



Research Paper

## Accuracy Evaluation of Methods for Determining Jet Trajectory Characteristics in Flip Bucket

Eghbal Khorami<sup>1</sup>, Mohammad Mehdi Heidari<sup>2\*</sup> and Rasoul Ghabadian<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ph.D. Scholar, Department of Water Engineering, Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran

<sup>2</sup>Assist. Professor, Department of Water Engineering, Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran

<sup>3</sup>Assoc. Professor, Department of Water Engineering, Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran

### Article information

**Received:** November 04, 2022

**Revised:** December 20, 2022

**Accepted:** December 21, 2022

### Keywords:

Energy Dissipators  
Jet Trajectory  
Peak Point  
Ski-Jump

\*Corresponding author:

[mm.heidari@razi.ac.ir](mailto:mm.heidari@razi.ac.ir)



### Abstract

The maximum scour of the flip-bucket occurs at the jet landing site, so it is important to know the exact path of the jet. In this research, by building two laboratory models of different sizes, the ability to exist relationships in predicting the jet path, length, and coordinates of the jet peak was evaluated. According to the results, Kawakami's relation had better accuracy in predicting the jet path. The average error percentage of the jet trajectory length prediction in USBR and Attari relationships was less than 10% and other relationships were more than 20%. USBR, Attari, and Kawakami relationships had a good estimate of the jet trajectory length along the edge. The error of other relationships in estimating this characteristic was more than 30%. In predicting the horizontal distance of the high point of the jet trajectory, the theoretical relationship and the profile of Kawakami and USBR had an average error of less than 10%. Theoretical relationships, Kawakami and USBR in estimating the maximum height of the jet, have an estimate with an error of 23.7, 33.9, and 21.4% and according to the Nash-Sutcliffe criterion, none of these relationships have been able to get a very good category.

© Authors, Published by **Environment and Water Engineering** journal. This is an open-access article distributed under the CC BY (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



### Introduction

The flow passing through the spillway, especially during the flood, has the potential to destroy the river bed due to excess energy. To depreciate this kinetic energy and reduce its risks, they use energy dissipators structures. Flip bucket is one of the energies dissipators structures types, which is of hydraulic engineers' interest due to its construction cost compared to other structures. The ease of operation and

maintenance of this type of structure has made it more practical. The purpose of this research is to evaluate the various relationships related to the prediction of jet trajectory characteristics, such as the length of the jet along the water surface and the edge of the bucket, the height of the jet and the horizontal distance of the peak from the edge of the bucket using the experimental data of two models with different dimensions. In this research, the accuracy of the relationships has



been investigated and an attempt has been made to introduce relationships with acceptable predictions to be used in flip bucket design.

### Material and Methods

In this research, the relationships of jet trajectory prediction and the estimation of its geometric characteristics are identified and the accuracy of these relationships is evaluated. The relationships evaluated in this research were USBR, Kawakami, Gunko, Taraimovich and Gunko, Lencastre, Attari, and Elvatorski. In this research, two laboratory models with different dimensions were designed and built in the laboratory. The first laboratory model is made of galvanized iron cut by CNC with 0.1 mm precision. The width, height and length of this model were 50, 45 and 49 cm. The radius of the bucket is 15 cm and the edge angle is  $45^\circ$ . The second laboratory model has a height difference between the overflow crest and the bottom of the cup equal to 1.45 m, width 0.35 m, total length 1.94 m, edge angle  $30^\circ$  and bucket radius 0.36 m. All cuts of this model are made by CNC. The bottom of this model is made of 2 mm fiberglass and the walls are made of 4 mm thick glass. In both models, grid plates and flow stabilizers are installed between the inlet of the tank and the weir to prevent the transfer of water turbulence to the system. The chute before the bucket in the first and second models had an angle of  $55^\circ$  and  $44^\circ$  with the horizon. The tests in the first model is done for the flow rates of 17.1, 14.8, 10.8, 7.5 and 4.8 l/s and in the second model it is done for flow rates of 17.7, 15.5, 13.6, 12.9 and 9 l/s. The Froude number range in these experiments was from 6.8 to 12.3. The accuracy of relationships was evaluated based on the statistical criteria of coefficient of determination,  $R^2$ , Mean Squared Error, MSE, Normalized Mean Square Error, NMSE, Nash-Sutcliffe Efficiency, NSE and Mean Absolute Percentage Error, MAPE.

### Results

In Fig. 1 the observed and calculated jet trajectory profile is depicted by different relationships for the maximum and minimum flow, which are 4.8 and 1.17 l/s in the first model and 9 and 17.7 l/s in the second model, respectively. The predicted jet path by the relations have higher error at low flow rates than the higher flow rates.  $R^2$ , MAPE and NSE criteria of the Kawakami relation for predicting the jet path are 0.99, 28% and 0.98, these values for the USBR relation are equal to 0.96, 22% and 0.94. MAPE criteria for USBR.

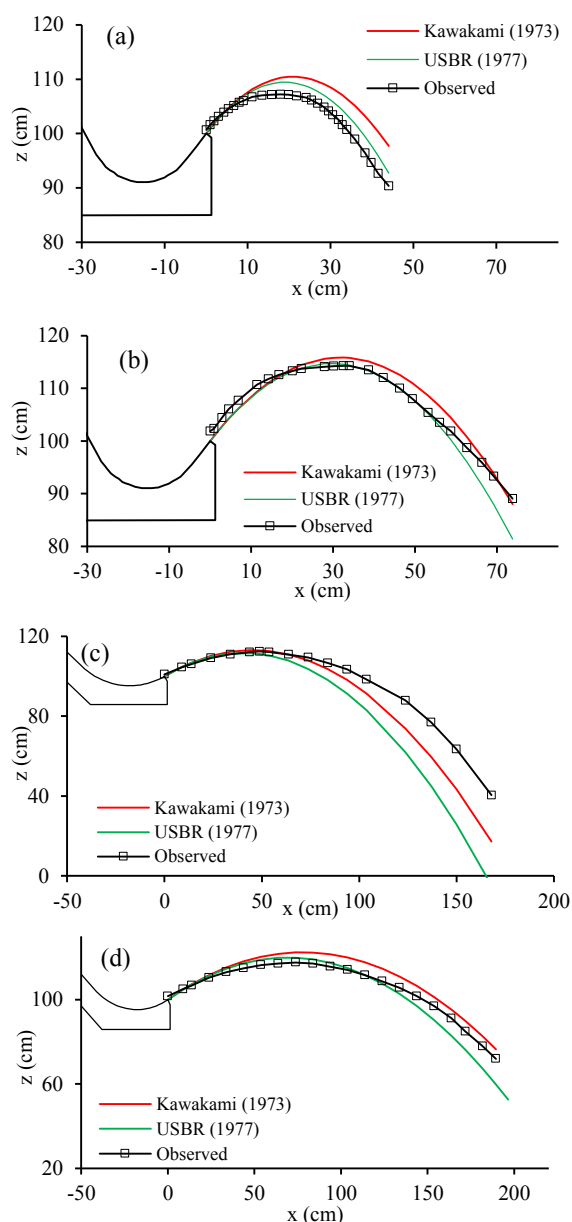


Fig. 1 Observational and computational profile of the jet trajectory for the a) first model  $Q=4.8$  l/s b) first model  $Q=17.1$  l/s c) second model  $Q=9$  d) second model  $Q=17.7$  l/s

Attari and jet theory profile in estimating the length of the jet trajectory along the downstream water level and the level of the lip bucket have been estimated with an error of less than 10%. Other relationships did not have a good prediction of this characteristic. The observed and calculated values of different relationships are included in Fig. 2.

MAPE criteria of theoretical relations, USBR, Kawakami and Attari in estimating these characteristics is less than 10%. These relationships are in a very good category according to the Nash-Sutcliffe criterion.

MAPE criteria of Kawakami and USBR (relationships in predicting the horizontal distance of the peak point was 6 and 7%. This criterion is equal to 23.7, 34 and 21% in predicting the height of the peak point of theoretical relations, Kawakami and USBR.

due to the failure to predict all the influencing factors in the proposed relationship. Some relationships have also been experimental and unique to the studied models. The Attari relation is based on models made with different sizes in Iran's water research center, and in this research, it had acceptable predictions.

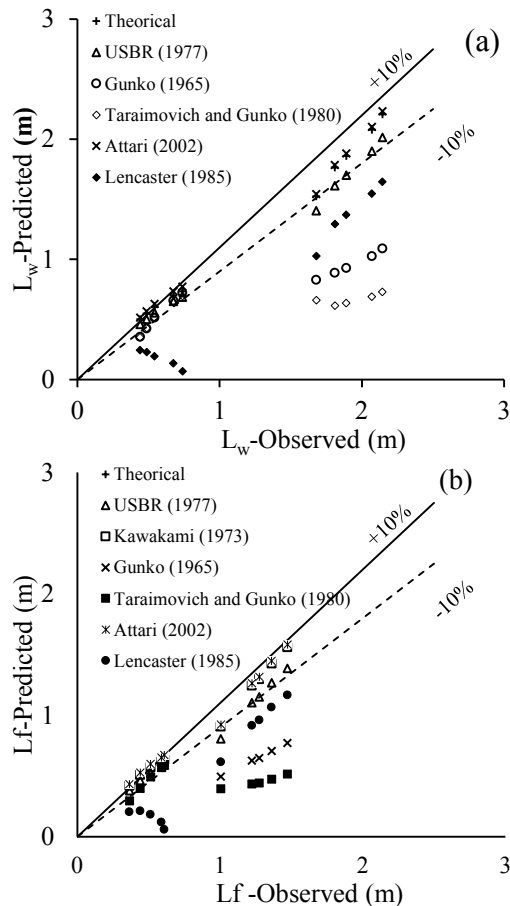


Fig. 2 Observational and computational values of the a) length of the jet trajectory along the downstream water level and b) lip bucket level.

The range of coefficient in relation to USBR is announced from 0.85 to 0.9. In different models, this coefficient can be different or even out of the declared range, which has caused errors in the predicted profile and other predicted characteristics of relationships. The cause of error in some relationships such as Elvatorski is

**Conclusions**

The most important results of the present study can be expressed as follows:

1. In the evaluation of the prediction relationships of the exit jet path, it was found that in terms of the NSE criterion, the Kawakami relationship with the NSE criterion of 0.9 compared to the USBR relationship of 0.685 was able to predict the jet path better.
2. In predicting the length of the jet trajectory along the downstream water level, theoretical relationships, USBR and Attari, the MAPE criteria was less than 10%
3. In estimating the length of the jet trajectory along the edge of the flip bucket, USBR, Attari and Kawakami relationships have an MAPE criteria of about 10%. This criterion has been more than 25% in other relationships.
4. The average absolute value of the relative error for theoretical relationships, Kawakami and USBR in estimating the horizontal distance of the peak point is less than 10% and in estimating the peak height, it is 23.7, 33.9 and 21.4%. All three relationships have a high error in projectile height estimation, and according to the Nash-Sutcliffe criterion, none of these relationships have been able to obtain an acceptable criterion.

**Data Availability**

The data can be sent on request by the corresponding author via email.

**Conflicts of Interest**

The authors of this paper declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.



ISSN: 2476-3683

محیط‌زیست و مهندسی آب

Homepage: [www.jewe.ir](http://www.jewe.ir)

مطالعه پژوهشی

## ارزیابی دقت روش‌های تعیین مشخصات جت عبوری از جام پرتابی

اقبال خرمی<sup>۱</sup>، محمدمهدی حیدری<sup>۲\*</sup> و رسول قبادیان<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران  
<sup>۲</sup>استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران  
<sup>۳</sup>دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

### اطلاعات مقاله

### چکیده

تاریخ دریافت: [۱۴۰۱/۰۸/۱۳]  
 تاریخ بازننگری: [۱۴۰۱/۰۹/۲۹]  
 تاریخ پذیرش: [۱۴۰۱/۰۹/۳۰]

### واژه‌های کلیدی:

پرش اسکی  
 مستهلک‌کننده انرژی  
 مسیر جت  
 نقطه اوج

پرتاب کننده جامی یکی از انواع مستهلک کننده‌های انرژی در پایین دست سرریزها می‌باشد که هزینه کمتری نسبت به سایر سازه‌های استهلاک انرژی دارد و در دهه‌های اخیر مورد توجه ویژه مهندسين قرار گرفته است. با توجه به اینکه آبستگي حداکثري در محل فرود جت پرتابی می‌باشد، شناخت دقیق مسیر حرکت جت، طول پرتابه و مختصات نقطه اوج جت حائز اهمیت است. به منظور بررسی روابط ارائه شده برای پیش‌بینی خصوصیات هیدرولیکی جت پرتابه‌ای، دو مدل آزمایشگاهی سرریز به همراه جام پرتابی به ارتفاع‌های ۱/۴۵ و ۰/۴۵m متر ساخته شد. پروفیل جت برای دبی‌های مختلف با استفاده از تکنیک عکس‌برداری و رقمی کردن تصاویر به کمک نرم‌افزار Grapher برداشت و مقادیر مشاهداتی با روابط ارائه شده توسط سایر محققین مقایسه شد. نتایج نشان داد که در پیش‌بینی مسیر جت خروجی از جام، معیار نش-ساتکلیف مربوط به رابطه‌ی کاواکامی ۰/۹۱ است که نشان دهنده‌ی مناسب بودن این رابطه می‌باشد. همچنین روابط USBR، عطاری و کاواکامی در پیش‌بینی طول پرتابه مناسب تشخیص داده شد. میانگین قدر مطلق خطای نسبی روابط تئوری حرکت پرتابه، کاواکامی و USBR در پیش‌بینی فاصله افقی نقطه اوج پرتابه کمتر از ۱۰٪ و همچنین در برآورد ارتفاع خیز پرتابه به ترتیب ۲۳/۷٪، ۳۳/۹٪ و ۲۱/۴٪ است.

### \*نویسنده مسئول:

[mm.heidari@razi.ac.ir](mailto:mm.heidari@razi.ac.ir)



### ۱- مقدمه

استفاده می‌شود (Parsaie and Haghiabi 2021). پرتاب‌کننده جامی یکی از انواع سازه‌های مستهلک کننده انرژی است که با توجه به هزینه ساخت آن نسبت به سایر سازه‌ها مورد توجه مهندسين هیدرولیک می باشد. سهولت در بهره برداری و نگهداری این نوع سازه باعث کاربردی‌تر شدن آن شده است (Barani et al. 2009). این نوع

جریان عبوری از سرریز خصوصاً در موقع عبور سیلاب دارای پتانسیل تخریب بستر پایاب به دلیل انرژی مازاد است (USBR<sup>۱</sup>1987). برای مستهلک کردن این انرژی جنبشی زیاد در پایاب سدها از سازه‌های مختلفی از جمله حوضچه آرامش، سرریز پلکانی و جام پرتابه‌ای و ایجاد پرش اسکی

<sup>۱</sup>United States Bureau of Reclamation



با استفاده از داده‌های مدل آزمایشگاهی و عددی بررسی و مسیر جت پرتابه‌ای را با رابطه کاواکامی مقایسه کردند. Farzin et al. (2018) تأثیر دبی بر طول جت پرتابه‌ای، سرعت، فشار و عدد فرود جریان خروجی از جام پرتابه‌ای را با استفاده از مدل عددی فلوتری‌دی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  دقت بالاتری نسبت به مدل RNG<sup>۲</sup> دارد. Ebrahimnezhadian et al. (2020) جریان عبوری از پرتابه‌کننده‌ی جامی سد گاوشان را با استفاده از مدل عددی شبیه‌سازی و اثر تغییر زاویه لبه‌ی جام را بر توزیع فشار کف جام، سرعت جریان خروجی و طول جت پرتابه‌ای بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزایش لبه‌ی جام تأثیر قابل‌توجهی روی حداکثر فشار در جام ندارد و زاویه  $30^\circ$ ، زاویه‌ی بهینه جام است. با بهره‌گیری از مدل فیزیکی و عددی با تعبیه بلوک‌هایی بر روی بخش تنداب سرریز اوجی با انتهای جام پرتابه‌ای، افت انرژی و طول پرتابه را در شرایط بدون جام، جام پرتابه‌ای با زاویه  $32^\circ$  و  $52^\circ$  بررسی و مشخص شد که طول پرتابه در این شرایط و با حضور بلوک‌های تنداب ۸ تا ۵۸٪ کاهش می‌یابد (Daneshfaraz et al. 2020).

Mirsalari and Shafai-Bejestan (2020) در یک تحقیق آزمایشگاهی تأثیر تعدادی تیغه منحرف کننده غیر ممتد مثلثی را بر میزان استهلاك انرژی و طول جت پرتابه‌ای بررسی کردند. آزمایش‌های این تحقیق در چهار دبی و سه عمق پایاب متفاوت برای دفلکتورهای مثلثی با زاویه  $47^\circ$  و بدون دفلکتور بوده است. این محققین در نهایت به دلیل افزایش میزان افت انرژی و کاهش طول پرتابه پرتاب‌کننده با دفلکتور مثلثی را توصیه نمودند. Mansouri et al. (2020) با استفاده از مدل عددی فلوتری‌دی خصوصیات هیدرولیکی جریان در پرتاب‌کننده جامی و همچنین پروفیل مسیر جت خروجی را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که پروفیل زیرین جت آب حساسیت کمتری نسبت به تغییرات هیدرولیکی جریان دارد. Karami Moghadam et al. (2020) اثرات تغییرات زاویه مورد اصابت جت در حوضچه پایاب، عمق فرورفتگی و دبی بر فشار دینامیکی جام ناشی از پرش اسکی را بصورت آزمایشگاهی بررسی نمودند. آن‌ها از چهار زاویه صفحه ضربه و چهار عمق آب پایاب استفاده نمودند. دبی‌های ۶۷، ۸۶، ۱۶۱ و  $184 \text{ l/s}$  انتخاب

مستهلك کننده جریان در جریان‌های با سرعت بیش از  $m/s$  ۱۵ توصیه شده است (Heller et al. 2005) و همچنین در شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی مناسب اقتصادی‌ترین مستهلك‌کننده در سدهای بلند می‌باشد (Khatsuria (2005). در این سازه، جریان پس از عبور از جام بصورت فواره به هوا پرتاب می‌شود و پس از طی مسیری در پایین‌دست فرود می‌آید. عموماً حداکثر آبشستگی بستر حوضچه در محل فرود جت ایجاد می‌شود و بررسی آن وابستگی مستقیم به جت پرتاب شده از جام و محل فرود آن دارد. موقعیت چاله آبشسته شده به نوع سازه استهلاك انرژی و الگوی جریان در بالادست جام نیز وابسته است (Parsaie et al. 2016). اهمیت دیگر شناخت کافی از مسیر حرکت جت این است که با توجه به شرایط خاص پایاب، عدم شناخت صحیح از محل فرود ممکن است باعث برخورد توده آب به سازه‌های پایاب و یا توده‌های طبیعی دارای مقاومت کم شود و خطراتی برای پایداری سازه‌های در جوار ایجاد کند (Juon and Hager 2000).

Kamanbedast and Aghamajidi (2013) با استفاده از مدل عددی، تأثیر زوایای جام سد گتوند علیا را بر طول جت خروجی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که جت خروجی جام سمت راست در زاویه  $34^\circ$  بیشترین و در زاویه  $48^\circ$  کمترین طول پرتاب را دارد. همچنین در جام سمت چپ، زاویه جام  $28^\circ$  و  $48^\circ$  به ترتیب باعث بیشترین و کمترین طول پرتاب جت می‌شود. Kakeshpour et al. (2016) اثر چهار مقدار بازشدگی دریچه شعاعی را با استفاده از نرم‌افزار فلوتری‌دی<sup>۱</sup> بر طول جت پرتابی و حداکثر ارتفاع جت بررسی کردند. این محققین براساس نتایج خود اعلام نمودند که دقت مدل فلوتری‌دی در مدل‌سازی جت خروجی از جام پرتابه‌ای مناسب است و می‌توان از آن برای بررسی مشخصات جت استفاده کرد. این محققین در پژوهش دیگر، با استفاده از مدل فیزیکی و عددی طول جت پرتابه‌ای را برای حالتی که سرریز دارای دریچه است و یا شکل انتهای جام مثلثی است، بررسی و با روابط موجود مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که رابطه Kawakami (1973) دارای خطای زیاد و رابطه اداره عمران اراضی ایالات متحده دقت مناسبی در تعیین پروفیل جت خروجی است. Yavuz et al. (2016) افت انرژی، طول جت پرتابه‌ای و فشار دینامیکی کف جام را

<sup>۲</sup>Renormalization Group

Flow 3D

سطح آب پایاب و لبه جام، ارتفاع خیز پرتابه و فاصله افقی نقطه اوج از لبه جام با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی دو مدل با ابعاد متفاوت است. در این پژوهش دقت روابط مورد بررسی قرار گرفته و نسبت به معرفی روابط با پیش‌بینی قابل قبول اقدام شده است تا در طراحی جام پرتابه‌ای مورد استفاده قرار گیرد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- روش‌های برآورد مسیر و مشخصات هندسی جت

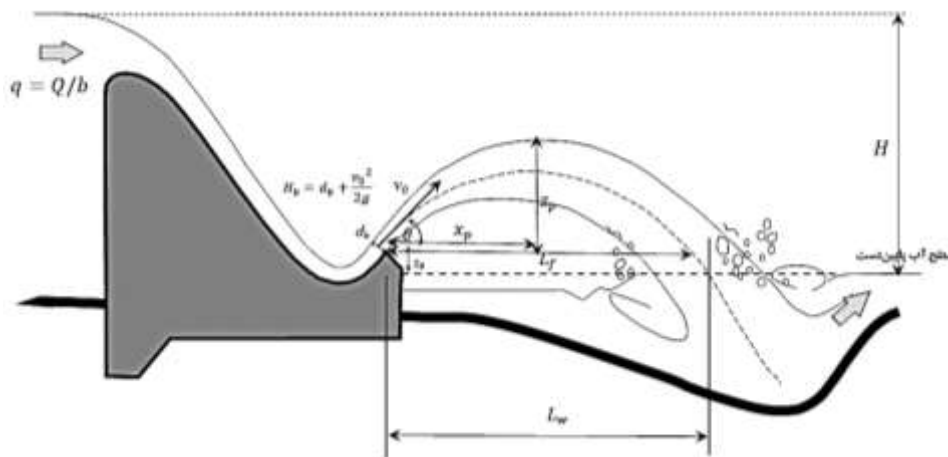
مسیر جت خروجی از جام با استفاده از مفهوم حرکت پرتابه‌ای به صورت تئوری مطابق رابطه (۱) می‌باشد (USBR (1987):

$$z = z_0 + xt g \theta - \frac{g x^2}{2 v_0^2 \cos^2 \theta} \quad (1)$$

که در آن،  $v_0$  سرعت متوسط جت خروجی از لبه جام،  $x$  فاصله افقی از لبه جام،  $z$  فاصله عمودی جت از تراز لبه جام،  $z_0$  فاصله عمودی لبه جام نسبت به سطح آب پایاب،  $g$  شتاب ثقل و  $\theta$  زاویه لبه جام با افق می‌باشد. شکل (۱) مشخصات هندسی و عوامل مؤثر بر حرکت جت خروجی از جام پرتابه‌ای را نشان می‌دهد. در این شکل  $b$  عرض سرریز می‌باشد.

شد. برای هر دبی، عمق پایاب و زاویه صفحه تنظیم و فشارهای دینامیکی توسط مبدل اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که با افزایش زاویه صفحه، میانگین ضریب فشار دینامیکی کاهش می‌یابد و در زاویه  $60^\circ$  صفحه، ضریب فشار دینامیکی ناشی از افزایش عمق پایاب از  $34\%$  تا  $95\%$  متغیر بود. این محققین همچنین اعلام نمودند که افزایش عمق بالشتک آب در پایین دست منجر به کاهش میانگین فشار و نوسانات فشار شده است. با افزایش دبی و زاویه دیواره پایین متحرک، حداکثر مقدار ضریب نوسان در عمق کمتر بالشتک آب رخ داده و با رشد دبی، حداکثر نوسانات مثبت و منفی فشار ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته است. Emre Ulu et al. (2022) با بهره‌گیری از مدل عددی، شکل خاصی از جداکننده جریان در جام سرریزهای جامی را ارائه داد که باعث کاهش  $55\%$  سرعت جریان و کاهش طول پرتابه نسبت به حالت بدون جداکننده جریان شده است.

با توجه به اینکه مشخصات جت خروجی از جام پرتابه‌ای بر آبشستگی و پایداری سرریز تأثیر زیادی دارد، ارزیابی روابط موجود در تخمین مسیر جت و مشخصات آن به منظور استفاده در طراحی جام پرتابه‌ای ضروری است. هدف از انجام این پژوهش، ارزیابی روابط مختلف مربوط به پیش‌بینی مشخصات جت پرتابه‌ای از قبیل طول پرتابه در راستای



شکل ۱- مشخصات هندسی و عوامل مؤثر بر حرکت جت خروجی از جام پرتابه‌ای

Fig. 1 Geometric characteristics and factors affecting the trajectory of the exiting jet from the Flip Bucket

$$L_w(t) = \frac{v_0^2}{2g} \left[ \sin 2\theta + 2 \cos \theta \sqrt{\sin^2 \theta + \frac{z_0}{(v_0^2/2g)}} \right] \quad (2)$$

$$L_f(t) = \frac{v_0^2 \sin 2\theta}{g} \quad (3)$$

$$z_p(t) = \frac{v_0^2 \sin^2 \theta}{2g} \quad (4)$$

$$x_p(t) = \frac{v_0^2 \sin 2\theta}{2g} \quad (5)$$

با استفاده از رابطه (۱)، فاصله افقی محل برخورد با سطح آب پایین‌دست،  $L_w$ ، طول جت در تراز لبه جام،  $L_f$ ، ارتفاع اوج پرتابه،  $z_p$ ، و فاصله افقی اوج پرتابه نسبت به لبه جام،  $x_p$ ، به صورت تئوری مطابق روابط (۲) تا (۵) می‌باشد (USBR (1987):

$$z = z_0 + xt g \theta - \frac{x^2}{\kappa(4H_b \cos^2 \theta)} \quad (12)$$

$$L_w = kH_b \left[ \sin 2\theta + 2\cos\theta \sqrt{\sin^2 \theta + \frac{Z_0}{kH_b}} \right] \quad (13)$$

که،  $H_b$  هدکل انرژی جت خروجی از سازه نسبت لبه‌ای جام و  $k$  ضریب مربوط به مقاومت هوا که بین ۰/۸۵ تا ۰/۹ در نظر گرفته شده است. (Taraimovich and Gunko (1980) نسبت طول واقعی به طول تئوری جت پرتابی را به عدد فرود در لبه‌ای جام مرتبط دانسته و رابطه (۱۴) را ارائه دادند

$$L = L(t) e^{-5 \times 10^{-5} Fr_b^4} \quad (14)$$

(Lencastre (1985) نیز رابطه شماره (۱۵) را برای تخمین طول جت پرتابه ارائه نمود.

$$L = 0.072 L(t) \sqrt{Fr_b^2 - 45} \quad (15)$$

برخی از محققان مانند (Khatsuria 2005; Peterka 1985; USBR 1987; Visher and Hager 1998) تحقیقات خود را برای محاسبه فاصله افقی محل برخورد با سطح آب پایین دست بر رابطه (۱۶) قرار دادند. در این رابطه  $K_a$  ضریب هوادهی می باشد (Savic 2010).

$$L_w = K_a \frac{v_0^2 \cos \theta}{g} \left[ \sin \theta + \left( \sin^2 \theta + \frac{2gZ_0}{v_0^2} \right)^{1/2} \right] \quad (16)$$

(Attari (2002) براساس نتایج آزمایشگاهی در سدهای ایران رابطه (۱۷) را برای محاسبه طول جت پرتابه‌ای ارائه داد.

$$L = L(t) \left[ 1 - \frac{(v_0/30)^{4.45}}{2.25(v_0/30)^{3.7+4}} \left( \frac{\theta}{40} \right)^{0.5} \right] \quad (17)$$

## ۲-۲- مدل‌های آزمایشگاهی

به‌منظور تعیین مسیر و مشخصات جت پرتابه‌ای، دو مدل آزمایشگاهی با ابعاد مختلف در آزمایشگاه هیدرولیک گروه آب دانشگاه رازی طراحی و ساخته شد. مدل اول آزمایشگاهی به اقتباس از سرریز سد Grand Coulee، شامل سرریز اوجی، شوت و پرتاب کننده جامی از جنس آهن گالوانیزه است که با دستگاه برش لیزری با دقت mm ۰/۱ ساخته شده است. مدل سرریز اوجی به عرض ۵۰ cm، ارتفاع ۴۵ cm و طول ۴۹ cm طراحی شده است و دارای یک شوت با شیب ۰/۷:۱ و یک جام پرتابی با شعاع ۱۵ cm و زاویه لبه‌ای خروجی ۴۵° است کف این مدل با ورق گالوانیزه پوشش داده شده است. این مدل مطابق شکل (۲-۲ الف) در کانال آزمایشگاهی دارای طول، عرض و ارتفاع ۱۵

که، نمایه  $t$ ، نشان‌دهنده تئوری بودن رابطه براساس مبانی حرکت پرتابه‌ای است. مشخصات هندسی جت خارج شده از جام بستگی به زاویه لبه‌ای جام، سرعت خروجی جت و فاصله لبه‌ای جام تا سطح آب پایاب دارد. رابطه‌ی مسیر حرکت جت به‌صورت تئوری بدون در نظر گرفتن مقاومت هوا و آشفتگی جریان است. محققین مختلف روابطی را برای مسیر حرکت جت و مشخصات آن ارائه کرده‌اند آنها عمدتاً تأثیرگذاری مقاومت هوا و سایر موارد را با پارامترهای مختلف به‌عنوان ضریب اصلاحی اعمال نموده‌اند. Elvatorski (1959) براساس مشاهدات انجام شده سد Pin Flat رابطه (۶) را برای پیش بینی طول پرتابه پیشنهاد داد (W.R. I. (2003)

$$\frac{L}{H} = 2 \frac{Z_u}{H} \sin 2\theta \quad (6)$$

که در آن،  $L$  طول جت پرتابه‌ای،  $H$  اختلاف ارتفاع بین سطح آب مخزن و سطح پایاب و  $Z_u$  اختلاف ارتفاع بین سطح آب مخزن و کف جام است. (Gunko (1965) مقدار طول واقعی جت پرتابه‌ای را وابسته به عدد فرود جریان در نظر گرفت و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی رابطه (۷) را برای طول جت ارائه داد.

$$L = L(t) e^{-0.12(Fr_b - c)} \quad (7)$$

که،  $Fr_b$  عدد فرود در خروجی جام،  $c$  یک مقدار ثابت بین ۵/۵ تا ۷ و  $L$  طول واقعی جت پرتابه‌ای است. Kawakami (1973) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و با تعریف ضریب  $k$  به‌عنوان تأثیر مقاومت هوا و وابسته نمودن آن به‌سرعت خروجی جت از جام، روابط (۸) و (۹) را با پارامترهای محاسبه شده از رابطه (۱۰) و (۱۱) برای تعیین مسیر جت پرتابه‌ای و طول جت در تراز لبه‌ای جام ارائه داد (Savic 2010).

$$z = \frac{1}{gk^2} \ln[\cos \gamma + \sin \gamma \operatorname{tga}] + Z_0 \quad (8)$$

$$L_f = \frac{1}{gk^2} \ln(1 + 2kav_0 \cos \theta) \quad (9)$$

$$\gamma = [e^{(xgk^2)} - 1] / kv_0 \cos \theta \quad (10)$$

$$\alpha = \tanh^{-1}[kv_0 \sin \theta] \quad (11)$$

(USBR (1977) با در نظر گرفتن تأثیر مقاومت هوا، روابط (۱۲) و (۱۳) را برای مسیر و طول جت خروجی از جام تا سطح آب پایاب ارائه داده است.



شکل ۲- تصاویر مدل‌های آزمایشگاهی ساخته شده الف- مدل اول و ب- مدل دوم

Fig. 2 Laboratory models image a) first model b) second model

### ۲-۳- معیارهای آماری برای ارزیابی روابط

برای تعیین دقت روابط مختلف از معیارهای آماری ضریب تعیین  $(R^2)$ <sup>۱</sup>، مربع میانگین خطای استاندارد (MSE)<sup>۲</sup>، مربع میانگین خطای استاندارد نرمال شده (NMSE)<sup>۳</sup>، معیار نش-ساتکلایف (NSE)<sup>۴</sup>، و میانگین قدر مطلق خطای نسبی (MAPE)<sup>۵</sup>، مطابق رابطه‌های (۱۸) تا (۲۲) استفاده شد. معیارهای MSE و NSE به ترتیب دارای بدهای طول به

۰/۵ و ۱ m قرار داده شد. شکل (۲-الف) نمایی از مدل آزمایشگاهی سرریز را به همراه پرتاب‌کننده جامی نشان می‌دهد. اندازه‌گیری سطح آب در بالادست توسط یک دستگاه عمق سنج مجهز به متر لیزری با دقت ۰/۱ mm انجام شد، همچنین پروفیل جت با استفاده از فن عکس‌برداری و رقومی کردن تصاویر به کمک نرم‌افزار Grapher برداشت شد. دبی عبوری از مدل آزمایشگاهی با استفاده از سرریز مثلثی اندازه‌گیری شد. آزمایش‌های در مدل شماره یک برای دبی‌های ۱۷/۱، ۱۴/۸، ۱۰/۸، ۷/۵ و ۴/۸ l/s صورت گرفت. تأمین آب در مجموعه‌های آزمایشگاهی بصورت گردشی بوده و از مخزن ذخیره توسط پمپ به ابتدای کانال پمپاژ شده است سپس با استفاده از آرام کننده امواج سطحی آن گرفته شده است. کنترل سطح آب در پایین دست توسط دریچه کشویی نصب شده انتهای کانال صورت می‌گیرد و در نهایت آب خارج شده از مجموعه آزمایشگاهی به مخزن ذخیره انتقال می‌یابد.

مدل آزمایشگاهی دوم به صورت مجزا و مطابق شکل (۲-ب) در گروه مهندسی آب دانشگاه رازی طراحی و ساخته شد. اختلاف ارتفاع بین تاج سرریز و کف جام برابر ۱/۴۵ m، عرض مدل آزمایشگاهی ۰/۳۵ m، طول کل سازه ۱/۹۴ m، زاویه لبه‌ی جام ۳۰° و شعاع جام پرتابه‌ای ۰/۳۶ m است. آب از طریق پمپی که حداکثر ظرفیت پمپاژ ۲۳ l/s را دارد، از مخزن ذخیره بیرونی به پشت سرریز پمپاژ می‌شود. صفحات مشبک و آرام کننده‌های جریان جهت جلوگیری از تلاطم آب در قسمت ورودی آب به مخزن بالادست تعیین شده است. دیوار قسمت سرریز و جام پرتاب‌کننده از شیشه و کف آن‌ها از فیبر شیشه ساخته شده است. دبی و تراز سطح آب در این مدل به ترتیب توسط فلومتر التراسونیک مدل قابل حمل ۳۰۰۱ و دستگاه عمق‌سنج اندازه‌گیری و مسیر جت پرتابه‌ای با استفاده از متر لیزری برداشت شد. آزمایش‌های بررسی مشخصات جت خروجی از جام پرتابه‌ای در مدل دوم برای دبی‌های ۱۷/۷، ۱۵/۵، ۱۳/۶، ۱۲/۹ و ۱ l/s انجام شده است. محدوده عدد فرود در این آزمایش‌های از ۶/۸ تا ۱۲/۳ بوده است.

<sup>۱</sup>Coefficient of determination (R squared)

<sup>۲</sup>Mean Squared Error

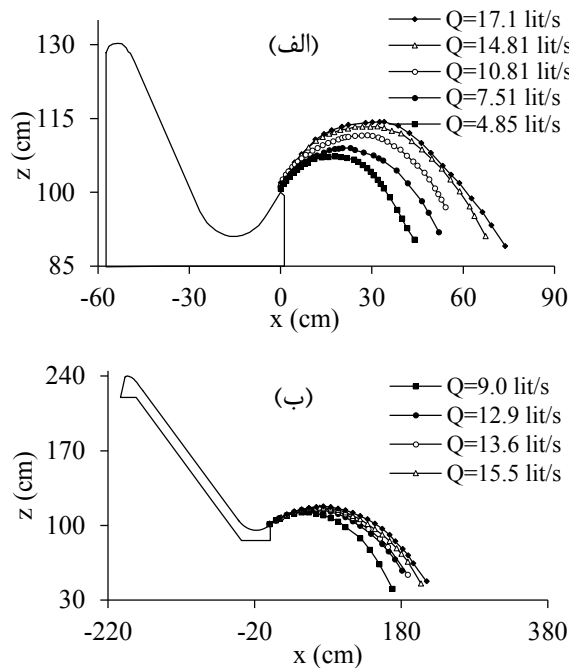
<sup>۳</sup>Normalized Mean Square Error

<sup>۴</sup>Nash-Sutcliffe Efficiency

<sup>۵</sup>Mean Absolute Percentage Error



است. مقدار ضریب هوادهی در رابطه (1977) USBR به میزان ۰/۸۷۵ در نظر گرفته شده است.



شکل ۳- پروفیل مسیر جت خروجی اندازه‌گیری شده مربوط به الف- مدل اول و ب- مدل دوم

Fig. 3 Profile of the measured output jet trajectory of the a) first model b) second model

حداکثر و حداقل ارتفاع خیز پرتابه در مدل اول به ترتیب ۱۴ و ۷ cm برای دبی‌های ۱۷/۱ و ۴/۹ l/s و در مدل دوم ۱۸ و ۱۲ cm برای دبی‌های ۱۷/۷ و ۹ l/s بود. در این دبی‌ها حداکثر و حداقل فاصله افقی اوج پرتابه از لبه‌ی جام برای مدل اول ۳۴ و ۱۸ cm و برای مدل دوم ۷۴ و ۴۹ cm بوده است. همچنین دبی‌ها حداکثر و حداقل طول جت پرتابه‌ای در راستای لبه‌ی جام ۶۱ و ۳۷ cm برای مدل اول و ۱۴۷ و ۱۰۰ cm برای مدل دوم است. همچنین با توجه به اینکه اختلاف ارتفاع بین سطح آب روی سرریز و لبه‌ی جام در مدل دوم بیشتر از مدل اول می‌باشد، طول جت در مدل دوم بیشتر از مدل اول است. پروفیل مسیر جت پرتابه‌ای مشاهداتی با مسیر پیش‌بینی شده به‌وسیله روابط موجود برای دبی‌های مختلف مقایسه شد. در شکل‌های (۴-الف)، (۴-ب)، (۴-ج)، (۴-د) و (۴-ه) پروفیل مسیر جت پرتابه‌ای مشاهداتی و محاسباتی روابط مختلف در مدل اول به‌ترتیب مربوط به دبی‌های ۴/۸، ۷/۵، ۱۰/۸، ۱۴/۸ و ۱۷/۱ l/s آورده شده است.

توان دو و درصد می‌باشند. سایر معیارها بدون بعد هستند.

$$R^2 = \left( \frac{\sum(O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum(O_i - \bar{O})^2 \sum(S_i - \bar{S})^2}} \right)^2 \quad (18)$$

$$MSE = \frac{\sum(O_i - S_i)^2}{n} \quad (19)$$

$$NMSE = \frac{\sum(O_i - S_i)^2}{\sum(O_i - \bar{O})^2} \quad (20)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum(O_i - S_i)^2}{\sum(O_i - \bar{O})^2} \quad (21)$$

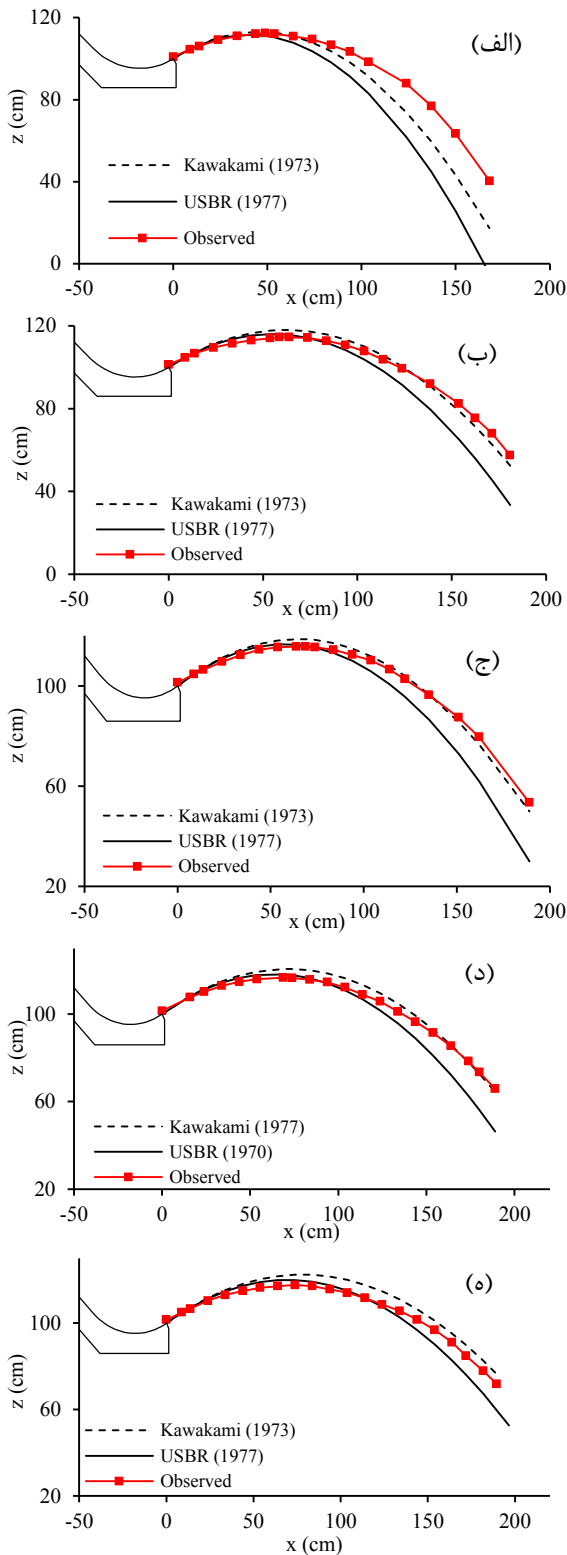
$$MAPE = \frac{100}{n} \sum \left| \frac{S_i - O_i}{O_i} \right| \quad (22)$$

که در آن،  $S_i$  مقدار محاسباتی،  $\bar{S}$  میانگین داده‌های محاسباتی،  $O_i$  مقدار مشاهداتی و  $\bar{O}$  میانگین داده‌های مشاهداتی است. بالا بودن ضریب تعیین بیانگر دقت قابل قبول مدل و برتری آن نسبت به مدل دیگر است، همچنین مقادیر MSE و NMSE اگر کمتر باشند یعنی دقت مدل بیشتر است. معیار نش-ساتکلیف از رابطه (۲۱) تعیین می‌شود. این شاخص می‌تواند در بازه  $[-\infty, 1]$  تغییر کند و براساس مقدار کسب شده‌ی این معیار در محدوده‌های ۰/۷۵ تا ۱ نتیجه ارزیابی بسیار خوب، در محدوده ۰/۶۵ تا ۰/۷۵ نتیجه خوب، در محدوده ۰/۵ تا ۰/۶۵ نتیجه رضایت‌بخش و در محدوده کمتر از ۰/۵ نتیجه غیر قابل قبول تعیین شده است (Moriasi 2007).

### ۳- یافته‌ها و بحث

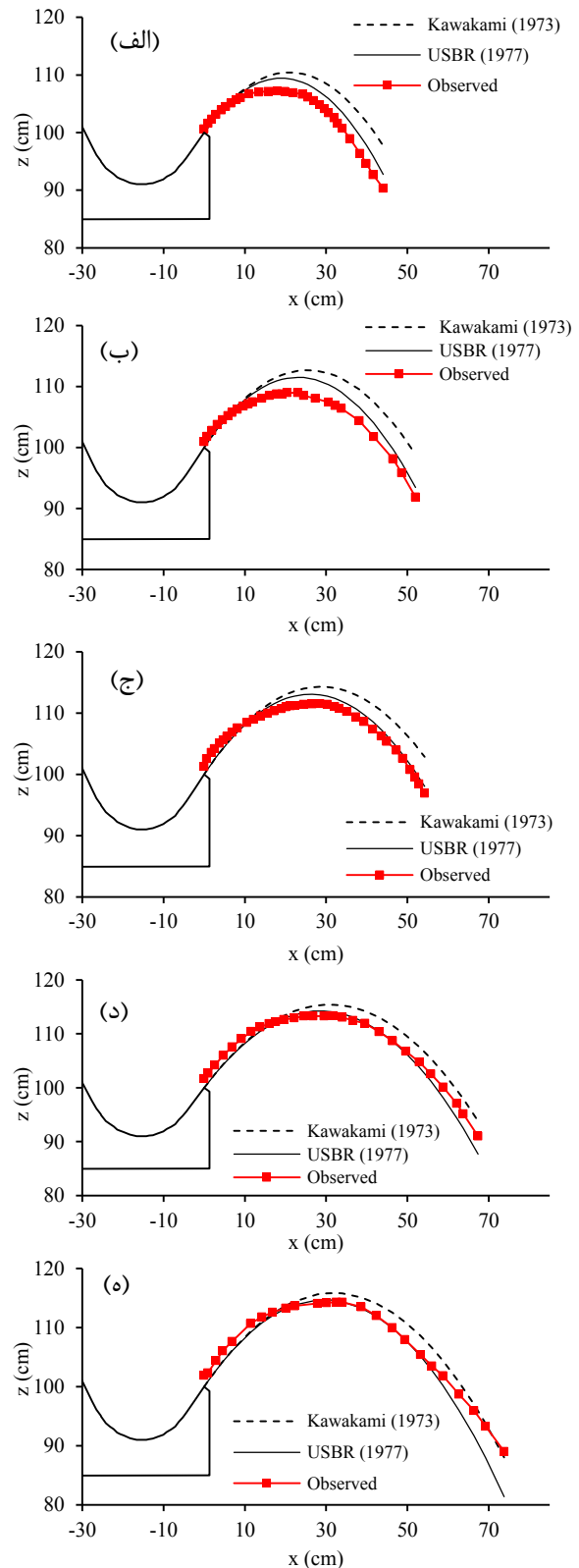
#### ۳-۱- مسیر جت خروجی

مسیر جت خروجی از جام براساس رابطه تئوری حرکت پرتابه‌ای بستگی به سرعت جت خروجی و زاویه لبه‌ی جام دارد. با در نظر گرفتن رابطه انرژی بین سطح آب در مخزن سرریز و لبه‌ی جام، می‌توان سرعت تقریبی جت خروجی از جام پرتابه‌ای را محاسبه کرد. دبی عبوری از سرریز و اختلاف ارتفاع بین سطح آب روی سرریز و لبه‌ی جام دو متغیر اثرگذار بر سرعت جت خروجی از جام بودند. افزایش دبی و اختلاف ارتفاع بین هد آب بالادست و لبه‌ی جام باعث افزایش طول جت پرتابه‌ای می‌شود. در این تحقیق سرعت جریان خروجی از جام به‌صورت متوسط با استفاده از عمق آب اندازه‌گیری شده روی لبه خروجی جام محاسبه شده است. در شکل (۳) برای دو مدل آزمایشگاهی، پروفیل مسیر جت خروجی از جام پرتابه‌ای در دبی‌های مختلف آورده شده



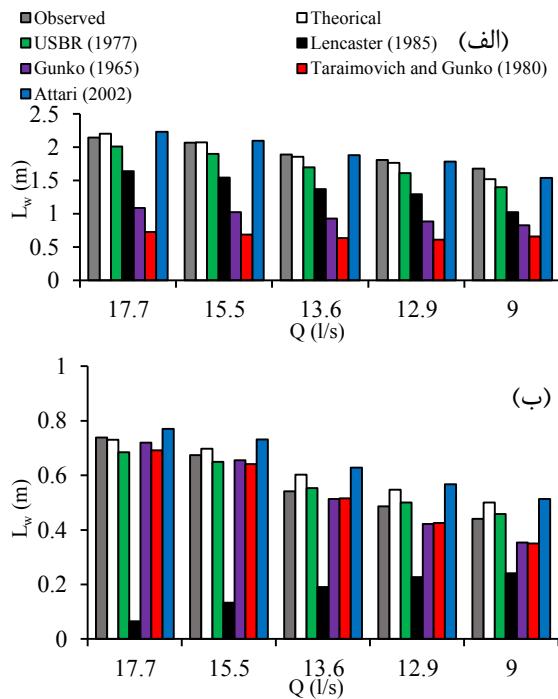
شکل ۵- ارزیابی روش‌های محاسباتی پروفیل مسیر جت با استفاده از داده‌های این تحقیق برای مدل آزمایشگاهی دوم الف- ۹ ب- ۱۲/۹ ج- ۱۳/۶ د- ۱۵/۵ ه- ۱۷/۷ l/s

Fig. 5 Observational and computational profile of the jet trajectory for the second model model a) 9 b) 12.9 c) 13.6 d) 15.5 e) 17.7 l/s



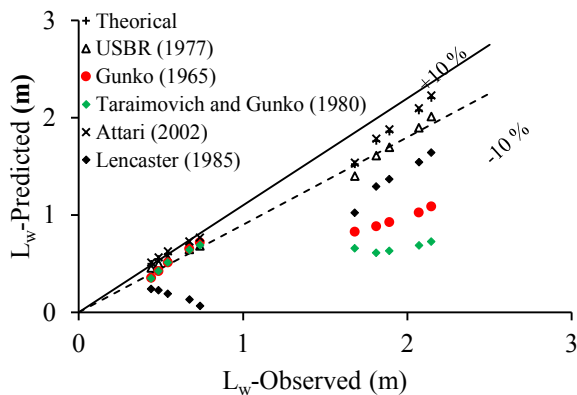
شکل ۴- ارزیابی روش‌های محاسباتی پروفیل مسیر جت با استفاده از داده‌های این تحقیق برای مدل آزمایشگاهی اول الف- ۴/۸ ب- ۷/۵ ج- ۱۰/۸ د- ۱۴/۸ ه- ۱۷/۱ l/s

Fig. 4 Observational and computational profile of the jet trajectory for the first model a) 4.8 b) 7.5 c) 10.8 d) 14.8 e) 17.1 l/s



شکل ۶- مقایسه روابط مختلف تخمین مقدار طول جت پرتابه‌ای در راستای سطح آب پایین دست در: الف- مدل اول ب- مدل دوم

Fig. 6 Comparison of different relationships for estimating the length of the jet trajectory along the downstream water level in the: a) first and b) second model



شکل ۷- مقادیر مشاهداتی و محاسباتی طول جت پرتابه‌ای در راستای سطح آب پایین دست

Fig. 7 Observational and computational values of the length of the jet trajectory along the downstream water level

مقادیر طول پرتابه‌ای مشاهداتی و محاسباتی روابط مختلف در شکل (۷) درج شده است. همان‌طور که مشخص است سه رابطه USBR (1973)، Attari (2002) و تئوری در محدوده ۱۰٪ مقادیر مشاهداتی واقع شده و سایر روابط پیش‌بینی مناسبی از این مشخصه نداشته‌اند. برخی از روابط مانند Gunko (1965)، Taraimovich and Gunko (1980) و Lencaster (1985) طول پرتابه را خیلی کم‌تر از

در مدل آزمایشگاهی اول مسیر پیش‌بینی شده جت خروجی از جام با استفاده از رابطه USBR (1977)، انطباق بیشتری با داده‌های مشاهداتی دارد. همچنین افزایش دبی باعث افزایش سرعت جت خروجی از جام پرتابه‌ای و در نتیجه باعث افزایش طول جت پرتابه‌ای و ارتفاع اوج آن می‌شود. نتایج نشان داد، با افزایش دبی خطای روابط برای پیش‌بینی مسیر جت کمتر می‌شود. در شکل‌های (۵-الف)، (۵-ب)، (۵-ج)، (۵-د) و (۵-ه) پروفیل مسیر جت پرتابه‌ای مشاهداتی و محاسباتی روابط مختلف در مدل دوم به ترتیب برای دبی‌های ۹، ۱۲/۹، ۱۳/۶، ۱۵/۵ و ۱۷/۷ l/s درج شده است.

همان‌گونه که از شکل (۵) مشخص است در مدل دوم رابطه Kawakami (1973) توانسته است پیش‌بینی دقیق‌تری از مسیر خروجی جام داشته باشد مسیر جت پیش‌بینی شده در دبی‌های کم نسبت به دبی‌های بیشتر فاصله بیشتری از مسیر جت اندازه‌گیری داشته است. به‌منظور ارزیابی و بررسی دقت این روابط، ۲۰۰ نقطه (به‌طور متوسط از هر دبی ۲۰ نقطه) از مسیر جت پرتابه‌ای پیش‌بینی شده، مورد استفاده قرار گرفت. ضریب تعیین، میانگین قدر مطلق خطای نسبی و معیار نش-ساتکلیف رابطه Kawakami (1973) به ترتیب ۰/۹۹، ۰/۲۸ و ۰/۹۸ بوده است. این مقادیر در رابطه USBR (1977) به ترتیب ۰/۹۶، ۰/۲۲ و ۰/۹۴ بودند. مطابق این معیارها، رابطه USBR (1977) با میزان میانگین خطای ۰/۲۲، توانسته است بهتر از رابطه Kawakami (1973) مسیر جت را پیش‌بینی نماید.

### ۳-۲- طول جت پرتابه‌ای در راستای سطح آب پایاب

به‌منظور تخمین طول جت پرتابه‌ای در راستای سطح آب پایاب دست می‌توان از روابط تئوری USBR (1977)، Gunko (1965)، Taraimovich and Gunko (1980)، Lencaster (1985) و Attari (2002) ذکر شده در بخش مواد و روش‌ها استفاده نمود. در شکل (۶) مقدار طول مشاهده‌ای جت پرتابه‌ای و مقادیر محاسباتی روابط مختلف برای هر دو مدل آزمایشگاهی درج شده است. لازم به ذکر است در این بخش سطح آب پایاب به‌عنوان سطح مبنا در نظر گرفته شده است. در رابطه Gunko (1965) ضریب ثابت برابر ۶/۲۵ در نظر گرفته شده است.

میزان واقعی آن برآورد نموده‌اند. به منظور ارزیابی بهتر روابط موجود، معیارهای آماری و متوسط درصد خطای محاسباتی درج شده است. روابط مورد بررسی در پیش‌بینی طول پرتابه در جدول (۱)

جدول ۱- معیارهای آماری مربوط به ارزیابی روش‌های مختلف برآورد طول جت پرتابه‌ای در راستای سطح آب پایین‌دست  
Table 1 Statistical criteria related to the evaluation of different methods of estimating the length of the jet trajectory along the downstream water level

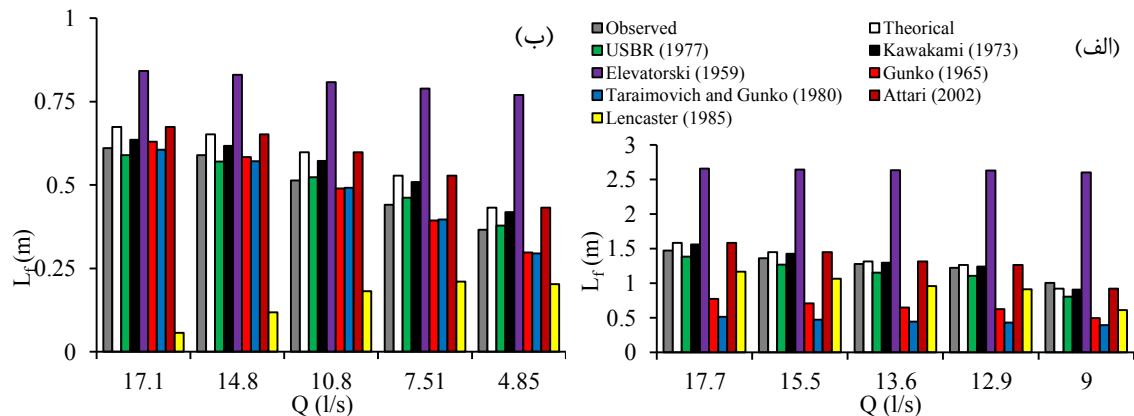
Relationship name	MAPE (%)	R <sup>2</sup>	NMSE	MSE (m <sup>2</sup> )	NSE
Theoretical	5.8	0.992	0.009	0.004	0.991
USBR (1977)	7.2	0.993	0.043	0.020	0.957
Gunko (1965)	29.6	0.896	1.003	0.473	-0.003
Taraimovich and Gunko (1980)	37.5	0.488	1.695	0.799	-0.695
Attari (2002)	7.8	0.480	0.011	0.005	0.989
Lencaster (1985)	47.9	0.885	0.523	0.247	0.477

پرتابه‌ای در سطح آب پایین‌دست جزو روابط با پیش‌بینی بسیار خوب بودند.

### ۳-۳- طول جت پرتابه‌ای در راستای لبه جام

به منظور تخمین طول جت پرتابه‌ای در راستای لبه خروجی جام می‌توان از روابط تئوری، USBR (1977)، Taraimovich (1959)، Elevatorski (1965)، Gunko (1980) و Attari (1985) استفاده نمود. در شکل (۸) مقادیر مشاهده‌ای و محاسباتی طول جت پرتابه‌ای در راستای لبه جام برای هر دو مدل آزمایشگاهی آورده شده است.

به جز روابط تئوری، USBR (1977) و Attari (2002) با میانگین قدر مطلق خطای نسبی ۷/۲٪ و ۷/۸٪، سایر روابط دارای میانگین قدر مطلق خطای نسبی بیش از ۳۰٪ در برآورد طول جت پرتابه‌ای در راستای سطح آب پایین‌دست می‌باشند. در برآورد این مشخصه رابطه تئوری نیز توانسته است برآورد و دقت خوبی داشته باشد. میانگین قدر مطلق خطای نسبی برآورد طول پرتابه رابطه تئوری حدود ۵/۸٪ است. روابط USBR (1977)، Attari (2002) و تئوری مطابق معیار نش-ساتکلیف در ارزیابی مشخصه طول جت



شکل ۸- مقایسه روابط مختلف تخمین مقدار طول جت پرتابه‌ای در راستای لبه جام در الف- مدل اول ب- و مدل دوم  
Fig. 8 Comparison of different relationships for estimating the length of the jet trajectory along the edge of the flip bucket in a) first model b) second model

روابط خارج از محدوده ۱۰٪ میانگین قدر مطلق خطای نسبی قرار گرفته است. برخی از این روابط مانند Elevatorski (1959) دارای خطای بسیار زیادی از محاسبه طول پرتابه در راستای لبه جام می‌باشند و برخی از روابط نیز مانند Gunko (1965)، Taraimovich and

همچنین به منظور ارزیابی دقت روش‌های مختلف برآورد طول جت خروجی در راستای لبه جام، مقادیر مشاهده‌ای و محاسباتی از روابط مختلف و محدوده ۱۰٪ خطا در شکل (۹) درج می‌باشند. به جز روابط تئوری، USBR (1977)، Kawakami (1973) و Attari (2002) پیش‌بینی سایر

میانگین قدر مطلق خطای نسبی کمتر از ۱۰٪ توانسته‌اند با دقت مناسبی طول پرتابه را در راستای لبه‌ی جام پیش‌بینی نمایند. این روابط به لحاظ معیار نش-ساتکلیف در رده بسیار خوب قرار دارند. علت خطای رابطه Elevatorski (1959) در این است که این معادله را شکل اصلاح شده معادله تئوری مسیر جت پرتابی آزاد اعلام نموده و در آن اثر افت اصطکاک کف تنداب در نظر گرفته نشده است ضمن اینکه در رابطه این محققین مولفه بسیار مهم سرعت جت در خروج از جت در نظر گرفته نشده است که این موضوع می‌تواند خطای بسیار زیادی در برآوردها ایجاد نماید. دلیل خطای نسبتاً زیاد رابطه Taraimovich and Gunko (1980)، ناشی از این است که رابطه تجربی مذکور براساس آزمایش‌هایی بدست آمده است که در آنها، جریان روی سرریز تا حدود ۵۰٪ هوادهی شده باشد این در حالیست که مقادیر هوادهی در مدل‌های مورد آزمایش این پژوهش، متفاوت از این مقدار بوده است. رابطه Attari (2002)، براساس مدل‌های فیزیکی با ابعاد متفاوت در مرکز تحقیقات آب ایران ارائه شده است و مطابق داده‌های اندازه‌گیری شده در این پژوهش پیش‌بینی این رابطه از طول پرتابه قابل قبول اعلام می‌گردد.

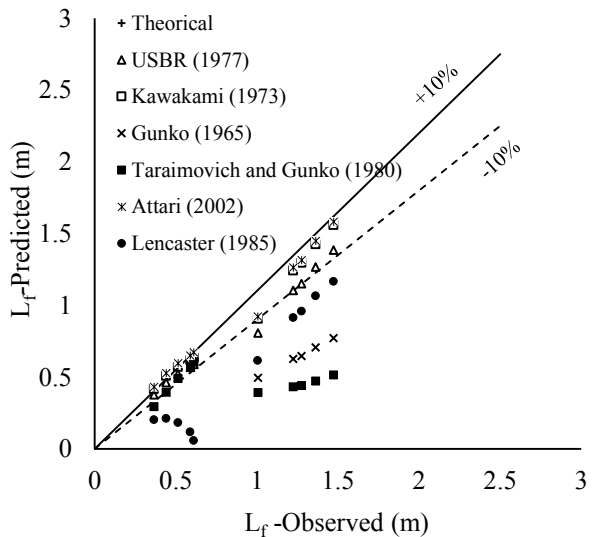
جدول ۲- معیارهای آماری مربوط به ارزیابی روش‌های مختلف برآورد طول جت پرتابه‌ای در راستای لبه جام

Table 2 Statistical criteria related to the evaluation of different methods of estimating the length of the jet trajectory along the edge of the flip bucket

Relationship name	MAPE (%)	R <sup>2</sup>	NMSE	MSE (m <sup>2</sup> )	NSE
Theoretical	10.4	0.984	0.035	0.006	0.965
USBR (1977)	6.9	0.984	0.054	0.009	0.946
Kawakami (1973)	7.4	0.985	0.021	0.003	0.979
Elevatorski (1959)	87.9	0.912	6.095	0.989	-5.095
Gunko (1965)	28.3	0.596	1.195	0.194	-0.195
Taraimovich and Gunko (1980)	35.9	0.013	2.098	0.340	-1.098
Attari (2002)	10.4	0.464	0.035	0.006	0.965
Lencaster (1985)	46.3	0.929	0.770	0.125	0.230

نقطه اوج جت از روابط پروفیل Kawakami (1973) و USBR (1977) استفاده شده است. در جدول (۳) مقادیر مشاهداتی و محاسباتی روابط مختلف برای فاصله افقی نقطه اوج از لبه‌ی جام و حداکثر ارتفاع خیز پرتابه در مدل اول و دوم آورده شده است.

(1980) و Lencaster (1985) طول پرتابه را خیلی کمتر از میزان واقعی آن برآورد نموده‌اند. به‌منظور درک بهتر از دقت این روابط، معیارهای آماری ارزیابی در جدول (۲) درج شده است.



شکل ۹- مقادیر مشاهداتی و محاسباتی طول جت پرتابه‌ای در راستای لبه جام

Fig. 9 Observational and computational values of the length of the jet trajectory along the edge of the flip bucket

جدول (۲) نشان می‌دهد که روابط تئوری، USBR (1977)، Kawakami (1973) و Attari (2002) با

### ۳-۴- مختصات نقطه اوج

ارتفاع و فاصله افقی نقطه اوج پرتابه از راستا و لبه‌ی جام از دیگر مشخصات جت پرتابه‌ای مورد بررسی بوده است. به‌جز رابطه تئوری، رابطه مشخصی برای پیش‌بینی مختصات نقطه اوج ارائه نشده است و در این تحقیق برای تخمین مختصات

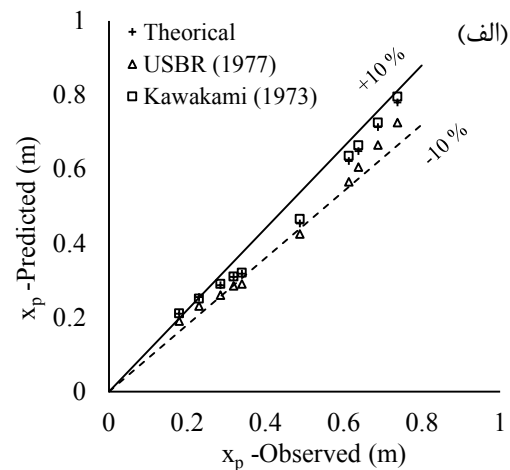
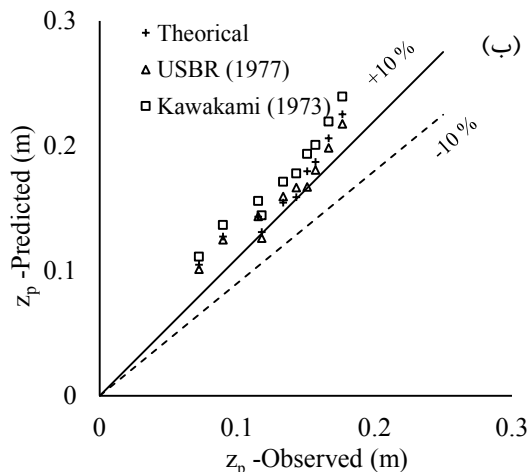
جدول ۳- مقادیر مشاهداتی مختصات نقطه اوج در مدل اول و دوم

Table 3 Observational and computational values of peak point coordinates in the first and second models

Model-Q (l/s)	$x_p$ (m)				$z_p$ (m)			
	Observed	Kawakami	Theoretical	USBR	Observed	Kawakami	Theoretical	USBR
Model1-4.85 L/s	0.219	0.21	0.209	0.19	0.072	0.111	0.105	0.101
Model1-7.51 L/s	0.23	0.25	0.254	0.23	0.089	0.136	0.127	0.125
Model1-10.8 L/s	0.285	0.29	0.286	0.26	0.115	0.156	0.143	0.144
Model1-14.8 L/s	0.318	0.31	0.308	0.285	0.133	0.171	0.155	0.159
Model1-17.1 L/s	0.34	0.32	0.318	0.29	0.143	0.178	0.159	0.166
Model2-9 L/s	0.488	0.465	0.453	0.425	0.118	0.144	0.131	0.126
Model2-12.9 L/s	0.613	0.635	0.622	0.565	0.151	0.193	0.179	0.167
Model2-13.6 L/s	0.638	0.664	0.648	0.605	0.157	0.2	0.187	0.181
Model2-15.5 L/s	0.688	0.725	0.713	0.665	0.166	0.219	0.206	0.198
Model2-17.7 L/s	0.738	0.795	0.78	0.725	0.177	0.239	0.225	0.217

افقی نقطه اوج از لبه جام عمدتاً در محدوده ۱۰٪ خطا واقع شده است. در برآورد مشخصه ارتفاع خیز پرتابه، روابط Kawakami (1973) و USBR (1977)، برآوردهای بیشتر از مقادیر مشاهداتی داشته‌اند.

مقادیر مشاهداتی و محاسباتی فاصله افقی نقطه اوج و حداکثر ارتفاع خیز جت پرتابه‌ای به همراه دامنه خطای ۱۰٪ در شکل (الف) و (ب) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود پیش‌بینی‌های روابط در مشخصه فاصله



شکل ۱۰- مقادیر مشاهداتی و محاسباتی مختصات نقطه اوج در روابط مختلف: الف- فاصله افقی نقطه اوج و ب- ارتفاع خیز

Fig. 10 Observational and computational values of peak point coordinates in different relationships a)  $x_p$  and b)  $z_p$ 

وجود میانگین خطای نسبی بیش از ۲۰٪ ارتفاع خیز پرتابه استخراج شده از پروفیل‌های Kawakami (1973) و USBR (1977) این است که مقادیر در نظر گرفته شده برای ضرایب هوادهی با مدل‌های مورد بررسی متفاوت می‌باشد. در رابطه مسیر پرتابه USBR (1977) مقدار ضریب  $K$  به میزان ۰/۸۵ تا ۰/۹ ارائه شده است که با بررسی این مقدار در این پژوهش مشخص گردید که ضریب هوادهی در مدل‌های مختلف با هم متفاوت است طوری‌که در یکی از مدل‌های پژوهش، این مقدار حدود ۰/۷۳ بوده است. با توجه به میزان واقعی و متفاوتی که بعضاً می‌تواند خارج از محدوده اعلامی USBR (1977) باشد، نباید انتظار داشت که مسیر پروفیل پیش‌بینی با ضریب هوادهی ۰/۹ - ۰/۸۵، کاملاً منطبق بر

مطابق معیارهای آماری، ضریب تعیین، میانگین قدر مطلق خطای نسبی و معیار نش-ساتکلیف رابطه Kawakami (1977) در پیش‌بینی فاصله افقی نقطه اوج به ترتیب برابر ۰/۹۹، ۶٪ و ۰/۹۸ بود همچنین این معیارها در پیش‌بینی‌های رابطه USBR (1977) برابر ۰/۹۹، ۷٪ و ۰/۹۷ بوده است. میانگین قدر مطلق خطای نسبی رابطه‌های تئوری، Kawakami (1973) و USBR (1977) در پیش‌بینی این مشخصه برابر ۲۳/۷، ۳۳/۹ و ۲۱/۴٪ می‌باشد. روابط موجود در برآورد ارتفاع خیز پرتابه در راستای لبه‌ی جام دارای میانگین قدر مطلق خطای نسبی بیش از ۲۰٪ بوده‌اند و از نظر معیار نش-ساتکلیف نیز هیچ‌کدام از این روابط نتوانسته‌اند معیار بسیارخوب را کسب نمایند. دلیل

معیار نش-ساتکلیف این روابط در برآورد طول پرتابه در راستای سطح آب پایین دست، بسیار خوب ارزیابی شده‌اند.

۳- در برآورد طول پرتابه در راستای لبه‌ی جام مطابق ارزیابی صورت گرفته، روابط USBR (1977)، Attaei (2002) و Kawakami (1973) توانسته‌اند برآورد با رده بسیار خوب از نظر معیار نش-ساتکلیف را داشته باشند. رابطه تئوری (تحلیلی) به دست آمده از روابط تئوری حرکت پرتابه در این برآورد دارای میانگین قدر مطلق خطای نسبی حدود ۱۰٪ است این معیار در سایر روابط بیش از ۲۵٪ بوده است.

۴- میانگین قدر مطلق خطای نسبی برای روابط تئوری، Kawakami (1973) و USBR (1977) در برآورد فاصله افقی اوج پرتابه کمتر از ۱۰٪ و در برآورد ارتفاع خیز پرتابه به ترتیب ۲۳/۷، ۳۳/۹ و ۲۱/۴٪ است. هر سه رابطه خطای بالایی در زمینه برآورد ارتفاع خیز پرتابه داشته‌اند و از نظر معیار نش-ساتکلیف نیز هیچکدام از این روابط نتوانسته‌اند معیار قابل قبولی را کسب کنند.

#### دسترسی به داده‌ها

داده‌های استفاده شده در این پژوهش در متن اصلی مقاله استفاده شده است

#### تضاد منافع نویسندگان

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

## References

- Attari, J., Arefi, F., & Golzari, F. (2002). A review on physical models of scour holes below large dams in Iran. *In Proc., 2002 International Workshop on Rock Scour*. EPFL, Lausanne, Switzerland.
- Barani, G. A., & Abbasi-Parvin, E. (2009). *Energy dissipation in hydraulic structures*. Jahad Daneshgahi Publications, Tehran [in Persian].
- Daneshfaraz, R., Ghaderi, A., & Akhtari, A. A. (2020). On the effect of block roughness in ogee spillways with flip buckets. *Fluid*, 5(182), 1-17. DOI: [10.3390/fluids5040182](https://doi.org/10.3390/fluids5040182).

مسیر واقعی باشد. این پارامتر در پیش‌بینی مسیر جت و سایر مشخصات هیدرولیکی آن اثرگذار است. لازم به ذکر است که سایر محققین پژوهش‌های خود را بیشتر در زمینه طول پرتابه ارائه داده و در خصوص مشخصات نقطه اوج پرتابه پژوهشی انجام نشده است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

مشخصات چاله آبکند وابستگی مستقیمی به هیدرولیک یک سیستم مستهلک‌کننده انرژی دارد. مهندسين هیدرولیک بایستی با شناخت دقیق هیدرولیک سیستم مستهلک‌کننده انرژی بتوانند پیش‌بینی مناسبی از هندسه چاله آبکند، محل وقوع آبشستگی و احتمال بروز مشکل برای سازه‌ها و مناطق درجوار جت پرتاب شده از جام داشته باشند. خلاصه نتایج پژوهش ارزیابی دقت روش‌های تعیین مشخصات جت خروجی از جام پرتابی به شرح زیر است.

۱- در ارزیابی روابط پیش‌بینی مسیر جت خروجی، مشخص شد که به لحاظ معیار نش-ساتکلیف رابطه Kawakami (1973) با ضریب NSE برابر ۰/۹ در قیاس با ضریب ۰/۶۸۵ رابطه USBR (1977) بهتر توانسته است مسیر جت را پیش‌بینی نماید.

۲- در پیش‌بینی طول جت پرتابه‌ای در راستای سطح آب پایین دست، به جز روابط USBR (1977) و Attari (2002) سایر روابط، میانگین قدر مطلق خطای نسبی بیش از ۲۰٪ داشته‌اند این میزان خطا در برآوردهای روابط تئوری، USBR (1977) و Attari (2002) کمتر از ۱۰٪ بوده است و مطابق

Ebrahimnezhadian, H., Manafpour, M., & Babazadeh, V. (2020). Simulation of the effect of flip bucket edge angle on flow hydraulic characteristics. *J. Soil Water Res.*, 51(8), 2085-2100. DOI: [10.22059/IJSWR.2020.298275.668509](https://doi.org/10.22059/IJSWR.2020.298275.668509) [In persian].

Emre Ulu, A., Aydın, M. C., & Işık, E. (2022). Energy dissipation potential of flow separators placed in spillway flip bucket. *Adv. Eng. Sci.*, 2, 60-66.

Farzin, S., Karami, H., Fazlollahnejad, M., & Nayyer, S. (2018). Numerical modeling and analysis of flow hydrodynamics in flip bucket and approach channel. *Iran Watershed*

- Manage. *Sci. Eng.*, 12(41), 41-51. DOI: [10.22059/IJSWR.2020.298275.668509](https://doi.org/10.22059/IJSWR.2020.298275.668509) [in Persian].
- Heller, V., Hager, W. H., & Minor, H. E. (2005). Ski jump hydraulics. *J. Hydraul. Eng.*, 131(5), 347–355. DOI: [10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2005\)131:5\(347\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2005)131:5(347)).
- Juon, R., & Hager, W. H. (2000). Flip bucket without and with deflectors. *J. Hydraul. Eng.*, 126(11), 837–845. DOI: [10.1061/\(ASCE\)0733-429\(2000\)126:11\(837\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-429(2000)126:11(837)).
- Kakeshpour, M., Pirestani, M. R., & Zakeri Niri, M. (2016). Numerical simulation of overflow with effect of opening ratio gates on hydraulic of flow and jet trajectory. *J. Water Soil Conserv.*, 23(1), 293-300. DOI: [10.22069/JWFST.2016.3034](https://doi.org/10.22069/JWFST.2016.3034) [in Persian].
- Kakeshpour, M., Pirestani, M. R., & Zakeri Niri, M. (2016). Numerical simulation of jet flow and investigation effect of triangular shape of bucket, and gate opening ratio on flip bucket jet flow characters. *J. Water Soil Sci.*, 26(1), 291-304. [in persian].
- Kamanbedast, A. A., & Aghamajidi R. (2013). Cup Ski Jump Length of the Spillway Using FLOW3D Mathematical Model (Case Study: Gotvand Dam). *Techn. J. Eng. Appl. Sci.*, 3(23), 3399-3404.
- Karami Moghadam, M., Amini, A., Malek, M. A., Mohammad, T., & Hoseini, H. (2019). Physical modeling of Ski-Jump spillway to evaluate dynamic pressure. *Water*, 11(8), 1687. DOI: [10.3390/w11081687](https://doi.org/10.3390/w11081687).
- Karami Moghadam, M., Amini, A., & Hoseini, H. (2020). Experimental evidence dynamic pressures reduction on plunge pool floors downstream flip bucket for increasing downstream face slopes. *Water Suppl.*, 20(5), 1834-1846. DOI: [10.2166/ws.2020.091](https://doi.org/10.2166/ws.2020.091).
- Khatsuria, R. M. (2005). *Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators*, Marcel Dekker Publications, New York. 649 pp.
- Mansouri, R., Moafi, F., Beheshtirad, M., & Karbakhsh, A. (2020). Investigation of hydraulic properties in flip bucket using numerical model. *Iran. J. Irrig. Water Eng.* 10(38), 1-12. DOI: [10.22125/IWE.2019.100719](https://doi.org/10.22125/IWE.2019.100719) [in Persian].
- Mirsalari, F., & Shafai-Bejestan, M. (2020). Study of effect of number of tri-angular deflectors on energy dissipation and jet length at ski-jump spillway. *Irrig. Drain. Struct. Eng. Res.*, 21(78), 117-138. DOI: [10.22092/idser.2019.126593.1394](https://doi.org/10.22092/idser.2019.126593.1394) [in Persian].
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. ASABE*, 50(3), 885-900. DOI: [10.13031/2013.23153](https://doi.org/10.13031/2013.23153).
- Parsaie, A., Dehdar-Behbahani, S., & Haghiabi, A. H. (2016). Numerical modeling of cavitation on spillway's flip bucket. *Front. Struct. Civil Eng.*, 10(4), 438-444. DOI: [10.1007/s11709-016-0337-y](https://doi.org/10.1007/s11709-016-0337-y).
- Parsaie, A., & Haghiabi, A. H. (2021). Hydraulic investigation of finite crested stepped spillways, *Water Suppl.*, 21(5), 2437–2443. DOI: [10.2166/ws.2021.078](https://doi.org/10.2166/ws.2021.078).
- Peterka, A. J. (1958). *Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators*. United States Bureau of Reclamation, Washington, 225 pp.
- Savic, L., Kuzmanovic, V., & Milovanovic, B. (2010). Ski jump design. *Water Management*. 163(10), 523-527. DOI: [10.1680/wama.900052](https://doi.org/10.1680/wama.900052).
- USBR. (1987). *Design of Small Dams*, US Government Printing Office, Washington, 860 pp.
- Anonymous (2003). *Study report on the hydraulic model of the spillway of Gavoshan reservoir dam*. Water Research Insitute [in persian].
- Yavuz, C., Dincer, A. E., & Aydin, I. (2016). Head loss estimation for water jets from flip buckets. *Int. J. Eng. Sci.*, 5(11), 48-57. DOI: [10.9790/1813-05011048057](https://doi.org/10.9790/1813-05011048057).

### How to cite this paper:

Khorami, E., Heidari, M. M. and Ghobadian, R. (2023). Accuracy evaluation of methods for determining jet trajectory characteristics in flip bucket. *Environ. Water Eng.*, 9(3), 499–514. DOI: [10.22034/EWE.2022.368442.1823](https://doi.org/10.22034/EWE.2022.368442.1823)