

The Numerical Investigation of Hydraulic Condition on Flip Bucket Spillways and Effect of Inlet Flow and Shape on it

Hesam Vatandoust^{1*}, Ali Mahdi Abhari²

1- Assistance Professor, Department of Civil Engineering, Parand & RobatKarim Branch, Islamic Azad University, RobatKarim, Tehran, Iran.

2- Undergraduate Aviation student at Civil Aviation Technology.

* hessam.vatandoust@gmail.com

Received: 9 May 2023
Accepted: 4 August 2023
Discussion: 21 June 2024



J. Hydraul.
Iranian Hydraulic Association
Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Since the beginning of the dam construction industry, one of the challenges that engineers have always been involved with is how to reduce the enormous energy of water when it overflows from dams, for which many plans and ideas have been presented so far. One of these ideas is to utilize energy dissipater structures, among which flip buckets are well-known. Since the flip bucket is one of the most important components of a dam, whose destruction disrupts the normal performance of the dam, the engineers have always tried to enhance the efficiency of this component by investigating into the hydraulic conditions such as pressure, depth and velocity. Accordingly, it is of paramount significance to comprehensively study the hydraulic performance and condition of the flip buckets.

Methodology: In this study, the behavior of the fluid in the flip bucket of a dam was modeled using the Flow-3D software. The results, particularly in terms of the Froude number, were compared with data from an existing physical model. After determining the error percentage and selecting the appropriate turbulence model, a model was constructed using the continuity and motion equations from fluid dynamics and the finite volume method. Through a trial-and-error process, Froude numbers ranging from 2 to 7 were selected. The study captured and compared results related to velocity, static pressure, and depth with the geometric characteristics of the bucket and the conditions of incoming flow. The study captured and compared results related to velocity, static pressure, and depth with the geometric characteristics of the bucket and the conditions of incoming flow. To efficiently employ the results, the produced graphs were normalized using a similitude analysis. The comparisons have been made with the non-dimensional ratios of Froude number and x/r (x : distance from the bucket and r : bucket radius) in the middle as well as right and left sides.

Results and Discussion: In order to choose the turbulence model ($K-\varepsilon$, $K-\omega$ and RNG turbulence models were used to compare the results of various models according to previous studies), after analyzing and optimizing the computational error between the numerical and the physical models, the $k-\varepsilon$ model with the minimum rate of error was selected as the best practice. It needs to be noted that the error rate of pressure, velocity and depth are 1.52%, 1.5% and 1.58%, respectively. The results indicated that the velocity changes along the length of the bucket, generally have a slight increasing trend and reach their maximum value at the end of the bucket. In addition, velocity changes have an inverse trend as the Froude number

increase. Moreover, it was observed that the depth changes are almost constant along length of the bucket and reach their minimum value at the end and decrease with the depth as the Froude number increases. Pressure changes also have a decreasing trend along the length of the bucket and also, decrease with increase in the Froude number. The situation of the above parameters in the sides is generally similar to the middle axis, but with a greater intensity

Conclusion: It can be generally stated that the most vulnerable zone of the flip bucket is where $0.1 < x/r < 0.3$ (i.e., the region where flow runs back to the top) in great Froude numbers. This zone is the critical area of the bucket structure due to the decrease in pressure, both in terms of the possibility of cavitations and increasing velocities. Furthermore, it was found that rate of vulnerability in the sides is greater than the middle. Moreover, range of the pre-final Froude numbers of the flow passing through to the bucket, is the turning point of the flow hydraulic condition that needs to be considered while designing this structure.

Keywords: Flip Bucket, Pressure, Depth, Velocity, Flow-3D.



© 2024 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.
This is an open access article distributed under the terms and conditions of
the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)
(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)


بررسی عددی شرایط هیدرولیکی جریان در مستهلک‌کننده‌های جامی و تأثیر نوع جریان ورودی و شکل هندسی بر آن

حسام وطن دوست^{۱*}، علی مهدی ابهری^۲

۱- استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه آزاد پرند و رباط کریم، رباط کریم، تهران، ایران.

۲- دانشجوی مقطع کارشناسی مهندسی هوانوردی - دانشگاه صنعت هوانوردی.

* hessam.vatandoust@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۹، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۱۳، نقد و بررسی: ۱۴۰۳/۰۴/۰۱  وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: یکی از روش‌های کاستن انرژی آب در صنعت سد سازی، استفاده از سازه‌های مستهلک‌کننده مانند پرتاب‌کننده‌های جامی شکل است. در این پژوهش رفتار جریان آب بر روی جام سد آزاد با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D با در نظر گرفتن عدم اختلاط آب و هوا مدل‌سازی شد و پس از انتخاب مدل‌های آشفتگی مختلف، مدل $k-\epsilon$ با خطای پارامترهای فشار، سرعت و عمق به ترتیب ۱/۵۲، ۱/۵ و ۱/۵۸ درصد انتخاب گردید و پس از آن اعداد فرود ۲ تا ۷ در مقطع ورودی به جام ایجاد گردید. نتایج مربوطه با نسبت‌های بی‌بعد عدد فرود و x/t در مرکز و کناره‌ها مقایسه شده که سرعت در طول جام به‌طور کلی روندی افزایشی کمی داشته و در انتهای آن به حداکثر خود می‌رسد و با افزایش اعداد فرود روندی معکوس دارد، عمق در طول تقریباً ثابت بوده و در انتها به حداقل خود می‌رسد و با افزایش عدد فرود کاهش می‌یابد. فشار در طول جام روندی کاهشی داشته و با افزایش عدد فرود کاهش می‌یابد. محدوده اعداد فرود ماقبل نهایی ورودی به پرتاب‌کننده (که تنداب قادر است تولید نماید) نقطه عطف تغییر شرایط هیدرولیکی جریان است که این مهم باید در طراحی این سازه مدنظر قرار گیرد. نهایتاً می‌توان گفت که آسیب‌پذیرترین منطقه پرتاب‌کننده محدوده $0/3 < x/t < 0/1$ (محدوده برگشت رو به بالای سازه) در اعداد فرود بالا است که به دلیل کاهش فشار هم از نظر احتمال وقوع کاویتاسیون و هم از نظر افزایش سرعت‌ها محدوده بحرانی سازه است. همچنین میزان آسیب‌پذیری سازه در کناره‌ها نسبت به قسمت میانی بیشتر است.

کلیدواژگان: پرتاب‌کننده جامی شکل، فشار، عمق، سرعت، Flow 3D.

۱- مقدمه

عملکرد سد را با مسأله همراه می‌کند، همواره مهندسان در تلاش بوده‌اند که با تجزیه و تحلیل فراسنجه‌های مختلف هیدرولیکی عملکرد این سازه را بهبود ببخشند. در این راستا بررسی‌های مختلفی صورت گرفته که اهم آن به شرح زیر می‌باشد.

در حداث سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۲۳ تحقیقات جامع و کاملی در زمینه ارتباط فشارهای پویایی و همچنین جدار خوردگی بالقوه ناشی از فشارهای پویایی با شکل هندسی و شرایط هیدرولیکی جریان با استفاده از مدل‌های مختلف فیزیکی سدهای مختلف بررسی و ارزیابی‌هایی صورت گرفت. این بررسی‌ها به مشخص کردن محدوده‌های پر

به‌طور کلی برای استهلاک انرژی خروجی از سرریز سدها در جهان سازه‌های مختلفی طراحی و اجرا شده است که پرتاب‌کننده‌های جامی شکل نیز در این دسته از سازه‌ها قرار گرفته است. برای افزایش بیشینه‌ای بازدهی، شناخت رفتار هیدرولیکی جریان در این سازه دارای اهمیت زیادی است. این نوع از مستهلک‌کننده‌های بخش مهمی از سامانه پرش اسکی است و در دو نوع جامی ساده و جامی شیاردار یا دندانه‌دار در سرریز سدها به کار می‌روند (Navaei, et al., 2016). باتوجه به آنکه سازه پرتاب‌کننده جامی از اجزای بسیار مهم سد است که تخریب آن

ویژگی‌های هیدرولیکی جریان بر روی پرتابه جامی شکل، با مدل عددی فلونتت در سال ۲۰۱۹ نشان داد شبکه محاسباتی ریز، شرط سرعت ورودی برای مرز ورودی جریان و نیز فشار خروجی برای مرزهایی که با هوا در تماس هستند، بهترین پاسخ‌ها را ارائه می‌دهد. همچنین اعلام شد. مدل آشفتگی (k-ε Standard) سازگارترین مدل با نتایج آزمایشگاهی است (Mansouri et al., 2021). در سال ۲۰۱۷ بررسی‌هایی درباره‌ی تأثیر نوسان‌های فشار و نوع ورودی در جام‌های مرکب انجام شد (Amin-ol-Roayaie et al., 2017). نتایج تحقیق صورت گرفته در سال ۲۰۱۶ که به مقایسه بین مدل‌های عددی در دو نوع پرتاب‌کننده جامی مثلثی و پرتاب‌کننده جامی دایره‌ای می‌پرداخت نشان داد که مدل عددی دارای خطایی معادل ۱۵ درصد می‌باشد (Kakashpour et al., 2016). نتایج بررسی‌های ارائه شده در همان سال بر تأثیر زاویه لبه و شعاع قوس پرتاب‌کننده جامی شکل در میزان استهلاک انرژی، کاهش احتمال رخداد پدیده جدارخوردگی یا حفره‌زایی با افزایش زاویه لبه جام و قابلیت مناسب مدل آشفتگی RNG در پیش‌بینی الگوی سه‌بعدی جریان تأکید داشت (Konjkav et al., 2016a,b). بررسی‌های صورت گرفته بر استهلاک انرژی در سال ۲۰۱۵ بیانگر ارتباط مستقیم استفاده از منحرف کننده و افزایش عدد فرود بر افزایش هدررفت انرژی بود (Sadeghi Askari et al., 2015). همچنین طی بررسی‌هایی که در سال ۲۰۱۲ بر تأثیر طول آستانه و زاویه در پرتاب‌کننده‌های مثلثی بر مسیر کلی پرتابه خروجی صورت پذیرفت، مشخص شد، با افزایش زاویه پرتاب‌کننده، ضخامت جت خروجی کاهش پیدا می‌کند و طول آستانه، تأثیر کمی بر کاهش یا افزایش طول جت خروجی از پرتاب‌کننده را دارد (Omidvari et al., 2012). با توجه به جمیع موارد یاد شده بیشتر بررسی‌های صورت گرفته بر سازه پرتابه جامی شکل، بر میزان استهلاک انرژی و تأثیرپذیری جت خروجی با توجه به تغییر پذیری‌های مختلف شکل سازه تأکید داشته است و بررسی‌های صورت گرفته در زمینه هیدرولیک جریان موردی بوده است. از آنجایی که تاکنون بررسی‌های جامعی به صورت عددی در زمینه ارتباط فراسنجه‌هایی

خطر سازه از نظر شکل هندسی و همچنین شرایط هیدرولیکی جریان در برابر فشارهای پویایی و جدار خوردگی بالقوه پرداخت (Vatandoust, H. et al., 2007a,b; 2021; 2023). بررسی‌هایی در سال ۲۰۲۲ بر روی تأثیر موقعیت قرارگرفتن منحرف کننده‌های مثلثی شکل در پرتاب‌کننده جامی شکل بر استهلاک انرژی و طول پرتابه (به صورت آزمایشگاهی با ۸ دبی و ۴ موقعیت نصب) صورت گرفت (Saki & Shafaei Bejestan, 2022). نتایج بررسی‌های صورت گرفته در همین سال بر روی روش‌های اندازه‌گیری طول جت خروجی از پرتاب‌کننده جامی نشان داد که در پیش‌بینی مسیر جت خروجی از جام، رابطه‌های USBR، عطاری و کاواکامی مناسب می‌باشند (Khorami et al., 2022). بررسی‌های دیگری که در سال ۲۰۲۱ بر روی تأثیر زاویه همگرایی با چهار زاویه همگرایی ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه و تأثیر اضافه کردن دیواره جداکننده با استفاده از منحرف کننده‌ها بر میزان استهلاک انرژی صورت گرفت، نشان داد پرتاب‌کننده‌های جامی در حدود بین ۶۰ تا ۶۵ درصد انرژی جریان را مستهلک می‌کنند و به‌طور کلی با افزایش دبی جریان، میزان استهلاک انرژی کاهش می‌یابد (Molazade et al., 2021). در سال ۲۰۲۰ تجزیه و تحلیل اختلاف فشار و حرکت عرضی در یک پرتاب‌کننده جامی مورد بررسی قرارگرفت و نشان داده شد که اختلاف فشار عرضی بین دیواره جانبی و آب درونی با افزایش فشار ناگهانی در ناحیه بدون چرخش همراه است. این اختلاف فشار منجر به سرعت‌های عرضی می‌شود که منجر به انقباض عرضی جریان آب می‌شود (Deng et al., 2020). در همین سال اثرگذاری‌های منحرف کننده‌های مثلثی بر میزان استهلاک انرژی جام‌های پرتابی شد (Khalifehie et al., 2020) و همچنین بررسی‌هایی درباره‌ی تأثیر تغییر پذیری‌های زاویه لبه جام بر روی فشار هیدرولیکی جریان عبوری، عمق و سرعت جریان خروجی و چگونگی توسعه جت خروجی از پرتابه جامی شکل، انجام گرفت و نشان داده شد که مدل k-ε RNG و مدل‌های همانند برای تحلیل جریان مناسب می‌باشد (Ebrahimnezhadian et al., 2020). نتایج بررسی‌های صورت گرفته در بررسی

توسط مجری پژوهش صورت گرفته است. به طور کلی مدل‌های فیزیکی هزینه‌ی ساخت و تولید بسیار بالاتری نسبت به مدل عددی دارد افزون بر آن همواره محدودیت‌های ناشی از اعمال تغییرپذیری‌ها در مدل فیزیکی بنا به علت‌های مختلفی از جمله محدودیت فضا، هزینه‌های مالی و... وجود دارد، از این رو مدل عددی همواره مورد توجه محققان امروزی بوده و تلاش برای بهبود آن‌ها و همچنین کمک به تکمیل نتایج مدل‌های فیزیکی مستمر است. در این بررسی‌ها نیز در مدل فیزیکی پرتاب کننده جامی شکل سد آزاد به دلیل محدودیت‌های آزمایشگاهی تنها امکان ایجاد اعداد فرود ۷ تا ۱۳ بوده است، اما با وجود مدل عددی محدودیت‌های مرتبط با اعداد فرود کوچکتر تا حد زیادی برطرف و سبب بررسی شرایط هیدرولیکی در اعداد فرود کمتر از ۷ شد. برای واسنجی مدل عددی، مناسب بودن مدل و مشخص شدن میزان خطای احتمالی، که در ادامه به آن اشاره می‌شود، نتایج مدل‌سازی عددی با مدل آزمایشگاهی با استفاده از ویژگی‌های جریان در عدد فرود ۷ ارزیابی و مقایسه شد و پس از مشخص شدن موارد یاد شده به بررسی تاثیر جریان ورودی و ارتباط آن با شکل هندسی پرتاب کننده جامی به ویژه در اعداد فرود پایین تر از ۷ پرداخته شده است. به طور کلی می‌توان گفت که این پژوهش مکمل تحقیقات دیگر می‌باشد. لذا در این پژوهش



Fig. 1 physical model

شکل ۱ تصویر مدل فیزیکی

مانند عمق، سرعت و فشار با هیدرولیک جریان ورودی و شکل سازه بر روی سازه پرتاب کننده جامی صورت نگرفته است و یا اینکه بررسی‌ها در اعداد فرود ورودی پایین تر از محدوده ۶ الی ۷ خیلی کم می‌باشد؛ لذا انجام بررسی و ارزیابی‌های جامع در زمینه شناخت هیدرولیک جریان و ارتباط آن با شکل هندسی پرتاب کننده و نوع جریان ورودی در پرتاب کننده جامی شکل به ویژه در اعداد فرود پایین ضروری به نظر می‌رسد.

۲- مواد و روش‌ها

همان‌گونه که بیان شد لزوم انجام بررسی‌های تکمیلی در زمینه شناخت هیدرولیک جریان و ارتباط آن با شکل هندسی پرتاب کننده ضروری است. از این رو در این پژوهش به بررسی فراسنجه‌های هیدرولیکی سرعت، فشار ایستایی و عمق با اعداد فرود مختلف ورودی به پرتاب کننده و نسبت طول به شعاع سازه - با استفاده از مدل عددی در نرم افزار Flow-3D - بر روی مدل سازه پرتاب کننده جامی شکل سد آزاد که در مقیاس مدل فیزیکی در مؤسسه تحقیقات آب ایران ساخته شده پرداخته می‌شود. برای ساخت مدل عددی از ویژگی‌های مدل فیزیکی سازه پرتاب کننده جامی شکل سد آزاد (شکل ۱) که در مؤسسه تحقیقات آب ایران با مقیاس ۱:۳۳/۳، به شعاع پرتاب کننده ۳۵ سانتی متر و عرض ۷۰ سانتی متر با نسبت $B/r=2$ (که در آن B عرض پرتاب کننده جامی و r شعاع آن می‌باشد) با شیب ورودی از تنداب ۳۶/۴٪ و زاویه‌ی مرکزی سازه پرتاب کننده ۴۶/۱۴ درجه با استفاده از پلکسی گلس - با زبری معادل با شیشه که در منبع‌های مختلف از ۰/۰۰۸ تا ۰/۰۱۱ ارائه شده - ساخته، استفاده شده است. همچنین اندازه‌گیری‌ها بر روی مدل فیزیکی با استفاده از ابزارهای موجود در آزمایشگاه مؤسسه تحقیقات آب - برای ثبت فشارهای ایستایی از پیژومتر، اندازه گیری‌های مربوط به سرعت با استفاده از لوله پیتو و اندازه گیری مربوط به عمق با استفاده از شاخص و خط کش مدرج در محل پیژومترها -

نسبت بی بعد x/r (x فاصله از مرکز پرتاب کننده و r شعاع پرتاب کننده) صورت گرفته است. شکل ۲ نشان دهنده ی نگاره نمای کلی پرتاب کننده و عامل های یادشده می باشد.

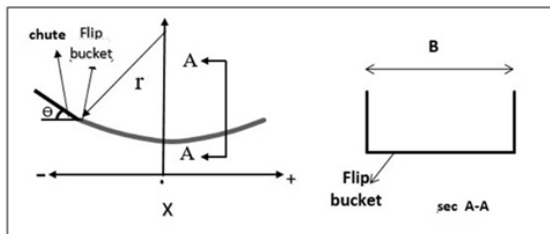


Fig. 2 Flip Bucket schematic

شکل ۲ نمای کلی پرتاب کننده جامی

پس از ساخت هندسه مدل و انتقال آن به نرم افزار FLOW-3D برای واسنجی مدل، از مقایسه داده های برداشت شده در مدل فیزیکی و داده های اندازه گیری شده در روی مدل عددی در عدد فرود γ ورودی به پرتاب کننده جامی استفاده شد. لازم به یادآوری است میزان دقت برداشت اطلاعات در مدل فیزیکی با توجه به واسنجی ابزار اندازه گیری آزمایشگاهی و کاربر انسانی مشخص می شود. اما برای این تحقیق که بررسی و ارزیابی عددی می باشد، برای مشخص شدن دقت اطلاعات برای برداشت داده ها از پیرومترهای مربوطه - برابر دستور کار نرم افزار - در آغاز جریان باید به پایداری برسد. بدان معنا که میزان اختلاف یک فراسنجه با میزان بعدی محاسبه شده ی خودش کمتر از 10^{-5} درصد باشد. از آنجا که جریان در این تحقیق در حالت پایدار می باشد عمق، سرعت و فشار برابر دستورکار نرم افزار خطایی کمتر از 10^{-5} درصد نسبت به نوسان های خود را دارند.

نظر به آنکه در یک مدل عددی پاسخ های نهایی باید مستقل از شبکه بندی باشند، بدین منظور در این تحقیق برای به دست آوردن یک شبکه بهینه از روش سعی و خطا استفاده شده است. بدین ترتیب که برای مسئله مورد نظر در آغاز مسئله با یک شبکه اولیه حل شده و نتایج آن با حل همان مدل با یک شبکه ریزتر و دیگر شرایط یکسان نسبت به مدل فیزیکی مقایسه شده است. در صورت اختلاف بیش از ۲ درصد دوباره هندسه با همان بندی ریزتر

به بررسی عددی پرتاب کننده جامی شکل بدون دندانه سد آزاد - سدی سنگ ریزه ای با هسته رسی در ۴۰ کیلومتری غرب سنندج در استان کردستان ساخته شده است - پرداخته می شود. این سد اکنون ظرفیت تولید ده مگاوات ساعت برق را داشته و با تکمیل یک نیروگاه تلمبه ذخیره ای اضافی امکان تولید ۵۰۰ مگاوات ساعت برق را خواهد داشت.

از آنجایی که نرم افزار FLOW-3D قادر است دامنه گسترده ای از جریان سیال ها را مدل کند، لذا در این تحقیق از این نرم افزار برای مدل سازی عددی پرتاب کننده جامی استفاده شده است. نرم افزار FLOW-3D برای مدل کردن جریان های سطح آزاد سه بعدی غیرماندگار کاربرد فراوانی دارد. در این نرم افزار از روش حجم سیال برای حل معادله های حاکم بر جریان در شبکه بندی منظم قائم استفاده می شود. پس از بررسی های اولیه، چگالی سیال ورودی (ρ)، دبی ورودی (Q)، سرعت ورودی (V)، گرانشی سیال ورودی (μ)، شتاب گرانشی (g)، فاصله از وسط پرتاب کننده جامی (x)، زاویه مرکزی پرتاب کننده جامی (θ)، عرض پرتاب کننده جامی (B)، شعاع پرتاب کننده جامی (r)، عمق جریان (d) و شیب ورودی (s) به عنوان عامل های مؤثر بر جریان در پرتاب کننده های جامی انتخاب شدند. با در نظر گرفتن سه متغیر تکرار شونده سرعت ورودی، عرض پرتاب کننده و چگالی، فراسنجه های بدون بعد x/r ، B/r ، عدد فرود (Fr)، d/B ، عدد رینولدز (Re)، s و θ به دست آمد. پس از تجزیه و تحلیل، تأثیر فراسنجه های s در عدد فرود جریان ورودی و θ در نسبت x/r بررسی می شود. با توجه به این واقعیت که جریان در ناحیه پرتاب کننده آشفته بوده، فراسنجه عدد رینولدز نیز قابل حذف است. همچنین از آن جایی که بررسی ها تنها روی یک مدل فیزیکی صورت گرفته که دارای یک عرض می باشد، بنابراین بررسی تاثیر نسبت B/r امکان پذیر نمی باشد؛ لذا، این بررسی بر روی دو فراسنجه مؤثر که عبارت اند از عدد فرود ورودی (همه اعداد فرود مربوط به انتهای تنداب و ورودی پرتاب کننده جامی) و نسبت طول به شعاع پرتاب کننده تمرکز دارد. بنابراین همه مقایسه ها با نسبت بی بعد عدد فرود و همچنین با

پژوهشگران در پی نداشته است.

جدول ۱ میزان خطاهای محاسبه شدنی

Table 1 error percentages

Froude 7	Pressure (Pa)	Depth (m)	Velocity (m/s)
E.V.	17.3	0.07	5.9
N.V.	17.038	0.0711	5.813
Error (%)	1.514451	1.547117	1.474576
Max Error (%)	1.52	1.58	1.5

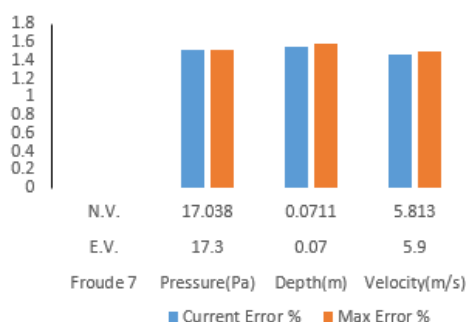


Fig. 3 error percentages

شکل ۳ نمودار میزان خطاهای محاسبه شدنی

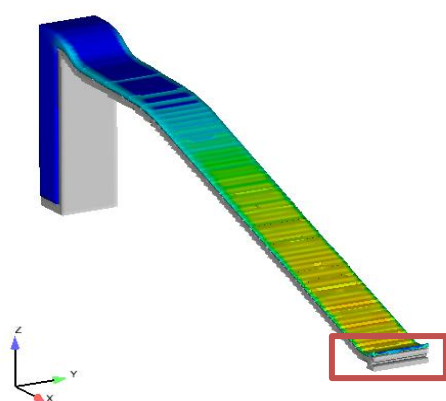


Fig. 4 model overview with overall positions of Extraction Points

شکل ۴ نمای کلی مدل ساخته شده به همراه محل قرارگیری پیزومترها

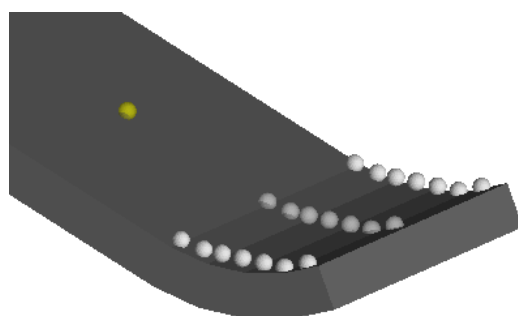


Fig. 5 Extraction Points Right view

شکل ۵ محل پیزومترها، نمای از راست

تجزیه و تحلیل شده است. این کار تا جایی ادامه پیدا کرده تا نتایج به دست آمده کمتر از ۲ درصد اختلاف یابند. پس از تجزیه و تحلیل و بهینه سازی خطای محاسبه شدنی، خطای فراسنجه های مورد بررسی فشار، سرعت و عمق برابر جدول ۱ و شکل ۳ (برای یک پیزومتر به طور نمونه) آورده شده است. اما بیشترین میزان خطا برای فراسنجه های فشار، عمق و سرعت به ترتیب ۱/۵۲، ۱/۵ و ۱/۵۸ درصد نسبت به مدل فیزیکی در عدد فرود و پیزومتر یکسان می باشد. لازم به یادآوری است شمار کل سلول های محاسبه شدنی برابر با ۷۷۵۰۱۰ عدد می باشد.

برای انتخاب مدل آشفتگی با توجه به نتایج و بررسی های پیشین از مدل های آشفتگی $k-\epsilon$ ، $k-\omega$ و RNG استفاده شد که در نهایت مدل $k-\epsilon$ با کمترین خطا به میزان ۱/۵۲ درصد به عنوان مدل آشفتگی نهایی انتخاب شد. پس از مشخص شدن میزان خطاها و مدل آشفتگی، نرم افزار برای اندازه گیری سرعت، عمق و فشار ایستایی در یک بازه زمانی مشخص ۱۳ ثانیه ای، که در آن مدل به پایداری می رسد، اجرا و در پیزومترهای مشخص شده در محدوده های چپ، راست و مرکز، نتایج خروجی استخراج شد. محدوده قرارگیری پیزومترهای یاد شده در نمای کلی مدلسازی، در شکل ۴ و بزرگنمایی محدوده در شکل های ۵ و ۶ نشان داده شده است. لازم به یادآوری است از آنجایی که نوسان های فشار به همراه جدا خوردگی عامل های زیان بار برای سازه می باشند به منظور بررسی عددی دقیق و عمیق تر تأثیر ویژگی های جریان و شکل هندسی پرتاب کننده بر این عامل ها تنها استفاده از نرم افزار Flow-3D کافی نیست و بهتر است از نرم افزارهای دیگری چون Ansys و Abaqus نیز استفاده شود که مدل ها و سامانه های مش بندی به نسبت دقیق تری برای تحلیل جریان و سازه به طور همزمان دارند که در زمینه موارد یاد شده تحلیل بهتری را می توانند ارائه دهند. لذا این موارد در این ارزیابی مورد بحث واقع نشده اند.

باتوجه به این که آزمایش های مربوط به مدل فیزیکی با همکاری مؤسسه تحقیقات آب ایران به صورت رایگان انجام شده و همچنین مدل عددی در دستگاه های شخصی اجرا شده انجام این تحقیقات هیچ هزینه مالی برای

محدوده $0.1 < X/r < 0.2$ به بیشترین سرعت خود می‌رسد که این محدوده، محدوده تغییر شکل سازه و برگشت به بالای آن است. البته این روند در زمینه عدد فرود ۷ صدق نمی‌کند. از آنجایی که عدد فرود ۷ در دبی بسیار کمی رخ می‌دهد، لذا کاهش سرعت توجیه پذیر است. تغییر پذیری‌های سرعت در محورهای چپ و راست پرتاب‌کننده جامی شکل در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. روند کلی تغییر پذیری‌های سرعت در کناره‌ها به‌طور کلی برابر با محور مرکزی بوده؛ اما تغییر پذیری‌های آن شدیدتر و حتی در اعداد فرود پایین‌تر مشهودتر است که این روند می‌تواند ناشی از اثر گذاری‌های دیواره جام بر تغییر مسیر خطوط جریان باشد. در زمینه تغییر پذیری‌های سرعت

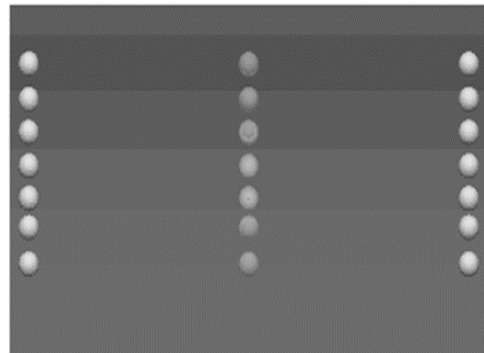


Fig. 6 Extraction Points Top view
شکل ۶ محل پیژومترها، نمای از بالا

در این تحقیق دمای آب ۲۰ درجه سلسیوس، وزن مخصوص آب ۹۹۸/۲ کیلوگرم بر مترمکعب، لزوجت پویایی 0.001003 پاسکال در ثانیه و شتاب ثقل 9.81 متر بر مجذور ثانیه انتخاب شده است. همچنین برای ساخت مدل برای کف و دیواره‌ها از شرایط مرزی دیوار (wall) و ورودی و خروجی از شرایط مرزی به ترتیب specified pressure و Outflow و سطح آزاد آب از شرایط مرزی symmetry استفاده شده است.

۳- بحث و بررسی

پس از ساخت مدل در نرم‌افزار و واسنجی آن با استناد به داده‌های قابل اطمینان موجود در نقطه‌های ثابت و مشخص روی سازه و باتوجه به شرایط در دسترس و منطقی بودن شرایط مدل‌سازی اقدام به اجرای مدل شده و با سعی و خطا، اعداد فرود ۲ تا ۷ در مقطع ورودی به پرتاب‌کننده جامی شکل برای بررسی تأثیر شرایط جریان ورودی ایجاد شده است. لازم به یادآوری است اعداد فرود کمتر از ۲ به دلیل حجم غیرمنطقی بار آب و تغییر پذیری‌های بسیار جزئی نسبت به عدد فرود ۲ بررسی نشده‌اند.

شکل شماره ۷ مشخص‌کننده روند تغییر پذیری‌های سرعت در طول جام است. در این شکل محور افقی نسبت بی‌بعد X/r و محور قائم سرعت است.

با بررسی نمودار سرعت در مرکز مشخص می‌شود که به‌طور کلی سرعت روندی افزایشی کمی داشته و در انتهای پرتاب‌کننده به بیشترین سرعت خود می‌رسد. همچنین در

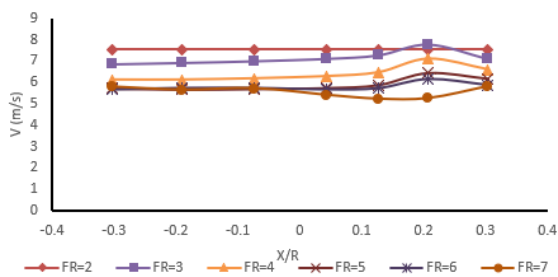


Fig. 7 Velocity Based on x/r
شکل ۷ سرعت بر حسب X/r در مرکز

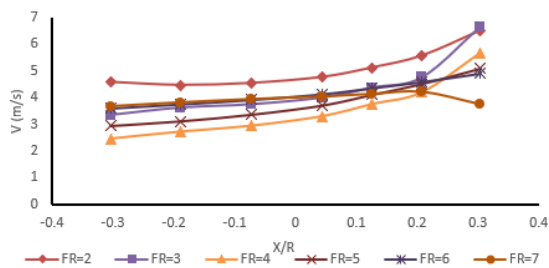


Fig. 8 Velocity Based on x/r left
شکل ۸ سرعت بر حسب X/r در چپ

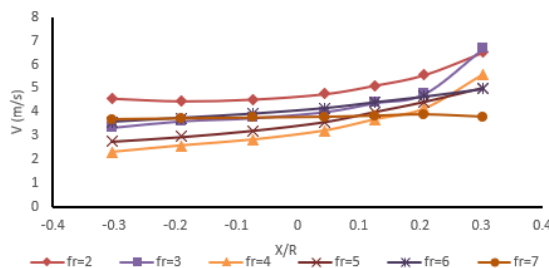


Fig. 9 Velocity Based on x/r right
شکل ۹ سرعت بر حسب X/r در راست

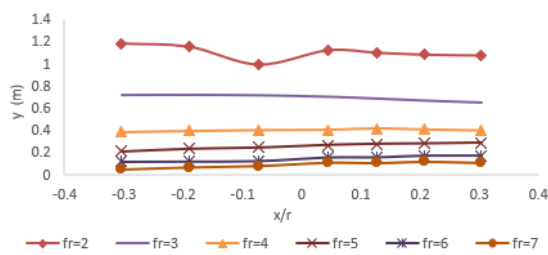


Fig. 12 Depth Based on x/r right
شکل ۱۲ عمق بر حسب x/r در راست

محور قائم فشار بر حسب متر است.

با بررسی نمودار فشار در مرکز مشخص می‌شود که به‌طور کلی فشار روندی کاهشی داشته و در انتهای پرتاب‌کننده به کمترین میزان خود می‌رسد. همچنین در محدوده $0/3 < x/r < 0/1$ این روند کاهشی بسیار شدید بوده که این محدوده، محدوده تغییر شکل سازه و برگشت آن رو به بالا است. در این محدوده میزان کاهش در اعداد فرود پایین‌تر شدیدتر است که در زمینه عدد فرود ۷ این روند کاهشی در محدوده $0/2 < x/r < 0/1$ صدق نکرده و افزایشی است. پس از عبور از محدوده یاد شده، بار دیگر میزان‌ها کاهش می‌یابد. در $x/r = 0/3$ مدل در اعداد فرود ۵ تا ۷ دچار فشار منفی شده و رخداد پدیده جدارخوردگی یا حفره‌زایی در خروجی سازه پرتاب‌کننده محتمل است. از آنجایی که اعداد فرود ۶ و ۷ در دبی بسیار کمی رخ می‌دهد، لذا کاهش و ایجاد فشار منفی توجیه‌پذیر است. تغییر پذیری‌های فشار در محورهای چپ و راست پرتاب‌کننده جامی شکل در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است. روند کلی تغییر پذیری‌های فشار در کناره‌ها به‌طور کلی برابر با محور مرکزی بوده؛ اما محدوده کاهشی در سمت راست کوچک‌تر شده و کاهش میزان‌های فشار به بازه $0/3 < x/r < 0/2$ محدود می‌شود. روند کاهشی در اعداد فرود پایین‌تر، مشهودتر است. در زمینه تغییر پذیری‌های فشار می‌توان گفت به‌طور کلی با افزایش نسبت x/r فشار کاهش می‌یابد.

شکل ۱۶ بیانگر روند تغییر پذیری‌های سرعت نسبت به عدد فرود می‌باشد. در این شکل محور افقی اعداد فرود و محور قائم سرعت می‌باشد.

می‌توان گفت به‌طور کلی با افزایش نسبت x/r سرعت افزایش می‌یابد.

شکل ۱۰ مشخص‌کننده روند تغییر پذیری‌های عمق در طول جام می‌باشد. در این شکل محور افقی نسبت بی‌بعد x/r و محور قائم عمق می‌باشد.

با بررسی نمودار مشخص می‌شود که به‌طور کلی عمق روندی ثابت داشته و در انتهای پرتاب‌کننده به کمترین میزان خود می‌رسد. در این محدوده در اعداد فرود بالاتر میزان کاهش کمتر است، به‌طوری‌که در عدد فرود ۷ این روند به کلی برعکس بوده و در طول، عمق افزایشی اندک می‌یابد. از آنجایی که عدد فرود ۷ در دبی بسیار کمی رخ می‌دهد؛ لذا افزایش عمق به دلیل کاهش سرعت توجیه‌پذیر است. تغییر پذیری‌های عمق در محورهای چپ و راست پرتاب‌کننده جامی شکل در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است. روند کلی تغییر پذیری‌های عمق در کناره‌ها به‌طور کلی برابر با محور مرکزی بوده و در زمینه تغییر پذیری‌های عمق به‌طور کلی می‌توان گفت با افزایش نسبت x/r عمق به میزان بسیار کمی کاهش و با تقریب خوبی ثابت می‌ماند.

شکل ۱۳ نشان‌دهنده روند تغییر پذیری‌های فشار در طول جام است. در این شکل محور افقی نسبت بی‌بعد x/r و

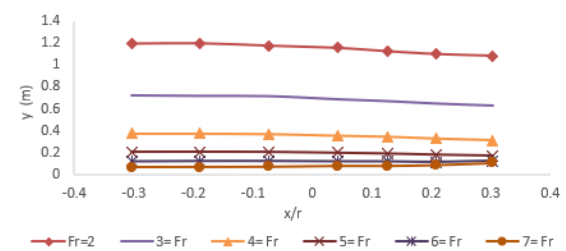


Fig. 10 Depth Based on x/r
شکل ۱۰ عمق بر حسب x/r در مرکز

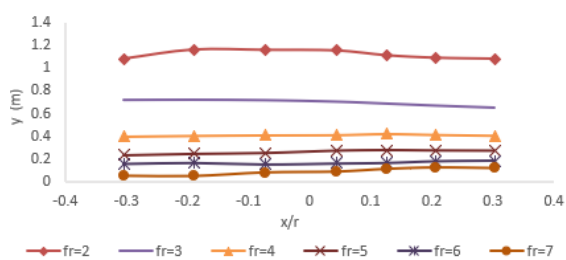


Fig. 11 Depth Based on x/r left
شکل ۱۱ عمق بر حسب x/r در چپ

عطف نمودار و بازگشت دوباره به روند کاهشی می باشد. در زمینه تغییر پذیری های سرعت نیز می توان گفت به طور کلی با افزایش عدد فرود سرعت کاهش می یابد.

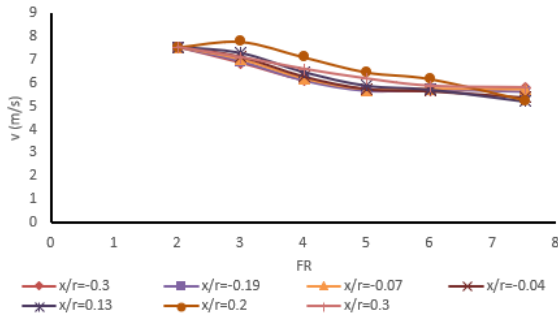


Fig. 16 Velocity Based on Fr
شکل ۱۶ سرعت بر حسب عدد فرود در مرکز

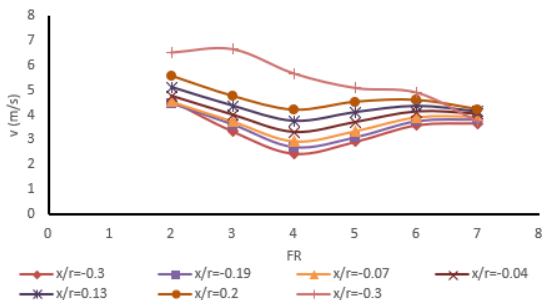


Fig. 17 Velocity Based on Fr left
شکل ۱۷ سرعت بر حسب عدد فرود در چپ

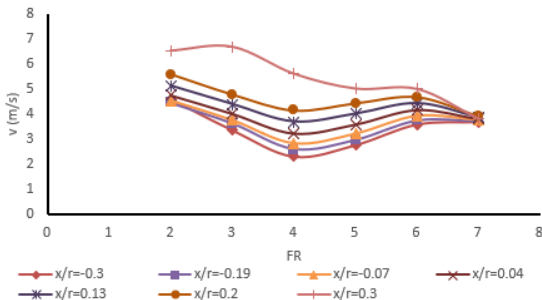


Fig. 18 Velocity Based on Fr right
شکل ۱۸ سرعت بر حسب عدد فرود در راست

شکل ۱۹ بیانگر تغییر پذیری های عمق نسبت به عدد فرود می باشد. در این شکل محور افقی اعداد فرود و محور قائم عمق می باشد.

با بررسی نمودار عمق در مرکز مشخص می شود که به طور کلی عمق روندی کاهشی داشته و در عدد فرود ۷ به کمترین میزان خود می رسد. همچنین این روند کاهشی تا

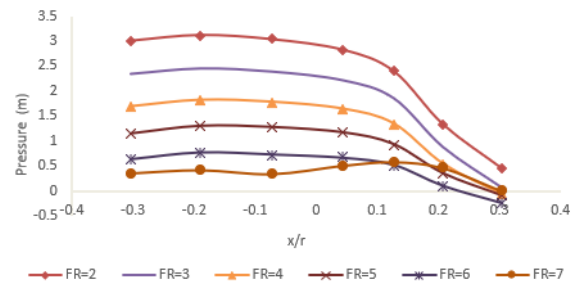


Fig. 13 Pressure Based on x/r
شکل ۱۳ فشار ایستایی بر حسب x/r در مرکز

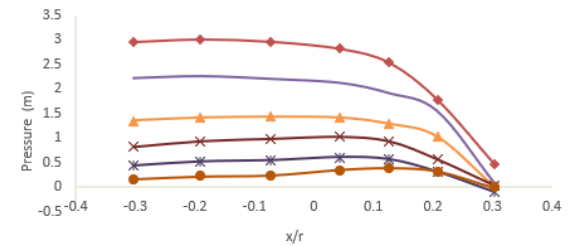


Fig. 14 Pressure Based on x/r left
شکل ۱۴ فشار ایستایی بر حسب x/r در چپ

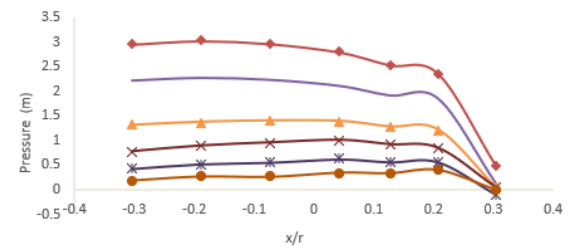


Fig. 15 Pressure Based on x/r right
شکل ۱۵ فشار ایستایی بر حسب x/r در راست

با بررسی نمودار سرعت در مرکز مشخص می شود که به طور کلی سرعت روندی کاهشی داشته و در عدد فرود ۷ به کمترین میزان خود می رسد. همچنین در محدوده $Fr < 6$ از شدت روند کاهشی کاسته شده است. لازم به یادآوری است روند کاهش سرعت با عدد فرود در x/r های بزرگتر شدیدتر بوده که این روند در نسبت $x/r = 0/2$ مشهود است. تغییر پذیری های سرعت در محورهای چپ و راست پرتاب کننده جامی شکل در شکل های ۱۷ و ۱۸ نشان داده شده است. روند کلی تغییر پذیری های سرعت در کنارها به طور کلی برابر با محور مرکزی و کاهشی بوده؛ اما در محدوده $6 < Fr < 4$ افزایشی بوده و عدد فرود ۶ نقطه

و محور قائم فشار می‌باشد. با بررسی نمودار فشار در مرکز مشخص می‌شود که به‌طور کلی با افزایش عدد فرود از میزان فشار کاسته می‌شود. همچنین این روند کاهشی در عدد فرود ۶ برای نسبت‌های $0 < x/r < 0.3$ تغییر کرده و افزایش یافته و عدد فرود ۶ نقطه عطف نمودار می‌باشد. شایان یادآوری است در محدوده $5 < Fr < 7$ فشار وارد محدوده منفی شده که رخداد پدیده جدار خوردگی یا حفره‌زایی محتمل می‌باشد. به دلیل آنکه اعداد فرود بالا در دبی و عمق‌های بسیار کم شکل می‌گیرد در نتیجه کاهش فشار به محدوده فشارهای منفی توجیه‌پذیر می‌باشد. تغییر پذیری‌های فشار ایستایی در محورهای چپ و راست پرتاب‌کننده جامی شکل در شکل‌های ۲۳ و ۲۴ نشان داده شده است. روند تغییر پذیری‌های فشار با عدد فرود در کناره‌ها نیز کاهشی است که این روند در قسمت خروجی پرتاب‌کننده جامی شکل شدت بسیار کمتری داشته است.

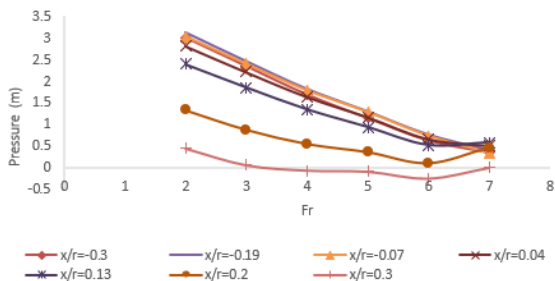


Fig. 22 Pressure Based on Fr

شکل ۲۲ فشار ایستایی بر حسب عدد فرود مرکز

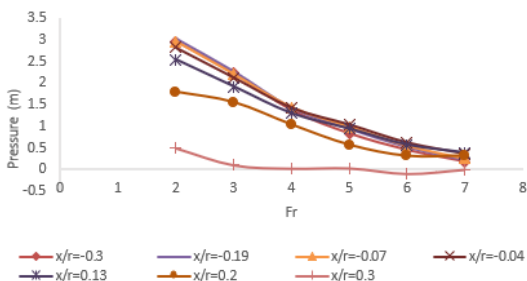


Fig. 23 Pressure Based on Fr left

شکل ۲۳ فشار ایستایی بر حسب عدد فرود چپ

عدد فرود ۶ شدید بوده و پس از آن به تقریب متوقف می‌شود. این امر ناشی از تشکیل اعداد فرود ۶ و ۷ در دبی‌های پایین و در نتیجه عمق‌های کم می‌باشد. تغییر پذیری‌های عمق در محورهای چپ و راست پرتاب‌کننده جامی شکل در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ نشان داده شده است. روند کلی تغییر پذیری‌های عمق به‌طور کلی کاهشی می‌باشد.

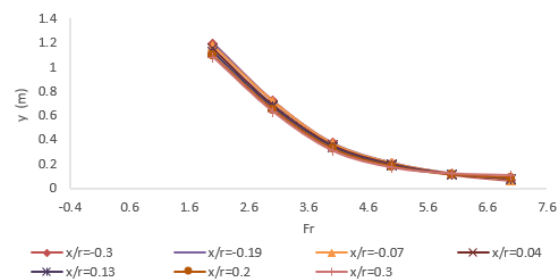


Fig. 19 Depth Based on Fr

شکل ۱۹ عمق بر حسب عدد فرود در مرکز

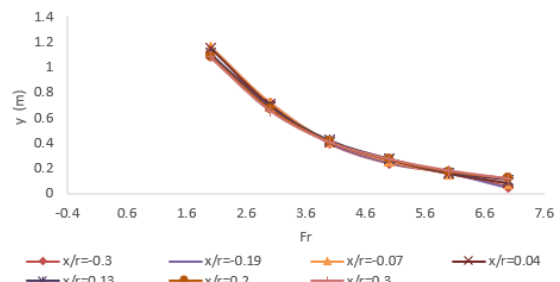


Fig. 20 Depth Based on Fr left

شکل ۲۰ عمق بر حسب عدد فرود در چپ

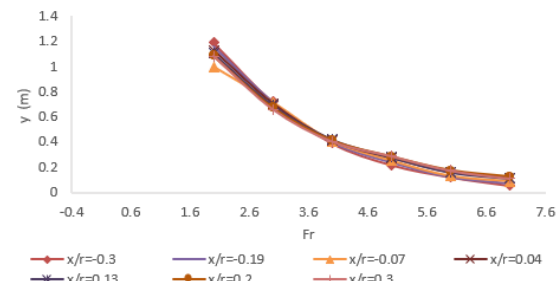


Fig. 21 Depth Based on Fr right

شکل ۲۱ عمق بر حسب عدد فرود در راست

شکل ۲۲ بیانگر روند تغییر پذیری‌های فشار ایستایی نسبت به عدد فرود می‌باشد. در این شکل محور افقی اعداد فرود

طوری طراحی شود تا عدد فرود ورودی به پرتاب کننده در هنگام عملکرد سازه، هماهنگ با اعداد فرود بالا و نهایی که تنداب می تواند تولید کند نباشد. بررسی ها نشان می دهد که آسیب پذیرترین منطقه پرتاب کننده جامی محدوده $0/1 < x/r < 0/3$ (محدوده برگشت رو به بالای سازه) در اعداد فرود بالا می باشد. این محدوده به دلیل کاهش فشار از نظر احتمال رخداد جدا خوردگی یا حفره زایی و از نظر افزایش سرعت ها محدوده بحرانی سازه پرتاب کننده جامی شکل می باشد. همچنین نتایج بررسی ها نشان داد که شرایط هیدرولیکی در کناره های سازه تا حدودی همانند قسمت میانی با آشفتگی های بیشتر می باشد که نشان دهنده میزان آسیب پذیری بیشتر سازه در کناره ها نسبت به قسمت میانی می باشد که این تفاوت نیز بهتر است در هنگام طراحی قسمت های جانبی سازه مد نظر قرار گیرد. به طور کلی محدوده اعداد فرود پیش از نهایی ورودی به پرتاب کننده (که تنداب قادر است تولید کند) نقطه عطف تغییر شرایط هیدرولیکی جریان می باشد که این مهم نیز باید در طراحی این سازه مدنظر قرار گیرد.

۵- منبع ها

Amin-o-roayaie Yamini, O., Kavianpour, M.R., Mousavi, H.S., Movahedi, A. & Bavandpour, M. (2018). Experimental investigation of pressure fluctuation on the bed of compound flip buckets. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 24(1), 45-52. DOI: 10.1080/09715010.2017.1344572

Deng, J., Wangru, W., Tian, Z., Zhang, F. & Yang, Z. (2020). Analysis of Pressure Differences and Water Transverse Movement in a Partial-Flip Bucket. *Journal of Hydraulic Engineering*, 146(9), 04020063. [https://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001780](https://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001780).

Ebrahimnejadian, H., Manafpour, M. & Babazadeh, V. (2020). Simulation of the Effect of Flip Bucket Edge Angle on Flow Hydraulic Characteristics. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(8), 2085-2100. (in Persian)

Kakeshpour, M., Pirestani, M.R. & Zakeri Niri, M. (2017). The effect of the shape in flip bucket thrower shot by using a numerical model. *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(5), 223-237. (in Persian)

Khalifehei, K., Sadeghi Askari, M. & Azamathulla,

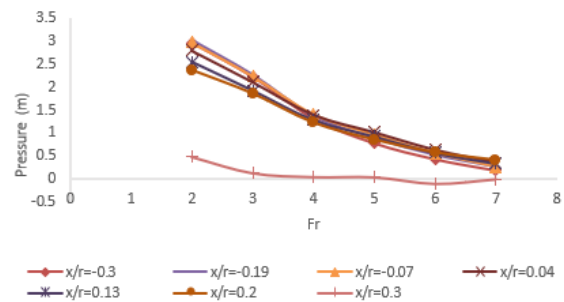


Fig. 24 Pressure Based on Fr right

شکل ۲۴ فشار ایستایی بر حسب عدد فرود راست

۴- نتیجه گیری

بررسی های صورت گرفته در زمینه صحت سنجی نتایج به دست آمده از نرم افزار Flow-3D نسبت به مدل آزمایشگاهی نشان داد که فراسنجه های فشار، عمق و سرعت به ترتیب دارای خطای ۱/۵۲٪، ۱/۵۸٪ و ۱/۵٪ می باشد. همچنین مدل آشفتگی k-ε نیز مدل مناسبی می باشد که موارد یاد شده موید نتایج به دست آمده از بررسی های پیشین صورت گرفته می باشد. بررسی های صورت گرفته نشان داد که محدوده بحرانی از نظر سرعت در انتهای پرتاب کننده و در محدوده $0/1 < x/r < 0/2$ که سرعت به بیشترین میزان خود می رسد، می باشد. تغییر پذیری های فشار نیز به طور کلی در طول پرتاب کننده روندی کاهشی داشته و در انتهای پرتاب کننده به کمترین میزان خود می رسد که در محدوده $0/1 < x/r < 0/3$ این روند کاهشی بسیار شدید بوده و همچنین تغییر پذیری های عمق نیز با اینکه در طول جام تغییر چندانی ندارد، اما در قسمت انتهایی جام به کمترین میزان می رسد. به طور کلی می توان گفت محدوده تغییر شکل سازه و برگشت رو به بالای آن از نظر آسیب پذیری ناشی از سرعت های بالا و کاهش فشار محدوده بحرانی سازه می باشد. بررسی تغییر پذیری های فشار با عدد فرود نشان داد که با افزایش عدد فرود از میزان فشار کاسته می شود و فشار در اعداد فرود ۵ تا ۷ منفی شده و رخداد پدیده جدا خوردگی یا حفره زایی در خروجی سازه پرتاب کننده محتمل می باشد. به طور کلی با افزایش عدد فرود افزایش احتمال آسیب پذیری سازه بر اثر مسأله های ناشی از کاهش فشار وجود دارد. بنابراین بهتر است ابعاد سازه

- Saki, N. & Shafaei Bejestan, M., (2022). Experimental Investigation of the Wedge-Shaped Deflector Installation Position Effects on the Flip Bucket Spillway Energy Dissipation. *Journal of Hydraulics*, 17(2), 87-106. (in Persian)
- Vatandoust, H., Khosrowjerdi, A. & Kavianpour, M.R. (2007a). Investigating the probability of Cavitation considering Dynamic Pressures in Flip Bucket. 6th Iranian Hydraulic Conference - Shahrekord, Iran, IHC06_170. (in Persian)
- Vatandoust, H., Khosrowjerdi, A. & Kavianpour, M.R. (2007b). Examining the Pressure Fluctuations Coefficients in Flip Bucket Spillways. - 3rd National Congress on Civil Engineering – Tabriz, Iran. (in Persian)
- Vatandoust, H., Khosrowjerdi, A. & Kavianpour, M.R. & Manshouri, M. (2012). The Impact of Froude Number on Pressure Fluctuations over Flip Bucket Spillways. *World Applied Sciences Journal*, 16(3), 397-402.
- Vatandoust, H., Yarmohammadi, H. & Kavianpour, M.R. (2021). Investigation of supercritical flow and shape of flip bucket spillways on coefficients of dynamic pressure. *Journal of Energy Resources Technology*, 143(6), 061301, <https://doi.org/10.1115/1.4048524>.
- Vatandoust, H., Yarmohammadi, H.R. & Aliyari, T. (2022). Investigation of Hydraulic conditions and shape of flip bucket spillways on Cavitation phenomenon by considering dynamic pressures. *Journal of Energy Resources Technology*, 145(4), 043102. <https://doi.org/10.1115/1.4056277>.
- H. (2022). Experimental investigation of energy dissipation on flip buckets with triangular deflectors. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 28(1), 292-298, DOI: 10.1080/09715010.2020.1775716.
- Khorami, E., Heidari, M.M. & Ghobadian, R. (2020). Evaluation of the accuracy of the methods of determining the jet trajectory characteristics in Flip bucket. *Environment and Water Engineering*, 9(4), 499-514. (in Persian)
- Konjkav, M., Kavianpour, M., Vatandoust, H. & Khosrojerdi, A. (2016a). Numerical analysis of the geometrical performance of flip bucket spillway on hydraulic parameters and cavitation phenomenon. Third International Conference on Modern Research in Civil Engineering, Architecture, Urban Management and the Environment. (in Persian)
- Konjkav, M., Kavianpour, M., Vatandoust, H. & Khosrojerdi, A. (2016b). Numerical simulation of the performance of the geometric configuration of the flip bucket spillway on the energy dissipation of two-phase flow ski jumping. The second international conference on man, architecture, civil engineering and the city, ICOHACC02_150.6. (in Persian)
- Mansouri, R., Moafi, F., Beheshtirad, M. & Karbakhsh, A. (2019). Investigation of Hydraulic properties in Flip Bucket Using Numerical Model. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 10(2), 1-12 (in Persian)
- Mollazadeh, A, Azizyan, Gh. R. & Beirami, M.K. (2020). Energy Dissipation of Converged Ski-jump Buckets by using Dividing Wall. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(5), 489-492
- Navaei, B, Akhtari, AA. & Daneshfaraz, R. (2016). Experimental Study of Flip Bucket Effect at the End of Ogee Spillway on Energy Dissipation and Jet Length, *The Journal of Water and Soil Science*, 26(3-2), 133-142
- Omidvarinia, M. & Musavi-Jahromi, H. (2012). Effect of approach length and angle of ski jump on the outlet trajectory. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 1(4), 1-18. (in Persian)
- Sadeghi Askari, M., Mousavi, H. & Ghomeshi, M. (2016). Investigation the Effect of Wedge-Shaped Deflector Length and Angle in Energy Dissipation on the Flip Bucket Spillway. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering*, 39(4), 225-235. (in Persian)