده توسط (Azmathullah et al., 2006) مقایسه شد. نتایج این مقایسه در جدول (۷) و شکل (۱۷) نشان می‌دهد رابطه پیشنهادی پژوهش حاضر در پیش‌بینی L_s دقت بالاتری دارد. این رابطه با مقادیر $R^2=0/964$ ، $NSE=0/923$ ، $RMSE=0/0201$ متر، $MAE=0/0165$ متر و $MAPE=4/55\%$ تطابق بسیار مناسبی با داده‌های آزمایشگاهی نشان داده است. در مقابل، رابطه (Azmathullah et al., 2006) اگرچه ضریب تعیین نسبتاً بالای

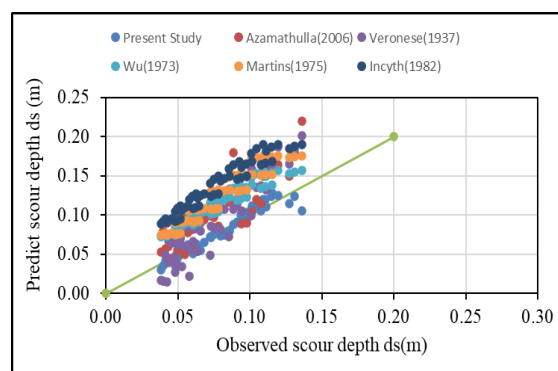
عملکرد رابطه پیشنهادی پژوهش حاضر در پیش‌بینی فاصله محل وقوع حداکثر فرسایش، با نتایج رابطه ارائه‌شده توسط (Azmathullah et al., 2006) مقایسه شد. نتایج این مقایسه در جدول (۷) و شکل (۱۷) نشان می‌دهد رابطه پیشنهادی پژوهش حاضر در پیش‌بینی L_s دقت بالاتری دارد. این رابطه با مقادیر $R^2=0/964$ ، $NSE=0/923$ ، $RMSE=0/0201$ متر، $MAE=0/0165$ متر و $MAPE=4/55\%$ تطابق بسیار مناسبی با داده‌های آزمایشگاهی نشان داده است. در مقابل، رابطه (Azmathullah et al., 2006) اگرچه ضریب تعیین نسبتاً بالای

جدول ۷- مقایسه عملکرد رابطه موجود و رابطه پیشنهادی پژوهش حاضر در پیش‌بینی فاصله محل وقوع حداکثر فرسایش پایین‌دست جام پرتابی دایره‌ای

رتبه	Bias (m)	MAPE (%)	MAE (m)	RMSE (m)	NSE	R^2	نام محقق و سال
1	+0.0138	4.55	0.0165	0.0201	0.923	0.964	Present Study (1405)
2	+0.1402	37.72	0.1402	0.1447	-3.003	0.946	Azmathulla et al. (2006)



شکل ۱۷- مقایسه مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده فاصله تا محل وقوع حداکثر عمق فرسایش توسط رابطه پیشنهادی پژوهش حاضر و رابطه تجربی منتخب برای جام پرتابی دایره‌ای
Fig. 17- Comparison of observed and predicted distances to the location of maximum scour depth using the proposed equation of the present study and a selected empirical equation for a circular ski-jump bucket.



شکل ۱۶- مقایسه مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده حداکثر عمق فرسایش توسط رابطه پیشنهادی پژوهش حاضر و پنج رابطه تجربی منتخب برای جام پرتابی دایره‌ای
Fig. 16- Observed-predicted comparison of maximum scour depth for the proposed equation of the present study and five selected empirical equations for a circular ski-jump bucket.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر هندسه جام‌های پرتابی دایره‌ای و مثلی بر مشخصات آبشستگی موضعی پایین‌دست با استفاده از مدل فیزیکی بررسی شد. آزمایش‌ها تحت شرایط مختلف دبی، ابعاد هندسی جام و عمق پایاب اجرا و دو مشخصه اصلی حفره فرسایشی شامل حداکثر عمق فرسایش (d_s) و فاصله محل وقوع حداکثر عمق فرسایش (L_s) اندازه‌گیری و تحلیل شدند. به‌منظور پیش‌بینی این پارامترها، رابطه‌های رگرسیونی توانی مبتنی بر متغیرهای بی‌بعد توسعه یافت و عملکرد آنها با استفاده از شاخص‌های آماری و تحلیل باقیمانده‌ها ارزیابی شد. مهم‌ترین نتایج پژوهش به شرح زیر است:

۱. افزایش دبی جریان موجب افزایش مشخصات فرسایشی در هر دو نوع جام می‌شود. با افزایش دبی، حداکثر عمق فرسایش و فاصله محل وقوع حداکثر فرسایش در هر دو جام دایره‌ای و مثلی افزایش می‌یابد. این موضوع نشان‌دهنده حساسیت قابل توجه توسعه حفره فرسایشی به شرایط هیدرولیکی جریان است.

۲. هندسه جام پرتابی تأثیر معنی‌داری بر پاسخ فرسایشی پایین‌دست دارد. مقایسه نتایج نشان داد که مقادیر حداکثر عمق فرسایش و محل وقوع آن در دو هندسه مورد بررسی متفاوت است. بر اساس داده‌های آزمایشگاهی، جام مثلی در محدوده شرایط مورد مطالعه، به‌طور متوسط موجب کاهش حدود ۱۱ درصد در حداکثر عمق فرسایش نسبت به جام دایره‌ای می‌شود.

۳. محل وقوع حداکثر فرسایش در جام مثلی در فاصله بیشتری از سازه قرار دارد. نتایج تحقیق نشان داد فاصله محل وقوع حداکثر عمق فرسایش در جام مثلی به‌طور متوسط حدود ۴۰ درصد بیشتر است تا در جام دایره‌ای. انتقال محل وقوع حداکثر فرسایش به فاصله بیشتر می‌تواند از دیدگاه کاهش تمرکز فرسایش در نزدیکی سازه اهمیت مهندسی داشته باشد.

۴. تفاوت عملکرد دو جام از نظر آماری معنی‌دار است. نتایج آزمون‌های آماری برای مقایسه داده‌های متناظر نشان داد که اختلاف بین دو هندسه در هر دو متغیر حداکثر عمق فرسایش و فاصله محل وقوع آن در سطح ۵ درصد معنی‌دار است. بنابراین، تفاوت مشاهده‌شده در پاسخ فرسایشی دو جام صرفاً ناشی از پراکندگی تصادفی داده‌ها نیست و با تفاوت هندسه جام‌ها مرتبط است.

۵. مدل‌های رگرسیونی توانی ارائه‌شده قابلیت مناسبی برای پیش‌بینی مشخصات فرسایش دارند. روابط پیشنهادی با استفاده از پارامترهای هیدرولیکی و هندسی مؤثر توسعه یافتند و ارزیابی آنها با شاخص‌هایی مانند R^2 ، RMSE، NSE و MAPE نشان داد که مدل‌ها در محدوده داده‌های آزمایشگاهی دقت قابل قبولی دارند.

۶. تحلیل نمودارهای یک‌به‌یک و باقیمانده‌ها، کفایت کلی مدل‌ها را تأیید می‌کند. پراکندگی مناسب داده‌ها در اطراف خط یک‌به‌یک و نبود روند مشخص در نمودارهای باقیمانده نشان داد که مدل‌های پیشنهادی خطای سیستماتیک قابل توجهی ندارند. با این حال، نتایج آزمون نرمال بودن باقیمانده‌ها نشان داد که این فرض برای همه مدل‌ها به یک اندازه برقرار نیست؛ بنابراین، عملکرد مدل‌ها بر پایه مجموعه‌ای از شاخص‌های آماری و بررسی‌های گرافیکی ارزیابی شد.

۷. نتایج پژوهش حاضر مستقیماً بیانگر تفاوت پاسخ فرسایشی دو هندسه هستند. در این مطالعه، متغیرهایی مانند میدان سرعت جت، انرژی باقیمانده جریان، توزیع فشار و تنش برشی بستر به‌طور مستقیم اندازه‌گیری نشدند. از این‌رو، تفاوت مشاهده‌شده در عمق و موقعیت فرسایش به‌عنوان نتیجه مستقیم آزمایش‌ها گزارش می‌شود، در حالی که ارتباط این تفاوت‌ها با نحوه انتشار جت یا انتقال انرژی، صرفاً می‌تواند به‌عنوان تبیین فیزیکی محتمل مطرح شود و نیازمند بررسی‌های تکمیلی است.

۸. روابط ارائه‌شده بر پایه داده‌های مدل فیزیکی در محدوده ابعاد، دبی‌ها، شرایط فرودی و مشخصات رسوبات مورد مطالعه توسعه یافته‌اند؛ بنابراین، استفاده از آنها در مقیاس واقعی باید با توجه به معیارهای تشابه هیدرولیکی و احتمال بروز اثرهای مقیاس رسوبی باشد. در مجموع، نتایج این پژوهش نشان داد که هندسه جام پرتابی یکی از عوامل مؤثر بر مشخصات آبستکی پایین‌دست است و تغییر شکل جام از دایره‌ای به مثلثی، در محدوده شرایط آزمایشگاهی بررسی‌شده، موجب کاهش حداکثر عمق فرسایش و انتقال محل وقوع آن به فاصله‌ای بیشتر از سازه شده است. از این رو، جام مثلثی در شرایط مورد بررسی از نظر کنترل عمق فرسایش عملکرد مناسب‌تری نسبت به جام دایره‌ای نشان داده است. با این حال، نتایج حاضر باید در محدوده شرایط هندسی، هیدرولیکی و رسوبی آزمایش‌شده تفسیر شوند. اجرانشدن آزمایش‌های تکراری برای تمامی شرایط و اندازه‌گیری‌نشدن مستقیم مشخصات هیدرودینامیکی جت از محدودیت‌های پژوهش حاضر است. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده آزمایش‌های تکراری برای شرایط منتخب در نظر گرفته شود و هم‌زمان با اندازه‌گیری مشخصات حفره فرسایشی، میدان سرعت، انرژی جریان و توزیع تنش‌های وارد بر بستر نیز بررسی شود تا سازوکارهای مؤثر بر تفاوت عملکرد هندسه‌های مختلف جام با دقت بیشتری تبیین گردد.

منابع

- Akbari, gh., kavianpoor, E. M., & Soltani, S. E. (2014). Laboratory investigation of scouring downstream of a flip bucket. *Water Resources Engineering*, 7(20), 51–64.
- Amanian, N., & Urroz, G. E. (1993). Design of pre-excavated scour hole below flip bucket spillways. *Proceedings - National Conference on Hydraulic Engineering*, (pt 1).
- Azamathulla, H. M., Ab Ghani, A., & Azazi Zakaria, N. (2010). Prediction of scour below flip bucket using soft computing techniques. *AIP Conference Proceedings*, 1233(PART 1).
<https://doi.org/10.1063/1.3452146>
- Azamathullah, H. M., Deo, M. C., Bhajantri, M. R., & Deolalikar, P. B. (2004). Scour at the base of flip-bucket spillways. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 10(2).
<https://doi.org/10.1080/09715010.2004.10514759>
- Azamathullah, H. M., Deo, M. C., & Deolalikar, P. B. (2006). Estimation of scour below spillways using neural networks. *Journal of Hydraulic Research*, 44(1).
<https://doi.org/10.1080/00221686.2006.9521661>

تضاد منافع نویسندگان

در بخش نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچگونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند

منابع مالی

نویسندگان هیچگونه حمایت مالی برای تحقیق، تالیف و انتشار این مقاله دریافت نکرده‌اند

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است. مجموعه‌های تولید شده و یا تحلیل شده در طول مطالعه حاضر، در صورت درخواست معقول، از نویسنده مسئول در دسترس هستند

مشارکت نویسندگان

س.م.ز: جمع‌آوری داده‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک، ترسیم اشکال، نمودارها؛ س.ن: روش‌شناسی تحقیق، تحلیل ریاضی و آماری، و راهنمایی و نظارت، نگارش ویراستاری مقاله.

تقدیر و تشکر نویسندگان

از سردبیر، داوران و ویراستار محترم به خاطر نظرات و بازخوردهای ارزشمندشان که به طور قابل توجهی کیفیت مقاله را بهبود بخشیده است صمیمانه سپاسگزارند.

- Bormann N. E., & Julien P. Y. (1991). Scour Downstream of Grade-Control Structures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(5), 579–594.
- Chanson, H. (2015). Energy dissipation in hydraulic structures. In *Energy Dissipation in Hydraulic Structures*. <https://doi.org/10.1201/b18441>
- Chee, S. P., & Kung, T. (1971). STABLE PROFILES OF PLUNGE BASINS. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 7(2). <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1971.tb05912.x>
- Diaz, Y., Phillips, M. A., & Crookston, B. M. (2024). Submerged Flip Bucket Performance and Downstream Scour Profile - A case study - Prado Dam Spillway. *Proceedings of the 10th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, ISHS 2024*. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000675962>
- Eskandari, A., Heidarnejad, M., Masjedi, A., Purmohammadi, M. H., & Kamanbedast, A. (2020). Experimental investigation on the effect of different slot shapes and configurations on scour dimension downstream of flip buckets. *Water SA*, 46(3). <https://doi.org/10.17159/wsa/2020.v46.i3.8656>
- Fuladipannah, M., Azamathulla, H. M., Tota-Maharaj, K., Mandala, V., & Chadee, A. (2023). Precise forecasting of scour depth downstream of flip bucket spillway through data-driven models. *Results in Engineering*, 20. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101604>
- Güven, A., & Azamathulla, H. M. (2012). Gene-expression programming for flip-bucket spillway scour. *Water Science and Technology*, 65(11). <https://doi.org/10.2166/wst.2012.100>
- He, Z. Y., Leng, Y. H., Yang, L., Li, X. Y., & Liu, W. C. (2021). Research on Configuration Optimizing of Flip Bucket and Downstream Energy Dissipation and Scour Prevention for Spillway of Shahe Reservoir. *China Rural Water and Hydropower*, (12).
- Heng, S., Tingsanchali, T., & Suetsugi, T. (2012). ANALYSIS OF PLUNGE POOL SCOUR HOLE FORMATION BELOW A CHUTE SPILLWAY WITH FLIP BUCKET USING A PHYSICAL MODEL. *ASEAN Engineering Journal*, 2(2). <https://doi.org/10.11113/aej.v2.15517>
- Heng, S., Tingsanchali, T., & Suetsugi, T. (2013). Prediction formulas of maximum scour depth and impact location of a local scour hole below a chute spillway with a flip bucket. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 172. <https://doi.org/10.2495/RBM130211>
- Hoffmans, G. J. C. M. (1998). Jet Scour in Equilibrium Phase. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(4). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(1998\)124:4\(430\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(1998)124:4(430))
- Hoffmans, G. J. C. M., & Verheij, H. J. (2009). SCOUR MANUAL. In *Scour Manual*. <https://doi.org/10.1201/9780203740132>
- INCYTH LHA. (1981). Instituto Nacional de Ciencia y Técnicas Hidricas Laboratorio de Hidraulica. *Estudio Sobre Modelo Del Aliviadero de La Presa de Piedra. Informe Final. DOH-044-03-82. Ezeiza. Argentina*.
- Julien, P. Y. (2018). RIVER MECHANICS, SECOND EDITION. In *River Mechanics, Second Edition*. <https://doi.org/10.1017/9781316107072>
- Khalifehei, K., Azizyan, G., Shafai-Bajestan, M., & Chau, K. W. (2020). Experimental modeling and evaluation sediment scouring in riverbeds around downstream in flip buckets. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, 33(10). <https://doi.org/10.5829/IJE.2020.33.10A.09>
- Martins, B. F. (1975). SCOURING OF ROCKY RIVERBEDS BY FREE-JET SPILLWAYS. *WATER POWER*, 27(4 (APRIL, 1975)).
- Mason, P. J., & Arumugam, K. (1985). Free Jet Scour Below Dams and Flip Buckets. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(2). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(1985\)111:2\(220\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(1985)111:2(220))
- Nou, M. R. G., & Moghaddam, M. A. (2022). Prediction of scour depth downstream of the flip bucket with machine learning techniques. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Management*, 175(4). <https://doi.org/10.1680/jwama.20.00089>
- Ogras, S., & Onen, F. (2026). Numerical analysis of hydraulic characteristics of spillways and effectiveness of energy dissipation structures. *Ain Shams Engineering Journal*, 17(2). <https://doi.org/10.1016/j.asej.2025.103953>
- Pellegrino, R., & Toledo, M. (2023). Characterization of the Erosion Basin Shaped by the Jet Flow of Sky-Jump Spillways. *Water (Switzerland)*, 15(16). <https://doi.org/10.3390/w15162930>
- Pierre Y. Julien. (2010). *Sediment Transport: Theory and Practice*. Cambridge University Press.

- Rajaei, A., Omid, M. H., & Varaki, M. E. (2024). Experimental investigation on local scour downstream of stepped chutes with a flip bucket. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 12(4). <https://doi.org/10.1080/23249676.2024.2346657>
- S. Abdollahi, A. Masjedi, M. Haidarnejad, & A. Afros. (2024). Laboratory Investigation of the Effect of Sill Length in Flip Bucket Spillway on Scour at the Bottom of Downstream. *Journal of Water and Soil Science*, 28(1). <https://doi.org/10.47176/jwss.28.1.56520>
- Vanoni, V. A. (1975). Sedimentation engineering. In *NEW YORK, AM. SOC. CIV. ENGRS.*, 1975, III (Number 54).). <https://doi.org/10.5772/intechopen.68509>
- Veronese, A. (1937). Erosion of a bed downstream from an outlet. *Colorado A & M College, Fort Collins, United States*.
- Wu, C. M. (1973). *Scour at downstream end of dams in Taiwan*. IN: SEDIMENT TRANSPORTATION, VOLUME 1.
- Yang, C. T. (1996). Sediment transport : theory and practice. In *McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering*.
- Yildiz, D., & Uzucek, E. (1994). Prediction of scour depth from free falling flip bucket jets. *International Water Power & Dam Construction*, 46(11).
- Zhang, W., Wang, Z., He, X., & Luo, L. (2024). Study on energy dissipation and scour downstream of differential flip bucket in a spillway project. *Advances in Engineering Technology Research*, 11(1). <https://doi.org/10.56028/aetr.11.1.230.2024>