

Analysis of Hydrodynamic Forces Over Steep Slope Flip Bucket Embankment (Case Study: Jareh Dam)

Gholamhossein Akbari^{1*}, Hamed Sarkardeh², Iman Lotfi³, Ehsan Sadri Firouzabadi⁴

1- Associate Professor, Department of Water and Hydraulic Structures, Bojnord University, Bojnord, Iran.

2- Associate Professor, Department of Water and Hydraulic Structures, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran.

3- Master's student, Department of Water and Hydraulic Structures, Bojnord University, Bojnord, Iran.

4- Master's, Department of Water and Hydraulic Structures, University of Sistan and Baluchistan, Zahedan, Iran.

* akbari@ub.ac.ir

Received: 19 April 2024

Accepted: 2 September 2024

Discussion: 23 September 2025



J. Hydraul.

Iranian Hydraulic Association

Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Each dam is comprised of numerous auxiliary structures, with flood discharge adjustment structure being the most dissipater of turbulent energy to reduce dam failure. Large dams primarily utilize lower drains and spillways within these structures for flood discharge. In a brief timeframe, spillways and lower outlets must be capable of expelling a volume of water equivalent to the largest possible flood in the dam's catchment area. Failure to carry out this task confidently may result in the flood overflowing the dam crest, leading to significant damage to the dam and its associated facilities. In many cases, this can lead to dam failure. Various types of energy dissipaters have been employed to dissipate flow energy so far, including simple, compound, and toothed energy dissipaters. Typically, energy dissipaters are positioned at the terminus of chute weirs, tunnel weirs, and horizontal channels provided that the topographic and geological conditions are suitable. From a geometric perspective, simple energy dissipaters are further categorized into two types: cup-shaped and triangular-shaped, with the former being more prevalent. A cup-shaped energy dissipater features axial curvature along the longitudinal axis in the direction of flow.

Methodology: Traditionally, researchers have utilized laboratory models to study the flow on launchers resulting in shot overflows and dynamic pressure. Experiments have provided criteria for designing launchers, and the optimal launcher shape selection has been determined through constructing hydraulic models. Previously, dynamic pressures on Cup Launcher beds were calculated using piezometric methods. This research aims to analyze pressure and force fluctuations on cup-shaped launcher beds, specifically examining inclined shot overflows. Through a combination of existing experiments and numerical methods, this study considers speed and pressure values within the available capabilities and options. Furthermore, utilizing Heger's pressure distribution equation, the power distribution on the hydraulic model of Jarah Dam was determined in experimental tests.

Results and Discussion: The dimensionless diagram of relative force, relative pressure, and force distribution at the bottom of the bucket has been tested in Jared overflow at various landing numbers. It is important to note that the bucket's length in the overflow of the jar is $L_t=19.08$, with the maximum pressure value occurring at $x_{max}=9.8098$. Therefore, the final value for the relative location $X=x/x_{max}=95/100$ is equal to 1. The maximum pressure is situated inside the cup within a range of $x_{pm} = \{(0.45), (0.6) L_t\}^2$, while the minimum pressure is more likely to occur at two points in the cup,

$x_{pin} = \{(0.1), (0.9) Lt\}$. The force fluctuations display a range of positive and negative values, aligning closely with analytical and laboratory studies. The discrepancy within the range of $(0.7-0) L$ is less than 28% error, which is deemed acceptable in examining the force fluctuations through experimental studies. It is noteworthy that while the flow in the laboratory model is developed, it appears uniform in the numerical model, resulting in significant disparities at the onset. This disparity is further exacerbated by the differing nature of the laboratory setting compared to the numerical model, which utilizes average Navier–Stokes equations, contributing to errors. Moreover, the error variance within the range of $(0.7, 0.9)L$ is attributed to the increased minimum and maximum power coefficients with rising flow rates and declining Froude numbers, resulting in the smallest difference at the cup launcher's periphery.

Conclusion: The presence of the launcher at the end of the shot overflow generates dynamic pressure on the bed at the shot's end. However, this pressure's impact is less pronounced compared to channels without a slope, attributable to the shot slope's presence. The launcher nearly reaches the cup's bottom, creating maximum pressure head. Maximum pressure is observed inside the cup within the x_{pm} range of $(0.45, 0.6) Lt$. Conversely, minimum pressure is likely to occur in two cup locations, $p_{in} = (0.1, 0.9) Lt$. The force magnitude from analytical and numerical calculations aligns well with the force values, as depicted in Figure 4. The overall error percentage in the desired overflow is approximately 35% within the interval L $(0.8-0)$. This discrepancy is attributed to a constant input number in the integral. In the discussion regarding the minimum force locations in the buckets, XP_{min} is around 0.1 and 0.6, where the force reaches its lowest value and the required slab thickness is minimal within that range. One reason for this issue is the decrease in the angle α within this range, diminishing centrifugal force. This situation transforms the flow into one akin to an open flow, with a numerical calculation difference of around 5% on a horizontal surface.

Keywords: Cup Launcher, FLOW-3D, Pressurized Flow, Accelerating Force, Slab Design, Dam Jareh.

بررسی و تحلیل نیروهای هیدرودینامیکی در پرتاب کننده جامی سد (مطالعه موردی: سد جره)

غلامحسین اکبری^{۱*}، حامد سرکرده^۲، ایمان لطفی^۳، احسان صدری فیروزآبادی^۴

۱- دانشیار، گروه آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران.

۲- دانشیار، گروه آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران.

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران.

۴- کارشناسی ارشد، گروه آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

* akbari@ub.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۳۱، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۲، نقد و بررسی: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱

وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: هر یک از سدها دارای تعداد زیادی از سازه‌های کمکی هستند از جمله سرریزها از اصلی‌ترین اجزاء آن هستند که باعث کاهش انرژی جنبشی و تخریب سد می‌شوند. سدهای بزرگ برای سرازیر شدن و تخلیه سیلاب به پایین دست از این سازه‌ها استفاده می‌کنند. در چارچوب زمانی کوتاهی سرریزها و تخلیه کننده‌های پایین دست سد باید قادر به انتقال ماکزیمم سیلاب‌های پخش شده در سطح حوضه آبریز بالا دست سد باشند. با نقص فنی در سیستم سرریز بطور قطع نتیجه آن عبور سیلاب از روی تاج سد و امکان آسیب جدی به سد و تاسیسات وابسته به آن را به همراه خواهد داشت. در بسیاری از موارد این امر باعث تخریب سد هم شده است. انواع سرریزهای پخش کننده و کاهنده انرژی جریان شامل آرواره ای و با سطح مقطع ساده و شکل هندسی ترکیبی و ناهموار وجود دارند. با توجه به نوع و تیپ سد سرریز پرتابی در قسمت‌های بیرونی بدنه دارای یک سطح شوت به همراه یک تونل هدایت کننده در مسیر یک کانال مستقیم قرار گرفته که متناسب با شرایط توپوگرافی و زمین شناسی محل طراحی شده است. از نظر شکل هندسی جریان پخش شونده بصورت هایی از شکل جام پرتابی و لبه تیز مثلثی شکل بیشتر مورد توجه قرار دارند. در این تحقیق از جمله سرریزهایی که از لحاظ اقتصادی بسیار با صرفه‌اند، پرتاب کننده جامی شکل در نظر گرفته شده است. در طراحی و اجراء این پرتاب کننده‌ها، طراحی بر مبنای بیشینه فشار و نیرو صورت می‌گیرد که باعث طراحی با ابعاد بزرگتر از حد نیاز، از نظر اقتصادی و هم از لحاظ زمان اجرا خواهد شد. در این بررسی و ارزیابی با استفاده از حل تحلیلی معادله‌های حاکم بر توزیع فشار به وسیله انتگرال گیری معین و با استفاده از روش گاما معادله توزیع نیرو به دست آمده است. در آغاز با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی سد جره، توزیع فشار به دست آمد و با استفاده از توزیع فشار، توزیع نیرو نیز به دست آمده است، سپس برای بررسی نتایج به دست آمده از طریق روش عددی، از نرم‌افزار FLOW-3D، استفاده شده است که در مرحله‌های تحلیل از روش حجم محدود (Volume of Fluid) برای تعیین جریان سطح آزاد و پس از آن با FAVOR (Fractional of Area/Volume Representation) برای در نظر گرفتن بازدارنده‌ها در میدان جریان استفاده شده است. با به کارگیری مدل‌های عددی فشار و سرعت سد یاد شده، معادله‌های فشار و نیرو برای آن به دست آمده است، این نتایج عددی با نتایج تحلیلی به دست آمده بررسی و مقایسه شد. از نتایج به دست آمده درصد خطای مطالعات نظری و عددی ۲۸ درصد و از نظر تغییر پذیری‌های مکان و جابه‌جایی ۵ درصد می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از توزیع نیرو، یک طراحی بسیار منطقی از لحاظ اقتصادی برای حجم و میزان بتن‌ریزی سرریز مورد نظر ارائه گردید.

کلیدواژگان: پرتاب کننده جامی، FLOW-3D، جریان تحت فشار، نیروی تند شونده، طراحی دال، سد جره.

۱- مقدمه

است. (Fraser 2016) اما مشکل بزرگ این جریان‌ها این است که آن‌ها در طول سال جریان یکنواختی ندارند و اغلب حجم عمده آب آن‌ها در زمان و فصل‌های خاصی از

جریان‌های سطحی به علت کیفیت مناسب و آسانی برداشت همواره یکی از منبع‌های اصلی تامین آب بوده

خاکی) بررسی و طراحی هر چه بهینه‌تر این نوع مستهلک‌کننده انرژی جریان امری ضروری به نظر می‌رسد. (Torres و Matos and Meireles (2014) و Mansilla (2018) تاکنون صدها پرتاب‌کننده در سراسر جهان احداث شده‌اند ولی استانداردهای جامعی برای طراحی پرتاب‌کننده‌ها ارائه نشده است. Wuthrich et al. (2021) و Chanson (2014) علت این امر پیچیدگی‌های زیاد جریان، هندسه سازه و عدم شناسایی همه فراسنجه مهم (هیدرولیکی و هندسه) در استخراج همه فراسنجه طراحی می‌باشند. (Abbas and Yang et al. (2019) و Tanaka (2022) برای تحلیل هیدرولیکی پرتاب‌کننده‌ها باید همه فراسنجه مهم طراحی از جمله عمق جریان ورودی، سرعت جریان ورودی، شعاع و زاویه جت پرتابی و نیز نوسان‌های فشار جریان تعیین شود. Chanson & Feleder (2017) و Siskos (2023) برای استخراج چنین فراسنجه‌هایی از رابطه‌های پیشنهادی محققان، رابطه‌های نظری، مدل‌های آزمایشگاهی و عددی می‌توان استفاده کرد.

تحقیقات زیادی در زمینه پرتاب‌کننده جامی صورت گرفته است. (ArefPour & FathiMoghadam (2012) با انجام بررسی‌های آزمایشگاهی بر روی پرتاب‌کننده‌های جامی شکل منتهی به آبراهه منشوری افقی، هیدرولیک پرتاب‌کننده را بررسی کردند. یکی از ویژگی‌های هیدرولیکی که بررسی شد، بیشینه فشار پویایی پیرومتری و توزیع فشار در بستر پرتاب‌کننده بود. این آزمایش‌ها در دو حالت با و بدون منحرف‌کننده بر روی کف پرتاب‌کننده انجام شد و نتایج نیز با هم مقایسه شد.

(Yamini et al. (2020) با انجام بررسی‌های آزمایشگاهی، توزیع فشارهای دینامیک در بیشتر پرتاب‌کننده‌های جامی را با استفاده از مدل فیزیکی و تحلیل داده‌های آزمایشگاهی بررسی کردند. پرتاب‌کننده‌های مورد بررسی هیچ انحنایی در پلان نداشته‌اند و بدون هرگونه منحرف‌کننده‌ای جهت انحراف جریان از کف یا در لبه‌های جام می‌باشند. بدین منظور تغییر پذیری‌های فشار در سه موقعیت عرضی (وسط و کناره‌ها) و در موقعیت‌های طولی مختلف با دبی‌های مختلف در محدوده $(3/5-7/5)$

سال جاری می‌شود و به همین دلیل در مسیر این جریان‌ها سازه‌های کنترل و ذخیره‌سازی جریان آب بنا می‌شود. (Castillo et al. (2016) و Pereira (2020) اشاره نمودند که در مخزن این نوع سدها حجم آب بسیار زیادی ذخیره می‌شود. (Hojjati & Salehi (2014) بیان کردند به همین دلیل وجود یک طراحی مناسب سازه‌های وابسته در آنها از اهمیت خاصی برخوردار است. هر سد از شمار زیادی سازه جانبی تشکیل شده است که یکی از مهم‌ترین آن‌ها سازه‌های تخلیه‌کننده سیلاب می‌باشد (Ghazayel & Haselsteiner و Coombs (2016). (Beaudoin, 2023 and Trifkovic (2019) از جمله این سازه‌ها می‌توان به تخلیه‌کننده‌های زیرین و سرریزها اشاره کرد که در سدهای بزرگ اغلب از آن‌ها برای تخلیه سیلاب استفاده می‌شود. (Freitas (2020) و Douglas et al. (2018) سرریزها و تخلیه‌کننده‌های زیرین باید قادر باشند تا حجم آب برابر با بزرگترین سیلاب محتمل در حوزه آبریز سد را در مدت زمان کوتاهی تخلیه کنند. Castillo and Carrillo (2017) اگر این کار با اطمینان کافی انجام نگیرد سیلاب از روی تاج سد عبور کرده و آسیب زیادی به سد و تاسیسات جانبی آن وارد می‌کند و در بسیاری اوقات نیز این امر باعث شکست سد خواهد شد. Khalifehei et al. (2020) و Ghanizadeh (2017) تاکنون انواع پرتاب‌کننده‌ها برای استهلاک انرژی جریان به کار رفته‌اند که می‌توان به پرتاب‌کننده ساده، پرتاب‌کننده‌های مرکب و دندانه‌دار اشاره کرد. (Matos et al (2022) و Qajarieh (2012) پرتاب‌کننده‌ها به طور معمول در انتهای سرریزهای تنداب (شوت)، سرریزهای تونلی و آبراهه‌های (کانال‌های افقی) اگر شرایط ناهمواری (توپوگرافی) و زمین‌شناسی مناسب باشد، استفاده می‌شوند. (Koen et al. (2019) پرتاب‌کننده‌های ساده نیز از نقطه نظر هندسه به دو نوع جامی شکل و مثلثی شکل تقسیم می‌شوند که نوع جامی آن بیشتر رایج است. (Chen (2015) و Moreira (2021) پرتاب‌کننده جامی شکل در راستای محور طولی در جهت جریان دارای یک انحنای محوری می‌باشد.

با توجه به کاربرد گسترده پرتاب‌کننده‌های ساده در سرریزهای شوتی و تونلی سدهای بزرگ (سدهای بتنی و

از روش‌های فنی عددی پیشرفته‌ای برای حل معادله‌های سه‌بعدی حرکت سیال در مسئله‌های چند فاز استفاده می‌کند. امروزه این نرم‌افزار برای مدل کردن جریان‌های سطح آزاد سه‌بعدی نامانگار با هندسه پیچیده کاربرد فراوانی دارد. (Wahl & Falvey (2022) در این نرم‌افزار از روش حجم سیال (VOF) برای محاسبه سطح آزاد استفاده می‌شود. برای شناسایی مرزهای جامد، این نرم‌افزار از روش فنی عددی پیشرفته و انحصاری FAVOR استفاده می‌کند. استفاده از این روش فنی باعث شده که شبکه‌بندی و هندسه، مستقل از یکدیگر باشند. معادله‌های حاکم بر جریان، معادله‌های ممتنم و پیوستگی هستند که شامل متغیرهای VOF و FAVOR بوده و برای یک جریان تراکم ناپذیر به صورت زیر هستند.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial x} + g_x + f_x \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial y} + g_y + f_y \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial z} + g_z + f_z \quad (3)$$

در رابطه‌های بالا متغیرهای u ، w ، v مبین سرعت در جهت‌های x ، y ، z ، V_F جز حجمی باز برای جریان A_x ، A_y ، A_z مساحت جزئی باز برای جریان در جهت‌های x ، y ، z شتاب گرانش g_x ، g_y ، g_z در جهت‌های مربوطه، f_x ، f_y ، f_z شتاب‌های گرانشی (ویسکوز) در جهت‌های مربوطه، t زمان، P فشار و ρ چگالی (دانسیته) سیال می‌باشد.

همچنین برای محاسبه نیروی نسبی بر حسب مکان نسبی در سد و برای فشار نسبی بر حسب مکان نسبی در سد و برای توزیع نیرو در طول جام (باکت) در سد با عدد فرودهای مختلف به ترتیب از رابطه‌های زیر به دست می‌آید.

$$F^* = \frac{F_p}{F_{max}} \quad (4)$$

$$P^* = \frac{P_p}{P_{max}} \quad (5)$$

$$F_P = P_{max} * \int P * dx \quad (6)$$

۲-۲- منطقه مورد مطالعه

سد مخزنی جره خاکی با هسته رسی بر روی رودخانه زرد

مترمکعب‌برثائیه) توسط پیژومترهای نصب شده اندازه‌گیری شده‌اند.

در این پژوهش نیز به ارائه روشی برای تجزیه و تحلیل تنش و تغییر شکل که تحت بارگذاری دینامیکی قرار می‌گیرد، که هدف تجزیه و تحلیل بارگذاری ایستایی (استاتیکی) و دینامیکی خواهد بود. در این زمینه، شرایط بارگذاری استاتیکی، ممکن است تنها به عنوان یک شکل خاص از بارگذاری دینامیکی نگاه شود لذا در این پژوهش به بررسی نیروهای وارد بر بستر پرتاب کننده‌های جامی پرداخته می‌شود تا به وسیله آن بتوان طراحی مناسبی برای دال کف پرتاب‌کننده‌ها داشت و نیز توزیع نیرو دینامیکی به همراه بیشینه نیرو دینامیکی و محل رخداد آن مشخص شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معادله‌های حاکم در پژوهش

به طور کلی تاکنون بررسی جریان بر روی پرتاب‌کننده‌های منتهی به سرریزهای تنداب (شوت) و فشار پویایی (دینامیکی) از طریق مدل‌های آزمایشگاهی صورت گرفته است. تا جایی که معیار طراحی پرتاب‌کننده‌ها به صورت تجربی ارائه شده است و انتخاب شکل بهینه پرتاب‌کننده از طریق ساخت مدل‌های هیدرولیکی بوده است. تاکنون محاسبه فشارهای پویایی (دینامیکی) وارد بر بستر پرتاب‌کننده‌های جامی از نوع پیژومتری (فشارهای دینامیکی با پیژومتر برداشت شده است) بوده است. در این پژوهش سعی شده است تا نوسان‌های فشار و نیرو در بستر پرتاب‌کننده‌های جامی شکل منتهی به سرریزهای شوت شیبدار، در دامنه توانایی و اختیارات موجود با استفاده از آزمایش‌های انجام شده دیگران، و نیز مقدار محاسبه شده در روش عددی برای سرعت و فشار بررسی و مورد ارزیابی قرارگیرد. در این پژوهش با استفاده از معادله توزیع فشار هگر، توزیع نیرو در آزمایش‌های تجربی بر روی مدل هیدرولیکی از سد جره انجام شده، به دست آمده است.

نرم‌افزار Flow-3D یک بسته نرم‌افزاری جامع در زمینه دینامیک سیال‌های محاسبه‌ای است. این بسته نرم‌افزاری

۳۷۴ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. مدل هیدرولیکی سد جره با مقیاس ۱:۵۰ طراحی شده است که نمای از مدل هیدرولیکی پرتاب‌کننده و موقعیت اندازه‌گیری فراسنجه‌های هیدرولیکی در پرتاب‌کننده در این سد در شکل ۱، ارائه شده است.

در ۳۵ کیلومتری شمال شرق شهر رامهرمز در استان خوزستان قرار دارد. طول رودخانه زرد ۷۸ کیلومتر و سطح حوزه آن ۸۰۰ کیلومترمربع می‌باشد، آبدهی سالانه رودخانه زرد در یک دوره ۱۲ ساله به طور میانگین ۹۷ میلیون مترمکعب و بیشینه آبدهی لحظه‌ای معادل

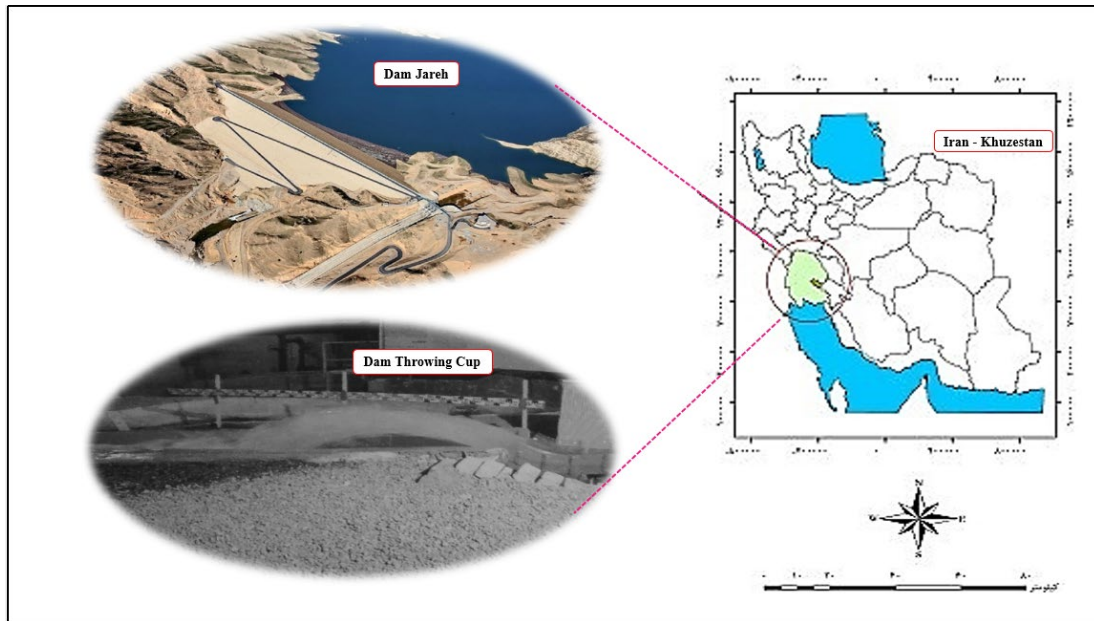


Fig. 1 Schematic diagram of Jareh dam throwing cup in Ramhormoz city of Khuzestan province

شکل ۱ طرح نمایی جام پرتابی سد جره در شهرستان رامهرمز استان خوزستان

بالا می‌باشد. در شکل ۴ نمودار توزیع نیرو در طول جام در سد جره با عدد فرودهای مختلف را نشان داده شده است. با توجه به نمودارها نیز می‌توان این طور استنباط کرد که هرچه عدد فرود نیز بزرگتر می‌شود میزان نیرو کمتر می‌شود، زیرا با افزایش سرعت در طول باکت زمان کمتری

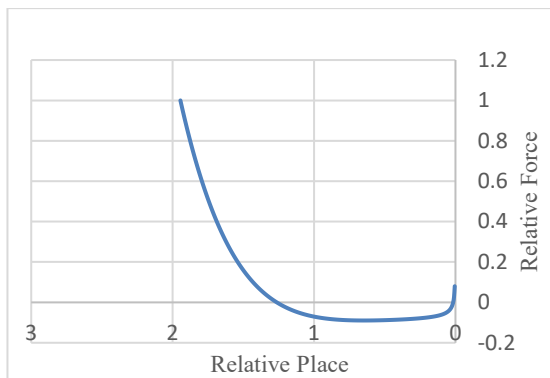


Fig. 2 Diagram of Relative Force according to Relative Place in Jareh Dam

شکل ۲ نمودار نیروی نسبی بر حسب مکان نسبی در سد جره

۳- نتایج و بحث

۳-۱- محاسبه نیروی نسبی و فشار نسبی

با توجه به اینکه در سرریز جره نیز در عددهای فرود مختلف آزمایش شده است، بنابراین نمودار بی‌بعد نیروی نسبی، فشار نسبی و توزیع نیرو بر روی کف جام به صورت زیر خواهد بود. البته باید در نظر گرفت از آنجایی که طول جام در سرریز جره $L = 19.08$ متر می‌باشد و نیز مقدار بیشینه فشار نیز در $X_{max} = 9.8098$ متر می‌باشد، بنابراین آخرین مقدار برای مکان نسبی $X = X/X_{max} = 1/95$ می‌باشد. در شکل ۲ نمودار نیروی نسبی بر حسب مکان نسبی در سد جره و همچنین در شکل ۳ نمودار فشار نسبی بر حسب مکان نسبی در سد جره نشان داده شده است.

بیشینه فشار در درون جام و در محدوده‌ای از $x_{pm} = \{(0.45), (0.6)\}L_t$ رخ می‌افتد ولی کمینه فشار در دو محل از جام $x_{pin} = \{(0.1), (0.9)\}L_t$ احتمال رخداد آن

مدل‌های عددی متنوعی ساخته شده و جریان بر روی آنها شبیه‌سازی شده است. هدف از این مدل‌سازی بررسی تغییرپذیری و رفتار جریان می‌باشد تا بتوان درباره‌ی روند تغییرپذیری ویژگی‌های جریان اظهار نظر کرد. نتایج به دست آمده از مدل‌سازی عددی شامل توزیع فشار و توزیع سرعت است. ویژگی‌های مدل عددی در جدول ۱ آمده است.

در ادامه نتایج مربوط به مدل‌سازی عددی ارائه شده‌اند. ابتدای پرتاب‌کننده بر روی مبدا مختصات قرار گرفته است. در شکل ۵ سرعت پرتاب‌کننده سد جره و همچنین در شکل ۶ توزیع فشار کل در پرتاب‌کننده سد جره نشان داده شده است.

جدول ۱ ویژگی‌های مدل عددی

Table 1 Specifications of the numerical model

Dam type	Jareh
Scale	1:50
Q (m ³ /s)	1500
Depth of inlet flow in the channel before the launcher (m)	2.383
Initial speed (m/s)	32.7
The Froude number of the throwing cup	6.76
Throwing cup width (m)	25
Throwing cup radius (m)	25
Launcher length (m)	19.08
Chute Spillway tilt angle	13.50

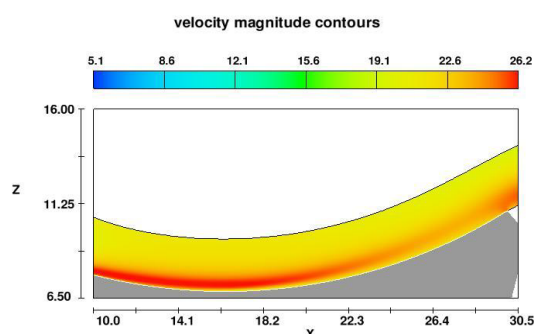


Fig. 5 The speed of the Jareh Dam launcher

شکل ۵ سرعت پرتاب‌کننده سد جره

حال با استفاده از توزیع فشار در محاسبه‌های عددی، معادله فشار برای پرتاب‌کننده به صورت شکل ۷، خواهد بود، که با توجه به حساسیت بسیار زیاد، بایستی معادله

نیز جهت عبور در طول باکت طی خواهد نمود و نیز برعکس نیرو نیز به سرعت کاهش خواهد یافت.

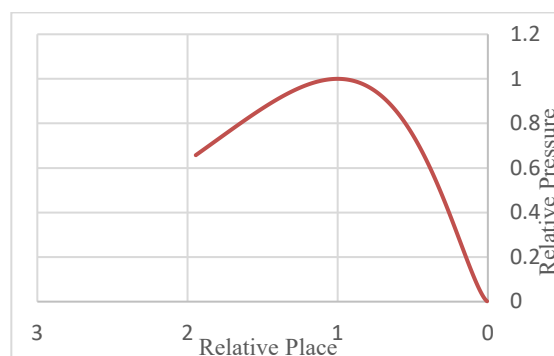


Fig. 3 Diagram Relative Pressure according to Relative Place in Jareh Dam

شکل ۳ نمودار فشار نسبی بر حسب مکان نسبی در سد جره

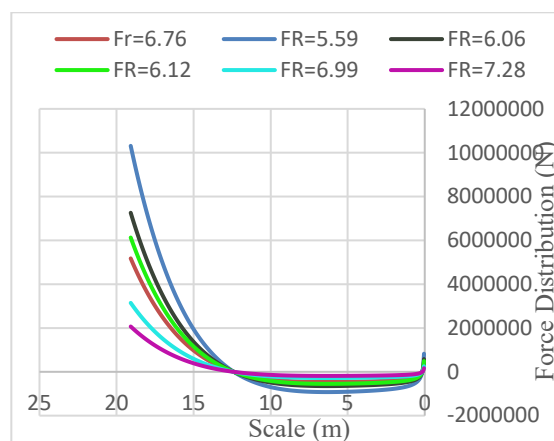


Fig. 4 Diagram Force Distribution along the length of the bucket in Jareh Dam with different Froude number

شکل ۴ نمودار توزیع نیرو در طول جام در سد

جره با عدد فرودهای مختلف

با مشاهده شکل ۴، در دو نقطه در طول باکت نیز نیرو صفر می‌شود، چون در این مکان‌ها امتداد شعاع باکت با جام نیز زاویه قائمه خواهند ساخت و پس از آن به دلیل خروج از مرکزیت و افزایش فاصله نسبت به امتداد مرکز شعاع جام، افزایش نیرو را خواهیم داشت.

با توجه به اینکه میزان نیرو می‌تواند مثبت و منفی باشد که این میزان با توجه به بررسی‌های آزمایشی ریچارد روزل (RICHARD B. RUSSELL) قابل استناد می‌باشد.

۳-۲- تعمیم مدل‌سازی عددی

پس از استقرار مناسب شبکه و درصد خطا مناسب،

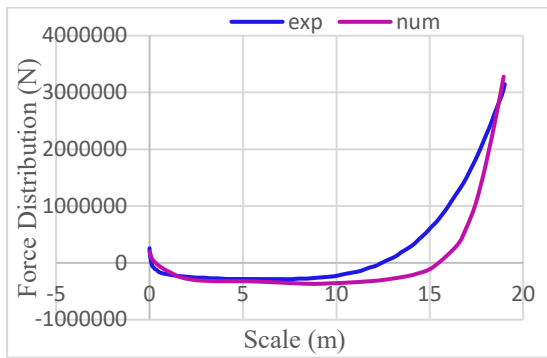


Fig. 8 Force Distribution in Jareh spillway with numerical and theoretical studies

شکل ۸ توزیع نیرو در سرریز جره با بررسی‌های عددی و تئوری

جدول ۲ درصد خطا در طول باکت در سرریز جره

Table 2 Percentage Error during the bucket in the Jareh spillway

x	exp	num	Percentage Error
1.16279	-216373	-160648	0.18
4.51436	-284266	-323617	0.12
5.36936	-285159	-324466	0.12
7.59234	-287481	-358927	0.19
8.41313	-277156	-370555	0.27
9.57592	-244825	-360794	0.27
9.91792	-234000	-350948	0.28
11.7989	-7941702	-320533	0.72
16.8947	1458380	610538	0.58
18.2285	2418630	1705230	0.29
19.015	3144640	3278690	0.05

با توجه به شکل ۸، نوسان‌های نیرو در بازه مقدارهای مثبت و منفی می‌باشد، که با بررسی و ارزیابی‌های تحلیلی و آزمایشگاهی نیز از همخوانی بسیار خوبی برخوردار است و اختلاف آن با توجه به جدول ۲ در بازه $L(0.7 - 0)$ کمتر از ۰.۲۸٪ خطا می‌باشد، که با توجه به آنکه با ارزیابی‌های تجربی بررسی شده است، قابل قبول می‌باشد. بایستی توجه داشت که در مدل آزمایشگاهی، جریان توسعه یافته می‌باشد، اما در مدل عددی جریان به صورت یکنواخت است، به همین دلیل در آغاز اختلاف زیادی مشاهده می‌شود. از دیگر علت‌های اختلاف آن این است که، در ماهیت آزمایشگاهی در واقعیت با ماهیت مدل عددی که

آن را به صورت کامل در رابطه ۷، قرار داد. همچنین توزیع فشار در سرریز جره با بررسی‌های عددی در شکل ۷ نشان داده شده است.

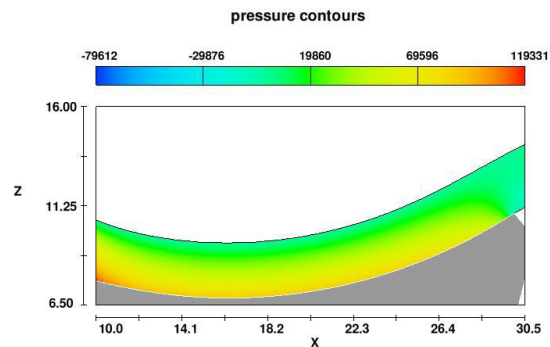


Fig. 6 Distribution of total pressure in Jareh Dam launcher

شکل ۶ توزیع فشار کل در پرتاب‌کننده سد جره

$$P = -0.01177x^8 + 0.7752x^7 - 21.2x^6 + 312.7x^5 - 2719x^4 + 14440x^3 - 47640x^2 + 97390x^1 - 29880 \quad (7)$$

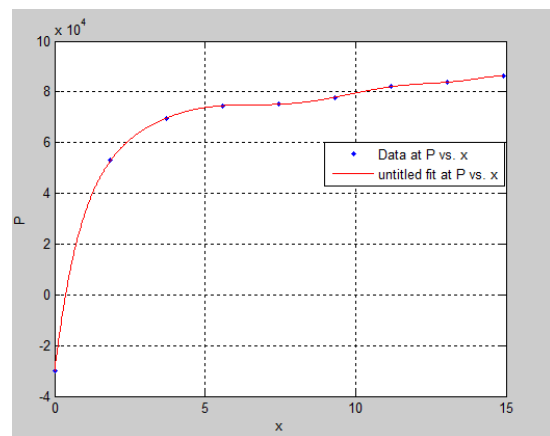


Fig. 7 Pressure Distribution in jar overflow with numerical studies

شکل ۷ توزیع فشار در سرریز جره با بررسی‌های عددی

که با استفاده از آن، نمودار توزیع نیرو در محاسبه‌های عددی برابر شکل ۸ خواهد بود، که معادله آن به صورت زیر است.

$$F = -0.0013078x^9 + 0.0969x^8 - 3.02857x^7 + 52.1167x^6 - 543.8x^5 + 3610x^4 - 15880x^3 + 48695x^2 - 29880x \quad (8)$$

پرتاب‌کننده جامی با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D نیز مدل‌سازی شد، و همان‌طور که در نمودار نتایج تحلیلی و عددی بر روی سرریز مورد نظر نشان می‌دهد در هر دو نیز میزان‌های منفی نیرو در بازه $(L \sim 0.1 \sim 0.6)$ رخ داده است. میزان‌های سرعت در جام در آغاز کمی کاهش پیدا می‌کند و در ادامه افزایش پیدا می‌کند. هنگامی که جریان از تنداب وارد جام می‌شود، مقداری از انرژی تنداب کاسته می‌شود. بنابراین تغییر جهت جریان در جام به طرف بالا و مقاومت ثقلی زمین که شتاب رو به پایین دارد، باعث کاهش شتاب حرکت و سرعت جریان در جام می‌شود، که خود عاملی در جهت توجیه تغییرپذیری‌های نیرو می‌باشد، زیرا فراسنجه تأثیرگذار نیرو، سرعت می‌باشد. با افزایش زاویه انحراف پرتاب‌کننده میزان فشار افزایش پیدا می‌کند. اگر زاویه انحراف افزایش پیدا کند، طول انحنا افزایش می‌یابد. از سویی جریان در ابتدای پرتاب‌کننده تحت تأثیر انحنا قرار می‌گیرد و کاهش سرعت می‌دهد، که خود عاملی در جهت کاهش نیرو خواهد شد. با افزایش عدد فرود جریان، نیرو کاهش پیدا می‌کند. از سوی دیگر با افزایش شعاع پرتاب‌کننده مقدار شتاب گریز از مرکز کاهش پیدا می‌کند. در نتیجه با کاهش شتاب گریز از مرکز مقدار نیرو کاهش یافته است. اندازه نیرو در محاسبه‌های تحلیلی و عددی نیز با میزان‌های نیرو که نوسان‌های آن در شکل ۴، نشان داده شده است همخوانی خوبی از لحاظ ظاهری دارد و درصد خطای آن در بازه $(0 \sim 0.7)$ L در حدود ۲۸٪ می‌باشد. که این اختلاف به دلیل عدد ثابت ورودی در انتگرال می‌باشد. البته بایستی که میزان‌های سرعت در مدل‌های آزمایشگاهی در طول باکت برداشت شود، که از اختلاف زیاد در انتهای باکت جلوگیری به عمل آید و بتوان مقدار خطای آن را به کمترین رساند که از آن تحلیل درستی در این بازه به عمل آورده شود.

در بررسی‌های عددی و تحلیلی نیز می‌توان علت منفی‌بودن نیرو را به دلیل برخواست‌های ایجاد شده در طول باکت را به علت پدیده جدارخوردگی (کاویتاسیون) دانست که باعث بالا و پایین شدن آب در طول جریان می‌شوند، که می‌توان برای رفع این نیرو منفی و پدیده

به صورت معادله‌های متوسط ناویراستوکس می‌باشد دارای تفاوت می‌باشد، که خود باعث ایجاد خطا می‌شود. از علت‌های دیگر اختلاف خطا در بازه $L(0.7, 0.9)$ ، آنکه ضریب‌های کمینه و بیشینه نیرو با افزایش دبی و کاهش عدد فرود افزایش می‌یابد، بنابراین کمترین اختلاف در لبه پرتاب‌کننده جامی رخ می‌دهد. در عدد فرود بالا بیشترین تغییرپذیری‌ها در کنار دیواره‌های جانبی رخ می‌دهد که با کاهش عدد فرود این تغییرپذیری‌ها به محور مرکزی پرتاب‌کننده جامی انتقال پیدا می‌کند و در محور عرضی تاحدودی به طور یکنواخت توزیع می‌شود. به همین دلیل، با توجه به اینکه در مدل عددی حتی با کاهش مش‌بندی نیز درصد خطا در ابتدای باکت چندان تغییری ایجاد نشد. البته بایستی یادآور شد، که اختلاف پیش از رسیدن دبی به قسمت انحنا دار باکت ایجاد شده است می‌توان این طور استنباط کرد، که در ابتدای سرریز به علت آن که سرعت و عدد فرود زیاد است و از آنجایی که جریان در طول باکت به صورت متقارن می‌باشد و مدل‌سازی در وسط باکت انجام شده است، بنابراین در مدل عددی جریان آب عبوری در طول باکت بیشتر به سمت کناره‌ها تمایل می‌یابد و از دبی در وسط خواهد کاست، که این کاهش دبی در وسط باعث ایجاد خطا در مدل‌سازی عددی و نظری خواهد شد، اما با توجه به اینکه در ابتدای قسمت قعر به بعد از سرعت جریان کاسته خواهد شد و آشفتگی جریان کمتر می‌شود، که در نتیجه جریان در آن قسمت آرام‌تر خواهد شد و از آشفتگی جریان کاسته می‌شود، که در نتیجه جریان عبوری در وسط مدل عددی با کناره‌ها به یک اندازه باشد و با نتایج نظری از همخوانی خوبی در قسمت قعر باکت و در مکانی که فشار بیشینه می‌باشد، برخوردار است. در این بررسی‌ها مشاهده می‌شود که در دو نقطه میزان نیرو صفر شده است، که نسبت به بررسی‌های عددی در مکانی نزدیک‌تر به مبدا مختصات قرار گرفته‌اند، که دلیل آن را می‌توان به مقدار اولیه‌ای که از انتگرال‌گیری به دست می‌آید، توجیه کرد.

به دست آوردن نیرو و توزیع آن به روش تحلیلی در طول جام‌های پرتابی در این پژوهش به انجام رسید و نتایج تحلیل و بررسی شد. در این پژوهش جریان بر روی

می‌باشد.

- میزان سرعت در روش عددی نیز در ابتدای جام کمی کاهش می‌یابد و در ادامه افزایش می‌یابد. البته به دلیل طول کوتاه پرتاب کننده، استهلاک بین بستر جریان با سطح زیرین و مقاومت هوا یا سطح آزاد جریان ناچیز است. بنابراین تغییر جهت جریان در جام به طرف بالا و مقاومت ثقلی زمین که شتاب رو به پایین دارد، باعث کاهش شتاب حرکت و سرعت جام در جام می‌شود، که البته با مقایسه آن با روش تحلیلی همخوانی خوبی دارد، زیرا در وسط جام نیز کمترین اندازه نیرو برای پرتاب کننده می‌باشد، در ادامه به علت شتاب گیری جریان مقدار سرعت افزایش پیدا می‌کند که البته در نمودار نیرو نسبی در شکل ۳، نیز بیشترین نیرو در انتهای باکت می‌باشد.
- اندازه نیرو در محاسبه‌های تحلیلی و عددی نیز با میزان‌های نیرو که نوسان‌های آن در شکل ۴، نشان داده شده است همخوانی خوبی از لحاظ ظاهری دارد و درصد خطای کلی در سرریز مورد نظر ۳۵٪ در طول بازه $L(0.8-0)$ می‌باشد، که این اختلاف به دلیل عدد ثابت ورودی در انتگرال می‌باشد.
- در بحث مربوط به محل کمینه نیرو در باکت‌ها نیز $XP_{min} \approx 0.1$ و $XP_{min} \approx 0.6$ که در آن نیرو در کمترین مقدار خود خواهد بود و ضخامت دال مورد نیاز در آن محدوده کمترین مقدار می‌باشد و یکی از علت‌های آن که در این محدوده به کمترین خود می‌رسد آن باشد که در این محدوده نیز مقدار زاویه α رو به کاهش می‌باشد و از نیروی گریز از مرکز می‌کاهد و در آن محدوده شبیه به یک جریان روباز بر روی سطح افقی می‌شود و اختلاف آن با محاسبه‌های عددی ۵٪ می‌باشد.

۵- منبع‌ها

- Abbas, F.M. & Tanaka, N. (2022). Utilization of geogrid and water cushion to reduce the impact of nappe flow and scouring on the downstream side of a levee. *Fluids*, 7(9), 299-316.
- ArefPour, M. & FathiMoghadam, M. (2012). Investigation of vacuum generation on Balaroud

جدار خوردگی (کاویتاسیون) نیز از هواده‌ها در کف باکت استفاده کنند. با انجام محاسبه‌های ضخامت دال، در انتهای باکت نیز بیشترین ضخامت در حدود ۴ الی ۶ برابر ابتدای باکت خواهد بود. همان طور که مشاهده شد، بایستی از آرماتورهای بسیار قوی در پی‌ریزی پرتاب کننده‌ها استفاده شود، تا بتوان با فاصله اجرایی مناسب، آرماتورها را از یکدیگر قرار داد.

۴- نتیجه گیری

- نتایج به دست آمده از این پژوهش را می‌توان به صورت زیر بیان نمود.
- وجود پرتاب کننده در انتهای سرریز شوت باعث ایجاد فشار پویایی بر بستر قسمت انتهای شوت می‌شود اما تاثیر این فشار در مقایسه با آبراهه‌های بدون شیب، به دلیل وجود شیب شوت کم می‌باشد.
 - در درون جام تاحدودی در قعر پرتاب کننده، بیشینه یار (هد) فشار ایجاد می‌شوند.
 - بیشینه فشار در درون جام و در محدوده‌ای از $x_{pm} = \{(0.45), (0.6)L_t\}$ رخ می‌دهد ولی کمینه فشار در دو محل از جام $x_{pin} = (0.1), (0.9)L_t$ احتمال رخداد آن بالا می‌باشد.
 - میزان فشار در روی پرتاب کننده به صورت ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. زمانی که جریان از سرریز وارد جام می‌شود به سمت بالا هدایت خواهد شد. در این حالت فشار خارج از مرکز ایجاد می‌شود. این فشار در جهت ثقل است و باعث افزایش فشار می‌شود. همان طور که در شکل ۵، مشاهده شد نتایج عددی با بررسی تحلیلی نیز همخوانی بسیار خوبی در اندازه فشار وجود دارد، که خود این افزایش فشار باعث ایجاد افزایش نیرو به دلیل افزایش در جام می‌شود.
 - همان طور که در رابطه‌های نیرو ملاحظه می‌شود، میزان نیرو در وسط جام کمترین مقدار است، به علت کم شدن شیب آبراهه می‌باشد، زیرا در این مکان کمترین تاثیر نیرو پویایی ملاحظه می‌شود.
 - بیشترین مقدار نیرو در انتهای جام می‌باشد و آن هم به دلیل سرعت بالا در آبراهه و نیز افزایش شیب و شعاع

- Ghanizadeh, E. & Ghanizadeh, M. (2017). Evaluation of Stability and Performance of Dam Foundations at Static State. *European Journal of Sustainable Development*, 6(2), 272-2823.
- Ghazayel, A. & Beaudoin, A. (2023). Three-dimensional numerical study of a local scour downstream of a submerged sluice gate using two hydro-morphodynamic models, SedFoam and FLOW-3D. *Comptes Rendus. Mecanique*, 35(2), 525-550.
- Haselsteiner, R. & Trifkovic, A. (2019). The redesign of a plunge pool slab for a temporary diversion due to dynamic pressures. In: *Sustainable and Safe Dams Around the World/Un monde de barrages durables et sécuritaires*, 178-187, CRC Press.
- Hojjati, S.H. & Salehi Nishabouri, S.A.A. (2014). Simulation of the flow on a triangular throwing cup and investigation of the range parameter of the jet exiting from the cup, *Proceedings of the Civil Engineering and Sustainable Development, Mashhad*. (In Persian)
- 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*, 33(10), 1904-1916.
- Koen, J., Bosman, D.E. & Basson, G.R. (2019). Artificial aeration on stepped spillways with piers and flares to mitigate cavitation damage, *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 61(2), 28-38.
- Matos, J. & Meireles, I. (2014). Hydraulics of stepped weirs and dam spillways: Engineering challenges, labyrinths of research. In: *ISHS 2014-Hydraulic Structures and Society-Engineering Challenges and Extremes: Proceedings of the 5th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures*, 1-30. The University of Queensland.
- Matos, J., Novakoski, C.K., Ferla, R., Marques, M.G., Dai Pra, M., Canellas, A.V.B. & Teixeira, E.D. (2022). Extreme pressures and risk of cavitation in steeply sloping stepped spillways of large dams. *Water*, 14(3), 306-318.
- Moreira, A.M.B. (2021). Numerical modelling of spillways and energy dissipators using the smoothed particle hydrodynamics method, Doctoral dissertation, Universidade do Porto, Portugal.
- Pereira, G.M. (2020). *Spillway Design-Step by Step*. CRC Press.
- Qajarieh, M. (2012). Investigation of pressure cup launcher using physical model, 4th Iran Water Resources Management Conference, Amirkabir University. (In Persian)
- Castillo, L.G., Castro, M., Carrillo, J.M., Hermosa, D., Hidalgo, X. & Ortega, P. (2016). Experimental and numerical study of scour downstream Toachi Dam. In *Sustainable Hydraulics in the Era of Global Change, Proceedings of the 4th European Congress of the International Association of Hydroenvironment Engineering and Research, IAHR*.
- Castillo, L.G. & Carrillo, J.M. (2017). Comparison of methods to estimate the scour downstream of a ski jump. *International Journal of Multiphase Flow*, 92(2), 171-180. Doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2017.03.006.
- Chanson, H. (2014). Embankment dam spillways and energy dissipators, In: *Labyrinth and Piano Key Weirs II - PKW 2013. Proceedings of 2nd International Workshop on Labyrinth and Piano Key Weirs PKW 2013, 20-22 Nov., Paris-Chatou, France, CRC Press*, 23-37
- Chanson, H. (2015). Embankment overtopping protection systems. *Acta Geotechnica*, 10(2), 305-318.
- Chanson, H. & Feleder, S. (2017). Hydraulics of selected hydraulic structures. In: *Open Channel Hydraulics, River Hydraulic Structures and Fluvial Geomorphology, Ch. 2*, 25-45.
- Chen, S.H. (2015). Actions on hydraulic structures and their effect combinations. In: *Hydraulic Structures*, 139-194. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-47331-3_4.
- Coombs, R. (2016). A comparison of model techniques at a stepped masonry spillway. *Dams and Reservoirs*, 26(1), 19-26.
- Douglas, K., Pells, S., Fell, R. & Peirson, W. (2018). The influence of geological conditions on erosion of unlined spillways in rock. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 51(2), 219-228.
- Fraser, C.N. (2016). Ski-jump energy dissipation: design of a ski-jump to maximise energy dissipation and aeration, Doctoral dissertation, Stellenbosch: Stellenbosch University.
- Freitas, M.R. (2020). CFD modelling for the study of structural stability of dams and spillways subject to overtopping, *Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção*, <http://icts.unb.br/jspui/handle/10482/36816>.

Dam. *Journal of Hydraulic Engineering*, 147(6), 101-114.

Yamini, O.A., Kavianpour, M.R. & Movahedi, A. (2020). Performance of hydrodynamics flow on flip buckets spillway for flood control in large dam reservoirs. *Journal of Human, Earth and Future*, 9(1), 39-47.

Yang, J., Andreasson, P., Teng, P. & Xie, Q. (2019). The past and present of discharge capacity modeling for spillways A Swedish perspective. *Fluids*, 4(1), 10-19.

fluctuations in the rapid spillway of Jarah Dam, 4th Iran Hydraulic Conference, Amirkabir University, Tehran. (In Persian)

Siskos, I (2023). Seismic behaviour of hardfill dams, PhD Thesis, University of Thessaly, <http://dx.doi.org/10.12681/eadd/54826>.

Torres Mansilla, C. (2018). Numerical Modelling of Hydraulic Free Surface Flows and Scale Effects Associated with Physical Modelling, Doctoral dissertation, University of Leeds.

Wahl, T.L. & Falvey, H.T. (2022). SpillwayPro: integrated water surface profile, cavitation, and aerated flow analysis for smooth and stepped chutes. *Water*, 14(8), 1256-1264.

Wuthrich, D., Chamoun, S., Bollaert, E.F., De Cesare, G. & Schleiss, A.J. (2021). Experimental and numerical study on scour-protection methods in a stilling basin: Case study of Chancy-Pougny

© 2025 The Author(s). Published by Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

