

## شبیه‌سازی عددی جریان جت و بررسی اثر شکل مثلثی جام و نسبت بازشدگی دریچه روی مشخصه‌های جریان در پرتاب‌کننده جامی

محمد کاکش‌پور\*<sup>1</sup>، محمدرضا پیرستانی<sup>2</sup>، محمود ذاکری نیری<sup>3</sup>

تاریخ دریافت: 92/12/17 تاریخ پذیرش: 94/09/14

<sup>1</sup> کارشناس ارشد عمران-آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر

<sup>2</sup> استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

<sup>3</sup> استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mohammadkakeshpour@yahoo.com

### چکیده

اگر سرعت جریان بر روی سرریز زیاد باشد و استفاده از حوضچه آرامش به دلیل هزینه زیاد و یا شرایط اجرایی ممکن نباشد، از پرتاب‌کننده جامی به عنوان کاهنده انرژی استفاده می‌شود. در این تحقیق به کمک نرم‌افزار Flow-3D به مدل‌سازی جریان بر روی سرریز شوت با آستانه اوجی شکل و پرتاب‌کننده جامی و با استفاده از روش حجم سیال (VOF) و مدل تلاطمی (RNG)  $k-\epsilon$  مبادرت گردید. ابتدا نتایج مدل عددی جت پرتابی از پرتاب‌کننده جامی با نتایج مدل پرتابی فیزیکی و همچنین روابط پیشنهادی USBR، گروه مهندسی ارتش آمریکا و کاواکامی مقایسه شد. سپس به بررسی تأثیر میزان بازشدگی دریچه سرریز بر برد و بیشینه ارتفاع پرتاب‌کننده جت ریزشی پرداخته شد. در نهایت به بررسی تأثیر شکل پرتاب‌کننده جامی دایره‌ای و دو نوع پرتاب‌کننده جامی مثلثی شکل تحت عنوان A و B بر جت پرتابی پرداخته شد. نتایج نشان داد که رابطه USBR از دقت بیشتری نسبت به مدل عددی و سایر روابط تجربی در تعیین برد برخوردار است. بر اساس نتایج، دو رابطه بین میزان بازشدگی دریچه با مقادیر درصد کاهش برد و ارتفاع جت پرتابی ارائه گردید. نتایج مقایسه مشخصه‌های هیدرولیکی پرتاب‌کننده جامی دایره‌ای و مثلثی نشان داد پرتاب‌کننده مثلثی نوع A در مقایسه با نوع B شباهت بیشتری به پرتاب‌کننده جامی دایره‌ای دارد و قابلیت جایگزینی با نوع دایره‌ای را به علت سهولت اجرا دارد. همچنین نتایج مدل عددی نشان‌گر خطای 12 درصدی بیشینه برد جریان جت و 8 درصدی بیشینه ارتفاع آن هست و به این ترتیب استفاده از مدل عددی Flow-3D در بررسی اثر شکل جام از پرتاب‌کننده جامی توصیه می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: پرتاب‌کننده جامی، جت پرتابی، سرریز شوت، مدل آشفتگی RNG

## Numerical Simulation of Jet Flow and Investigation Effect of Triangular Shape of Bucket, and Gate Opening Ratio on Flip Bucket Jet Flow Characters

M Kakeshpour\*<sup>1</sup>, MR Pirestani<sup>2</sup>, M Zakeri Niri<sup>3</sup>

Received: 08 March 2014

Accepted: 05 December 2015

1- M.Sc. of Civil Water Engin., Islamic Azad Univ. of Islamshahr, Iran

2- Assist. Prof, Dept. of Water Engin., Islamic Azad Univ. of South Tehran Branch, Iran

3-Assist. Prof, Dept. of Water Engin., Islamic Azad Univ. of Islamshahr, Iran

\* Corresponding Author, Email: [mohammadkakeshpour@yahoo.com](mailto:mohammadkakeshpour@yahoo.com)

### Abstract

If there is a high speed flow on a spillway and it is impossible to use a stilling basin because of its high cost or installation condition, the flip bucket may be used for energy dissipation. Flow-3D software was used in this research to simulate the flow on the chute spillway with ogee crest and flip bucket by volume of fluid (VOF) procedure and k- $\epsilon$  (RNG) turbulence model. At first, the numerical simulated trajectory of the jet flow was compared with the trajectory of the flow in the physical model, and also with the results of USBR, US Army and Kavakami equations. Then the effect of gate opening on the range length and the maximum height of the jet flow trajectory was studied. At last, the effect of the circular flip bucket shape and the two kind of triangular flip bucket named A and B on jet trajectory were studied. Results showed that USBR equation was more accurate than the numerical model and other empirical relationships in determination of the jet range length. Based on the results, two relationships were presented between gate opening VS reduction percentage of the range length and the maximum height of the jet. Comparison of the hydraulic characteristics of the circular and triangular flip buckets showed that the characters of the triangular flip bucket type A was more similar to that of the circular flip buckets in comparison to the type B and due to its easier implementation could be used instead of the circular flip bucket. In addition, results of the numerical model showed error ranges length of 12 and 8 percent for the maximum jet range length and maximum height, respectively. Therefore, applying numerical model of Flow-3D in estimating effects of bucket shape is recommended.

**Keywords:** Chute spillway, Flip bucket, Jet trajectory, RNG Turbulence model

### مقدمه

مستهلك کننده انرژی در انتهای سرریزها امری اجتناب‌ناپذیر است. از جمله این مستهلك کننده‌ای انرژی، پرتاب‌کننده‌های جامی شکل هستند (سامانی 1387). در سال‌های اخیر به دلیل ابداع روش‌های پیشرفته و دقیق حل عددی معادلات و وجود رایانه‌های قوی برای انجام محاسبات، طراحی این سازه‌های پیچیده از طریق روش‌های حل عددی مقدور شده است. اولسن و همکاران (2001) جریان عبوری از روی یک سرریز

سرریزها از جمله سازه‌های هیدرولیکی مهم سدها هستند که موجب پایداری سد و مناطق پایین دست در زمان وقوع سیلاب می‌شوند. این سازه‌ها جهت جلوگیری از خسارت جریان آب به بدنه سد و تأسیسات وابسته آن، آب اضافی را در شرایط سیلابی تخلیه می‌کنند (حسینی و ابریشمی 1384). برای جلوگیری از تخریب پایین دست سرریزها استفاده از

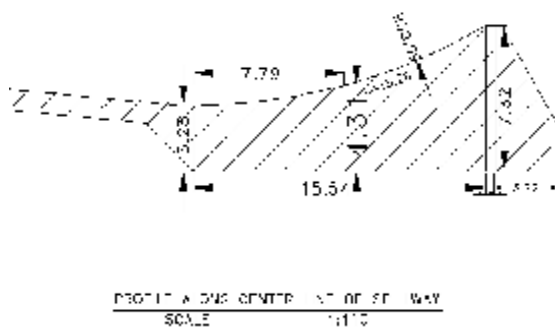
برخوردار بودند. معادلات استخراج شده جهت تعیین فشار به همراه محدودیت‌های مدل به دست آمدند. محدودیت‌های مدل وابسته به ارتفاع سقوط جت، محدوده دبی و قرارگیری حوضچه استغراق هیدرولیکی بودند. ژبای (2012) به مدل‌سازی سرریز شوت با تاج اوجی شکل به کمک روش VOF برای مدل‌سازی جریان دوفازی آب و هوا و مدل آشفتگی K-ε استاندارد در نرم‌افزار Fluent پرداختند. نتایج مقادیر محاسبه شده عددی، شامل عمق آب، فشار، سرعت جریان در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی رضایت‌بخش بود و اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و عددی به طور متوسط کمتر از 6 درصد به دست آمد. نتایج این تحقیق نشان داد که روش‌های CFD پیشرفته که در حل مسائل طراحی سرریزها استفاده شد، می‌تواند پایه بهینه‌سازی شکل سرریز قرار گیرد. مدل‌سازی عددی دارای دقت و سادگی در مقایسه با مدل‌سازی آزمایشگاهی هست. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که هر چند مطالعاتی در خصوص تأثیر میزان بازشدگی دریچه سرریز بر روی سرریزهای شوت با جام انتهایی انجام شده است، ولی تحقیقات بیشتر بر روی تأثیر بازشدگی بر پارامترهای هیدرولیکی مختلف لازم به نظر می‌رسد. بنابراین با هدف بررسی تأثیر بازشدگی دریچه، جریان آب در سرریز سد بالارود، به صورت عددی و با استفاده از مدل Flow-3D شبیه‌سازی گردید و با نتایج مدل فیزیکی مقایسه و صحت‌سنجی شده است.

#### مواد و روش‌ها

با توجه به آن‌که هدف از انجام مطالعات، شبیه‌سازی عددی تأثیر شکل جام بر روی مشخصه‌های جریان عبوری از روی سرریز شوت با جام انتهایی است و در این خصوص لازم است نتایج با مقادیر واقعی آزمایشگاهی مقایسه و صحت‌سنجی شود، به همین منظور سرریز سد مخزنی بالارود که از نوع شوت با جام انتهایی بود، انتخاب گردید. سد

اوجی استاندارد را به صورت فیزیکی و عددی مدل کردند. نتایج به دست آمده از تحلیل عددی دوبعدی در قائم جریان آشفتگی با استفاده از معادلات k-ε استاندارد به روش حجم محدود که با نرم‌افزار FLOW-3D انجام شده است به نتایج آزمایشگاهی بسیار نزدیک است. در این نرم‌افزار برای تعیین پروفیل سطح آب از روش حل معادله حجم سیال یا VOF استفاده شده است و پروفیل فشار روی سطح سرریز به نتیجه پروفیل فشار مدل فیزیکی روی تاج سرریز نزدیک بوده است. درگاهی (2006) جریان بر روی سرریز اوجی را به صورت عددی و فیزیکی شبیه‌سازی کرد. مدل آزمایشگاهی وی با بار آبی طراحی 0/1 متر، ارتفاع 0/2 متر، در فلوئی به عرض 0/403 متر، طول 2/4 متر و ارتفاع 0/4 متر ساخته شد. درگاهی برای شبیه‌سازی جریان، از نرم‌افزار Fluent با شبکه‌بندی منظم استفاده کرد. وی همچنین برای شبیه‌سازی سطح آزاد جریان از روش VOF استفاده کرد. سطح آب نقطه‌ای در روش VOF با مقدار 0/5 فرض شد. اندرسون و همکاران (2001) به بررسی نتایج مدل عددی در مورد نیم‌رخ سطح آب با مدل فیزیکی پرداختند. با مقایسه نتایج مدل عددی و فیزیکی، مدل RNG با تابع دیواره نامتعادل بهترین همخوانی را در مورد سرعت متوسط داشتند. برجتولد و فیمر (2011) به تحقیق بر روی حوضچه استغراق هیدرولیکی پرداختند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که برای کاهش فشار دینامیکی بر روی کف حوضچه استغراق هیدرولیکی می‌توان از عریض کردن انتهای سرریز شوت و همچنین افزایش عمق حوضچه استغراق هیدرولیکی کمک گرفت. برای تحقیق بر روی این پارامترها از مدل هیدرولیکی به صورت اصولی استفاده شد. نوسانات فشار دینامیکی بر روی کف حوضچه استغراق هیدرولیکی به عنوان مقادیر مرجع در نظر گرفته شد. برای این نمونه مورد مطالعه، ارتفاع جت H و عمق حوضچه استغراق هیدرولیکی Y وابسته بودند زیرا عرض شوت b و دبی Q از اهمیت کمتری

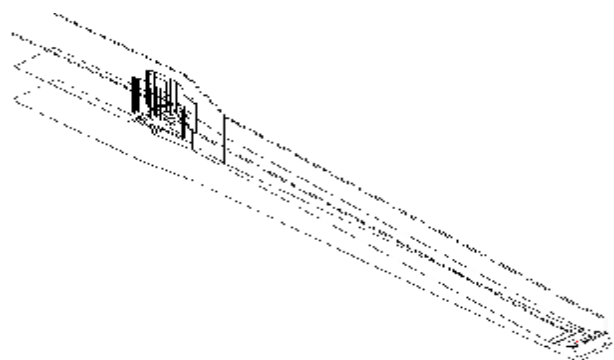
گردیده است، که می‌توان آن‌ها را به‌عنوان پایه‌هایی برای پل روی سرریز مورداستفاده قرارداد (بی‌نام 1383). مدل فیزیکی سرریز سد بالارود که از نوع اوجی دریچه‌دار با تنداب و پرتاب‌کننده جامی هست، توسط مهری و همکاران (1387) و با استفاده از مصالح پلکسی گلاس در مقیاس 1:110 ساخته شده و در فلوم آزمایشگاه مدل‌های هیدرولیکی دانشکده مهندسی آب دانشگاه شهید چمران اهواز نصب گردید. آزمایش‌ها با برقراری 5 دبی مختلف و متناسب با شرایط واقعی با اندازه‌گیری پارامترهایی مانند فشار، سرعت، ضریب خوردگی در 20 مقطع در طول سرریز و همچنین برد و بیشینه ارتفاع جت پرتابی از پرتاب‌کننده جامی بررسی گردید. در شکل‌های 1 و 2 مدل فیزیکی سرریز سد بالارود قابل‌مشاهده است (مهری و همکاران 1387).



شکل 2- ابعاد مدل فیزیکی پرتاب‌کننده جامی.

بر این اساس، نرم‌افزار Flow-3D از روش‌های دقت مرتبه اول و دوم در حل معادلات استفاده می‌کند. با به‌کار بردن محاسبات غیر ساخت‌یافته و بهینه‌سازی حل و شبکه، جریان تراکم‌پذیر و تراکم‌ناپذیر، جریان‌های لزج، آرام و متلاطم، امکان مدل‌سازی جریان آزاد بر روی انواع سرریزها، مدل‌سازی آب‌های کم‌عمق، مدل‌سازی رسوب در رودخانه، جریان‌های دوفازی، چند فازی و جریان‌های سطح آزاد با شکل‌های سطح پیچیده را دارا است (بی‌نام 1383).

مخزنی بالارود از نوع سنگریزه‌ای با هسته رسی به‌همراه تأسیسات جانبی آن در استان خوزستان در فاصله 27 کیلومتری شمال شهرستان اندیمشک واقع شده است. جهت تخلیه و استهلاک انرژی سیلاب‌های سد بالارود از سرریز اوجی شوت با دریچه کنترلی استفاده شده است. طول تاج سرریز 27 متر و طول مفید آن برابر 20 متر هست. سرریز دارای سه دریچه به ابعاد 6/7 در 12 متر است. ظرفیت عبور دبی رودخانه بالارود 870 مترمکعب بر ثانیه و بیشینه دبی خروجی 10000 ساله و PMF به‌ترتیب برابر 1952 و 3851 مترمکعب بر ثانیه هست. بیشینه تراز آب در مخزن به‌ازای عبور دبی‌های فوق از سرریز برابر 333/3 و 340 متر است. بر این اساس تراز تاج سد در رقوم 340/5 متر در نظر گرفته شده است. در حدفاصل دریچه‌های سرریز سازه‌های بتنی جداکننده‌ای تعبیه



شکل 1- مدل هندسی ساخته شده از سرریز.

### معرفی نرم‌افزار Flow-3D و قابلیت آن

نرم‌افزار Flow-3D یک مدل مناسب برای حل مسائل پیچیده دینامیک سیالات بوده و قادر است دامنه وسیعی از جریان سیالات را شبیه‌سازی کند. این نرم‌افزار برای مدل کردن جریان‌های سطح آزاد سه‌بعدی غیر ماندگار با هندسه پیچیده کاربرد فراوانی دارد. در این نرم‌افزار از روش حجم سیال (VOF) برای حل معادلات حاکم بر جریان در شبکه‌بندی منظم قائم استفاده می‌شود. شکل معادلات گسسته در این روش نظیر معادلات گسسته در روش تفاضل محدود هست.

## معادله‌های حاکم بر جریان

قوانین حاکم بر جریان عبارت‌اند از قانون بقای جرم و بقای مومنتم به‌عنوان معادلات حاکم بر جریان به شکل معادلات 1 و 2 تعریف می‌شوند:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad [1]$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho \overline{u_i u_j} \right] \quad [2]$$

تابع متغیر به نام  $\alpha$  استفاده‌شده که جزء حجم آب در سلول محاسباتی است. اگر  $\alpha$  برابر صفر باشد یعنی سلول پر از هوا بوده و برای حالتی که  $\alpha$  بین صفر و یک باشد، درصدی از سلول آب و درصدی از آن هوا خواهد بود. بنابراین با در نظر گرفتن سطح آزاد در یک جزء حجمی معین می‌توان سطح آزاد جریان را مشخص کرد. در این پژوهش، سطح آزاد جریان در جزء حجمی آب برابر 0/5 تعریف‌شده است. با حل معادله پیوستگی زیر برای جزء  $\alpha$  حجمی آب، جزء حجمی در کل میدان حل تعیین می‌گردد:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + u \frac{\partial \alpha}{\partial x} + v \frac{\partial \alpha}{\partial y} = 0 \quad [3]$$

نرم‌افزار Flow-3D کل میدان جریان را به‌صورت حجم کنترل‌های مجزا در نظر می‌گیرد. از معادله‌های حاکم بر جریان سیال روی هر حجم کنترل انتگرال گرفته و با استفاده از طرح‌های مختلف انفصال، معادله‌های جبری منفصل می‌شوند (بی‌نام 1383). همچنین به‌منظور تهیه هندسه میدان جریان و شبکه‌بندی آن از نرم‌افزار SolidWorks2012 و شبکه‌بندی از نرم‌افزار Flow-3Dv10 استفاده‌شده است. پس از بررسی بر روی زمان خروجی نرم‌افزار مشخص گردید که خروجی‌های نرم‌افزار پس از 5 ثانیه ماندگار می‌شوند. لذا جهت اطمینان بیشتر از صحت ماندگار بودن جریان در خروجی نرم‌افزار زمان 25 ثانیه برای خروجی نهایی نرم‌افزار در نظر گرفته شد. شرایط مختلف مرزبندی پس از بررسی بر روی طول مناسب مخزن به‌ازای مناسب‌ترین طول مخزن آب پشت سرریز به‌طول 1 متر از سرریز بررسی شد. در این آزمون‌ها شرایط مختلف مرزی<sup>1</sup> شبکه سلول محاسباتی به‌صورت مرز ورودی به‌صورت شرط مرزی دبی ورودی<sup>2</sup> و مرز خروجی

که در آن‌ها  $t$  زمان،  $u_j$  مؤلفه‌های سرعت،  $x_i$  مؤلفه‌های مختصات،  $\rho$  چگالی،  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی و  $P$  فشار می‌باشند (ژیان 2012). در این تحقیق از مدل‌های آشفتگی RNG استفاده‌شده است. در این مدل‌ها، یک معادله انتقال برای انرژی جنبشی آشفتگی ( $k$ ) و یک معادله انتقال برای اتلاف انرژی جنبشی آشفتگی ( $\varepsilon$ ) حل می‌شود. تفاوت دو مدل آشفتگی RNG و  $k-\varepsilon$  استاندارد به‌طور عمده در معادله  $\varepsilon$  است. مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  استاندارد در اعداد رینولدز بالا بیشتر مورد استفاده قرار گرفته و در استخراج معادله‌های  $k$  و  $\varepsilon$  فرض شده است که جریان کاملاً متلاطم بوده و اثر لزجت مولکولی بسیار ناچیز باشد. در مدل آشفتگی RNG یک جمله اضافی در معادله  $\varepsilon$  وارد شده که باعث افزایش دقت محاسباتی مدل در جریان‌های همراه با کرنش‌های بزرگ (مثل جریان در لایه‌های مرزی قوس‌دار و یا گذرگاه‌های واگرا) می‌گردد. بدین ترتیب این مدل در اعداد رینولدز پایین دقت مناسبی داشته و در انحناء و یا پیچیدگی هندسی، بیشتر استفاده می‌شود.

## شبه‌سازی سطح آزاد جریان به‌روش VOF

در این پژوهش به‌منظور شبه‌سازی سطح آزاد از روش VOF استفاده‌شده است. در روش VOF از یک

<sup>1</sup> Boundary condition

<sup>2</sup> Volume for rate

مشخص شد که مدل عددی حاصل حساسیت چندانی نسبت به مدل آشفتگی RNG و  $k-\epsilon$  استاندارد نداشته است. ولی همان‌طور که اشاره شد به دلیل وجود انحناء در مدل به علت وجود آستانه اوجی شکل و پرتاب‌کننده جامی از مدل آشفتگی RNG استفاده شده است (کاکش پور 1392).

### نتایج و بحث

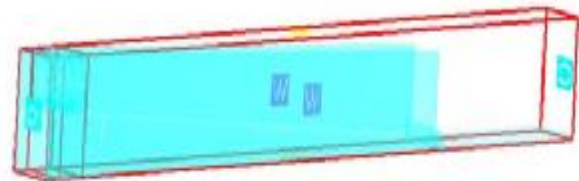
فرسایش عمودی در محل فرود فواره بستگی به مؤلفه قائم سرعت فرود فواره دارد و فرسایش افقی وابسته به مؤلفه افقی سرعت است. زاویه برخورد 45 درجه با پایاب کمینه زمینه تخریب را ایجاد می‌نماید. زاویه فرود تابعی از زاویه پرتاب فواره، فاصله طی شده توسط فواره و اصطکاک با هوا دارد. به علت وجود اصطکاک هوا، فواره پخش شده زودتر به نقطه اوج می‌رسد. در عمل برای داشتن زاویه فرود 45 درجه لازم است که زاویه پرتاب حدود 30 درجه در نظر گرفته شود. از دیدگاه نظری، مقدار برد زاویه باکت برابر با 30 درجه، حدود 13% کمتر از برد با زاویه 45 درجه هست. USBR رابطه 4 را برای پرتاب فواره پیشنهاد نموده است:

$$y = x \cdot \tan q - \frac{x^2}{K \frac{C_d}{g} + \frac{V^2}{2g} \frac{\cos^2 q}{\phi}} \quad [4]$$

که در آن  $d$  عمق جریان،  $V$  سرعت پرتاب از پرتاب‌کننده،  $\theta$  زاویه پرتاب از پرتاب‌کننده و  $x$  فاصله از انتهای پرتاب‌کننده جامی هست. برای پرتاب بدون اصطکاک  $K$  مساوی یک است اما با در نظر گرفتن مقاومت اصطکاکی هوا و تلاطم جریان  $K$  مساوی با 85% فرض می‌گردد. همچنین گروه مهندسی ارتش آمریکا رابطه 5 را جهت محاسبه طول پرتابه فواره ارائه کرده است:

$$\frac{x}{d + \frac{V^2}{2g}} = \sin 2q + 2 \cos q \sqrt{\sin^2 q + \frac{y}{d + \frac{V^2}{2g}}} \quad [5]$$

جریان به صورت شرط مرزی جریان خروجی<sup>3</sup> و کناره‌های بلوک به صورت شرط مرزی دیواره و همچنین کف به صورت شرط مرزی دیواره و سطح جریان به صورت شرط مرزی تقارن<sup>4</sup> با گرادیان صفر بر اساس شکل 3 انتخاب گردید.

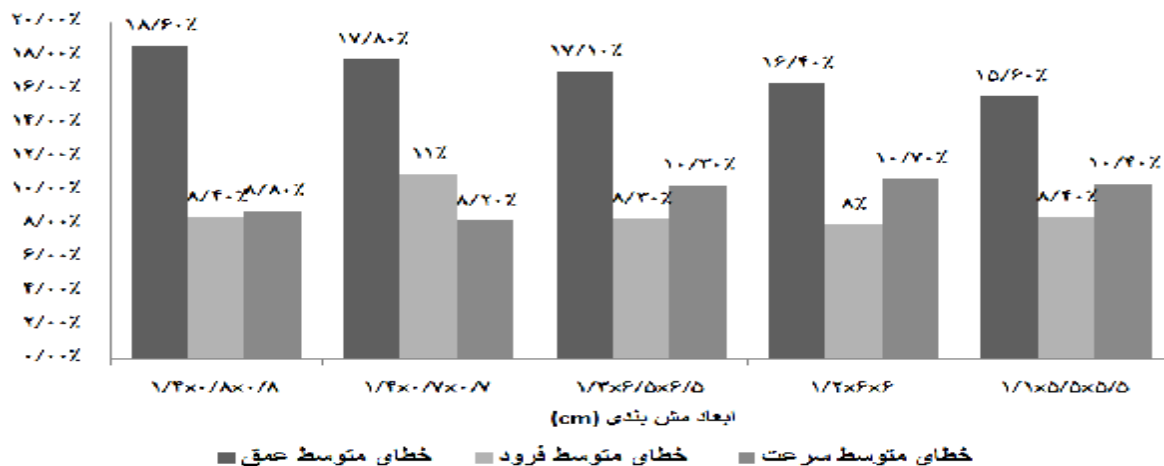


شکل 3- شرایط مرزی اعمال شده در مدل Flow-3D.

بدیهی است که بزرگ بودن ابعاد شبکه بندی سبب کاهش دقت محاسبات و ریز بودن ابعاد شبکه بندی سبب افزایش دقت و همچنین افزایش زمان اجرای نرم افزار و افزایش حجم فایل خروجی می‌شود. بنابراین باید مقدار بهینه و مناسب از هر جهت برای مدل انتخاب شود و این از مهم ترین عوامل مؤثر در یک مدل سازی عددی صحیح است. ابعاد بلوک شبکه بندی مدل  $0/52 \times 4/045 \times 0/2795$  متر است که این ابعاد تمامی حجم مدل ساخته شده را پوشش می‌دهد. نتایج صحت سنجی ابعاد شبکه بندی در 20 مقطع از جریان بر روی پارامترهای سرعت، عمق و عدد فرود در شکل 4 نشان داده شده است. مقاطع مورد بررسی در شکل 1 نشان داده شده اند. همان گونه که در شکل 4 نشان داده شده است خطای ایجاد شده در محدوده  $7 \times 7 \times 14$  میلی متر تقریباً ثابت مانده است و نهایتاً ابعاد شبکه بندی به صورت  $7 \times 7 \times 14$  میلی متر در راستای طولی، عرضی و ارتفاعی در نظر گرفته شده است. علت انتخاب ابعاد شبکه بندی یکنواخت کوتاه شدن زمان اجرای نرم افزار بود. در مجموع با ابعاد در نظر گرفته شده در حدود 1000,000 سلول محاسباتی در مدل سازی مورد استفاده قرار گرفت. با بررسی های صورت گرفته بین دو مدل آشفتگی،

<sup>3</sup> Outflow

<sup>4</sup> symmetry



شکل 4- مقادیر متوسط خطا بر روی مقاطع سرریز برای تعیین ابعاد شبکه بندی.

عددی برابر 73/73 متر به دست آمد که دارای حدود 12/29 درصد خطا به وسیله رابطه خطای متوسط هست. همچنین بیشینه ارتفاع پرتابه نسبت به بستر پایین دست در دبی 3852 مترمکعب بر ثانیه رخ داده است که میزان آن در مدل آزمایشگاهی 18/6 متر بوده و در مدل عددی 19/617 متر بوده که حدود 8 درصد خطا را نشان می‌دهد. در مجموع می‌توان گفت که برد پرتابه 8/5 درصد و ارتفاع جت پرتابی 7/4 درصد خطا نشان داده است. در شکل 6 می‌توان مقایسه دقیق‌تری از نتایج خطا و مقایسه آن‌ها در حالت‌های مختلف با یکدیگر به دست آورد. با مقایسه مقدار حاصل از روابط تجربی باید گفت که در پیش‌بینی برد جت پرتابی، رابطه USBR نزدیک‌ترین نتایج را با حدود 6 درصد خطا نسبت به مقدار واقعی از خود نشان داد. رابطه گروه مهندسی ارتش آمریکا دارای حدود 10 درصد خطا بود. اما بررسی‌های گسترده بر روی رابطه کاواکامی نشان‌دهنده خطایی در حدود 75 درصد در تعیین برد جت پرتابی بوده و عملاً در تعیین برد، استفاده از این رابطه منطقی به نظر نمی‌رسد. همچنین بررسی‌های سامانی (1387) بر روی سد شهید عباسپور نیز تأییدکننده دقت رابطه USBR در برابر دو رابطه دیگر است. از نظر تعیین ارتفاع بیشینه جت پرتابی، رابطه کاواکامی با حدود 18 درصد خطا نزدیک‌ترین فاصله را با مقدار آزمایشگاهی ارائه داد. پس از کاواکامی رابطه

کاواکامی بر اساس مطالعات گسترده و واسنجی نتایج بررسی‌های خود با چندین پروتوتایپ مشاهده شده، رابطه‌ای را جهت تعیین طول پرتاب فواره ارائه نموده است که به صورت رابطه 6 است:

$$y = \frac{1}{gk^2} \ln(\cos g + \tan a \cdot \sin g) \quad [6]$$

$$a = \tan^{-1}(kV \sin q) \quad [7]$$

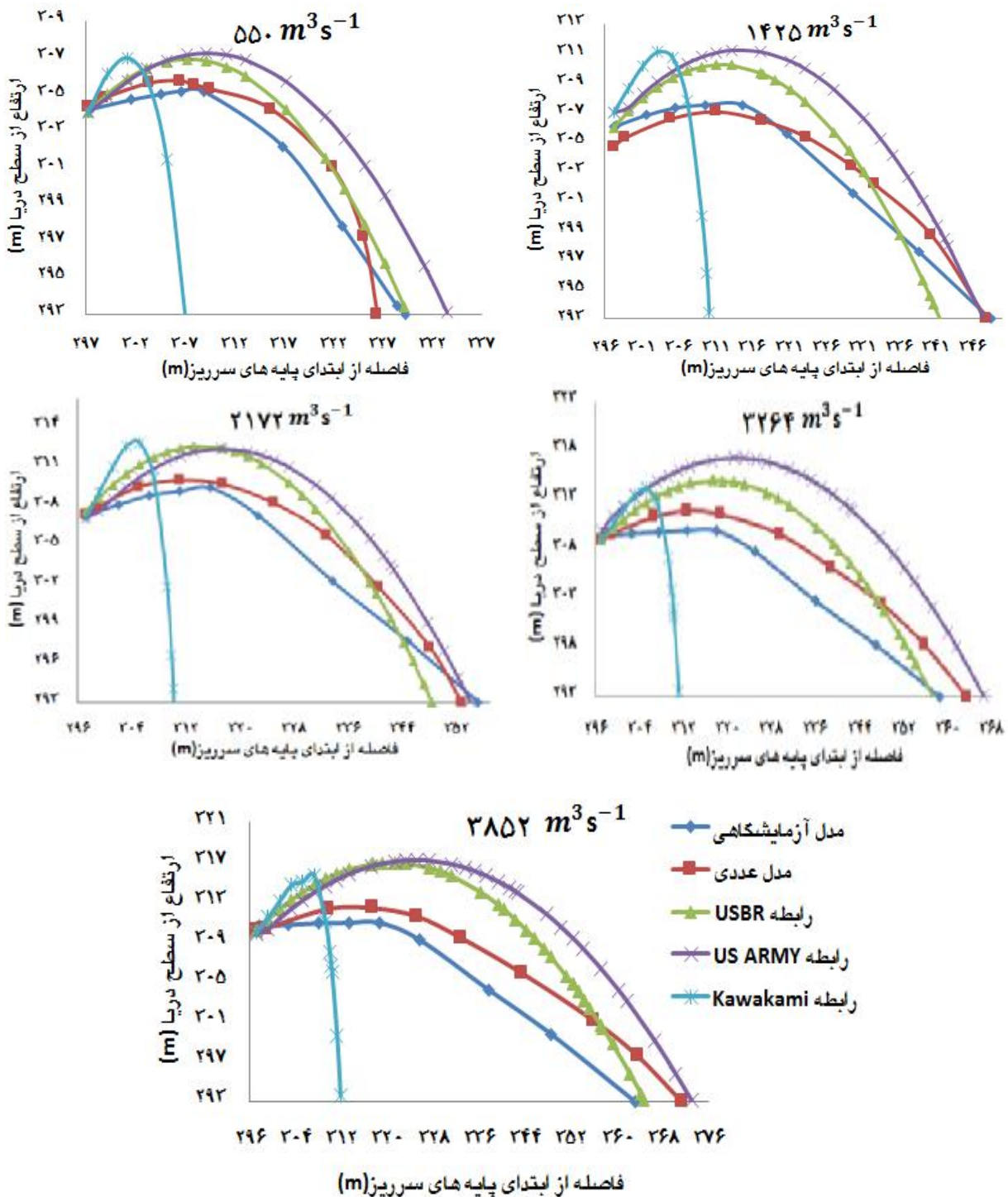
$$g = \frac{e^{gk^2x} - 1}{kV \cos q} \quad [8]$$

که در آن  $\alpha$  زاویه پرتاب از پرتاب‌کننده می‌باشد. مقدار  $\alpha$  از رابطه 7 و مقدار  $g$  از رابطه 8 به دست می‌آید. مقدار ضریب کاواکامی وابسته به سرعت جریان در جام بوده و مقدار آن از نمودار استخراج می‌شود (سامانی 1387).

پس از انجام محاسبات لازم جهت استفاده از روابط تجربی و مدل عددی و مقایسه با مدل فیزیکی نتایج حاصل، در شکل 5 نشان داده شده است. علت استفاده از مقادیر در مقیاس واقعی در نتایج مدل عددی و نتایج تجربی، استفاده مدل آزمایشگاهی از مقادیر واقعی بود و به علت تطابق با مدل آزمایشگاهی تمامی مدل‌ها در مقیاس واقعی آورده شده است. نتایج در بیشترین برد در دبی 3852 مترمکعب بر ثانیه که معادل 30/35 لیتر بر ثانیه در مدل آزمایشگاهی و عددی بود رخ داده است و میزان برد آزمایشگاهی برابر 65/66 متر و میزان برد

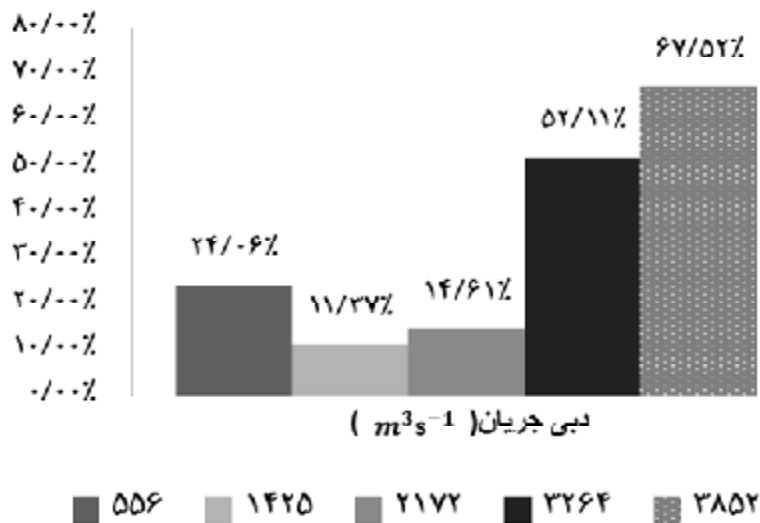
عددی نسبت به مقادیر آزمایشگاهی در دبی‌های گوناگون نشان داده شده است و مشاهده می‌شود که با افزایش دبی میزان خطای برد افزایش پیدا کرده است. در شکل 7 مقایسه دقیق‌تری در مورد خطای برد و بیشینه ارتفاع پرتابه در بین روابط تجربی نشان داده شده است.

USBR با حدود 22 درصد و رابطه گروه مهندسی ارتش آمریکا با 26 درصد خطا از دقت کمتری برخوردار بودند. مدل عددی نیز از نقطه نظر بیشینه ارتفاع دارای 8 درصد و از نقطه نظر برد 12 درصد خطا می‌باشد. در شکل 6 میزان خطای برد پرتاب‌کننده جامی در مدل

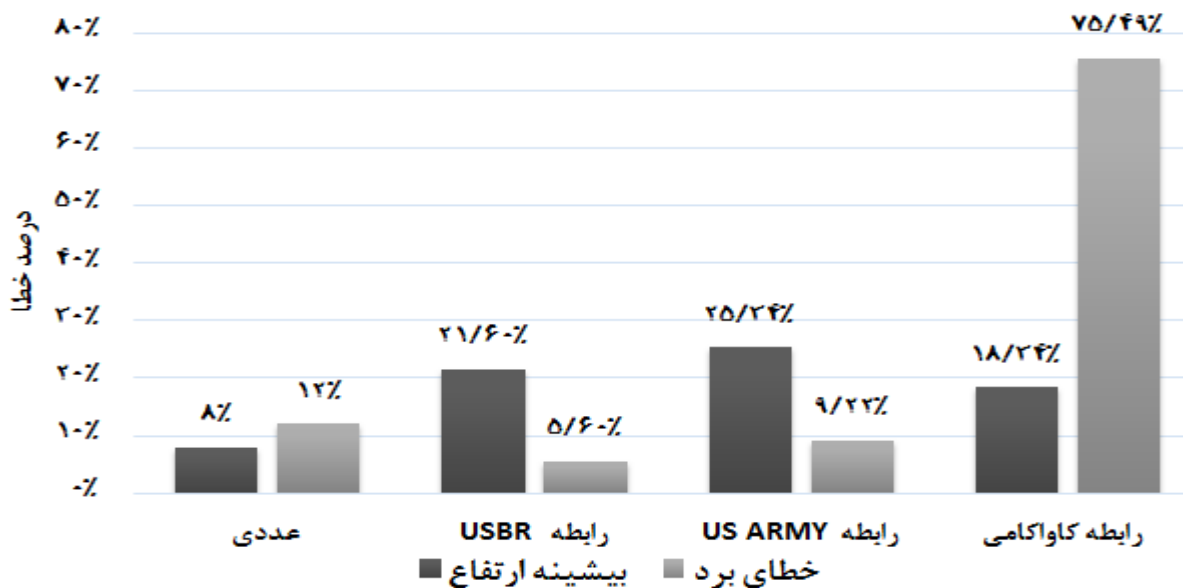


شکل 5- نمودار جت ریزشی به ازای 5 دبی، برای مدل عددی و آزمایشگاهی و تجربی.





شکل 6- مقادیر متوسط خطای کلی منحنی پرتابه در دبی های مختلف.



شکل 7- میزان خطای حاصل از مدل عددی و روابط تجربی در مورد برد و بیشینه ارتفاع در مقایسه با مدل آزمایشگاهی.

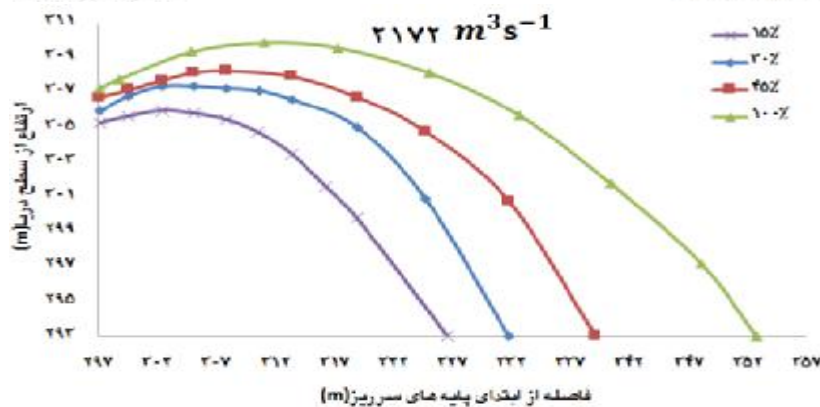
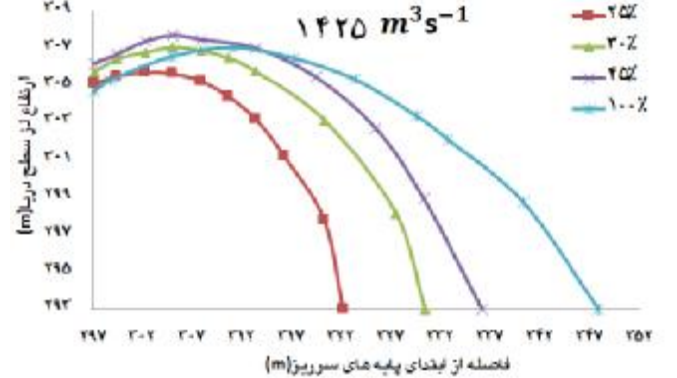
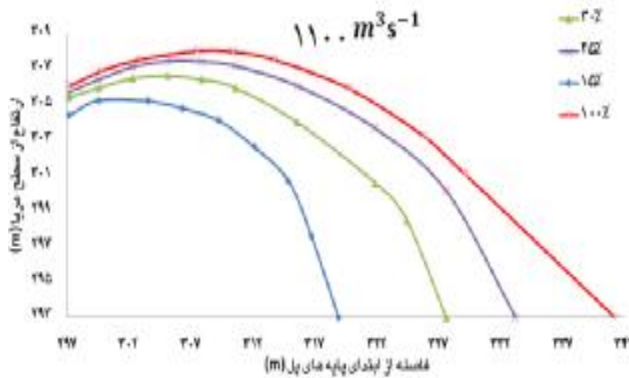
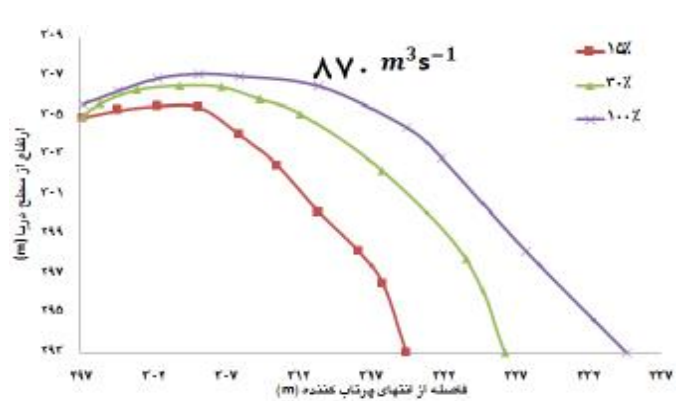
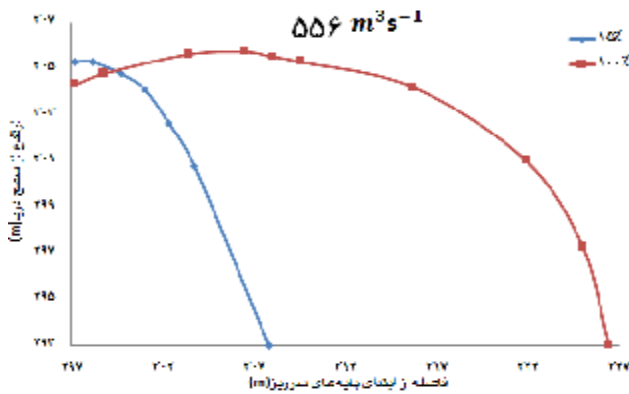
دبی‌ها و بازشدگی‌ها به علت پایین بودن بار آب، بازشدگی عملاً تأثیری بر جریان نداشته و با حالت 100 درصد بازشدگی یکسان بوده و بنابراین از ذکر آن‌ها خودداری شده است. علت آنکه در بازشدگی‌های پایین‌تر میزان پرتاب جت کمتر است این است که در بازشدگی‌های کمتر با توجه به فرض ثابت ماندن سطح آب مخزن با توجه به وسعت مخزن بالادست در تمامی

#### تأثیر بازشدگی بر ویژگی‌های جت پرتابی

در شکل 8 جت پرتابی جریان با پنج دبی عبوری به‌میزان، 550 مترمکعب بر ثانیه، 870 مترمکعب بر ثانیه، 1100 مترمکعب بر ثانیه، 1425 مترمکعب بر ثانیه، 2172 مترمکعب بر ثانیه و با اعمال چهار بازشدگی 15، 30، 45 و 100 درصد بر روی پرتاب‌کننده جامی شکل نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در برخی

کاهش می‌یابد.

بازشدگی‌ها میزان انرژی جت با کاهش میزان بازشدگی درجه کاهش یافته و بنابراین میزان پرتاب جت پرتابی



شکل 8- نمودار جت پرتابی در 5 دبی و چهار بازشدگی.

جدول 1 آورده شده است. درصد کاهش محاسبه شده در مقایسه با حالت 100% بازشدگی ارائه شده است.

پس از بررسی‌های صورت گرفته در یک جمع‌بندی کلی تأثیر بازشدگی‌های اعمال شده به صورت تقریبی در

جدول 1- میزان افت تقریبی برد و ارتفاع به‌ازای بازشدگی‌های اعمال‌شده.

افت ارتفاع جت پرتابی (%)	افت برد جت پرتابی (%)	میزان بازشدگی (%)
13	50	15
6	30	30
5	20	45

به‌ازای هر میزان بازشدگی داده‌شده درصد کاهش ارتفاع جت را نسبت به حالت 100% بازشدگی به‌دست آورد.

$$R_{\text{opening}} = R_{\%100} - [(-0.275 \ln(\% \text{ opening}) - 0.0238)] * R_{\%100} \quad [9]$$

$$H_{\text{opening}} = H_{\%100} - (0.0228(\% \text{ opening})^{-0.896}) * H_{\%100} \quad [10]$$

است. مقایسه بین نتایج پرتاب‌کننده مثلثی و پرتاب‌کننده دایره‌ای نشان داد که تفاوت‌های نسبتاً اندکی بین این دو نوع پرتاب‌کننده وجود دارد. شکل 9 دو طراحی تیپ پرتاب‌کننده جامی مثلثی را در مقایسه با نوع دایره‌ای نشان می‌دهد.

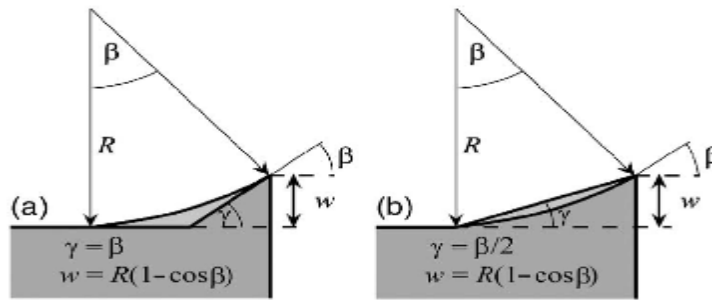
همان‌گونه که در شکل 9 مشاهده می‌شود: 1- شکل a شامل جام برای زاویه پرتاب تقریباً یکسان  $\gamma = \beta$  2- در شکل b طول جام برابر با زاویه،  $\gamma = \beta/2$  3- ارتفاع پرتاب‌کننده در هر دو حالت  $w = R(1 - \cos\beta)$  به‌این‌ترتیب با ایجاد تغییرات خواسته‌شده در پرتاب‌کننده جامی دایره‌ای می‌توان دو نوع پرتاب‌کننده جامی مثلثی A و B را به‌دست آورد. در این تحقیق با اعمال این تغییرات خواسته‌شده که در شکل 8 نشان داده‌شده است، پرتاب‌کننده جامی دایره‌ای به دو نوع پرتاب‌کننده جامی A و B تغییر داده‌شده است (استینر و همکاران 2008). در ادامه با مدل‌سازی دو نوع پرتاب‌کننده جامی مثلثی جریان به‌ازای 5 دبی از روی آن عبور داده‌شده و با مقدار دایره‌ای مقایسه شده است. در شکل 10 دو منحنی پرتابه نوع A و نوع B و همچنین پرتابه جامی در مدل عددی با یکدیگر مقایسه شده است.

بر اساس رابطه 9 می‌توان به‌ازای هر میزان بازشدگی داده‌شده درصد کاهش برد را نسبت به حالت 100% بازشدگی به‌دست آورد. بر اساس رابطه 10 نیز می‌توان

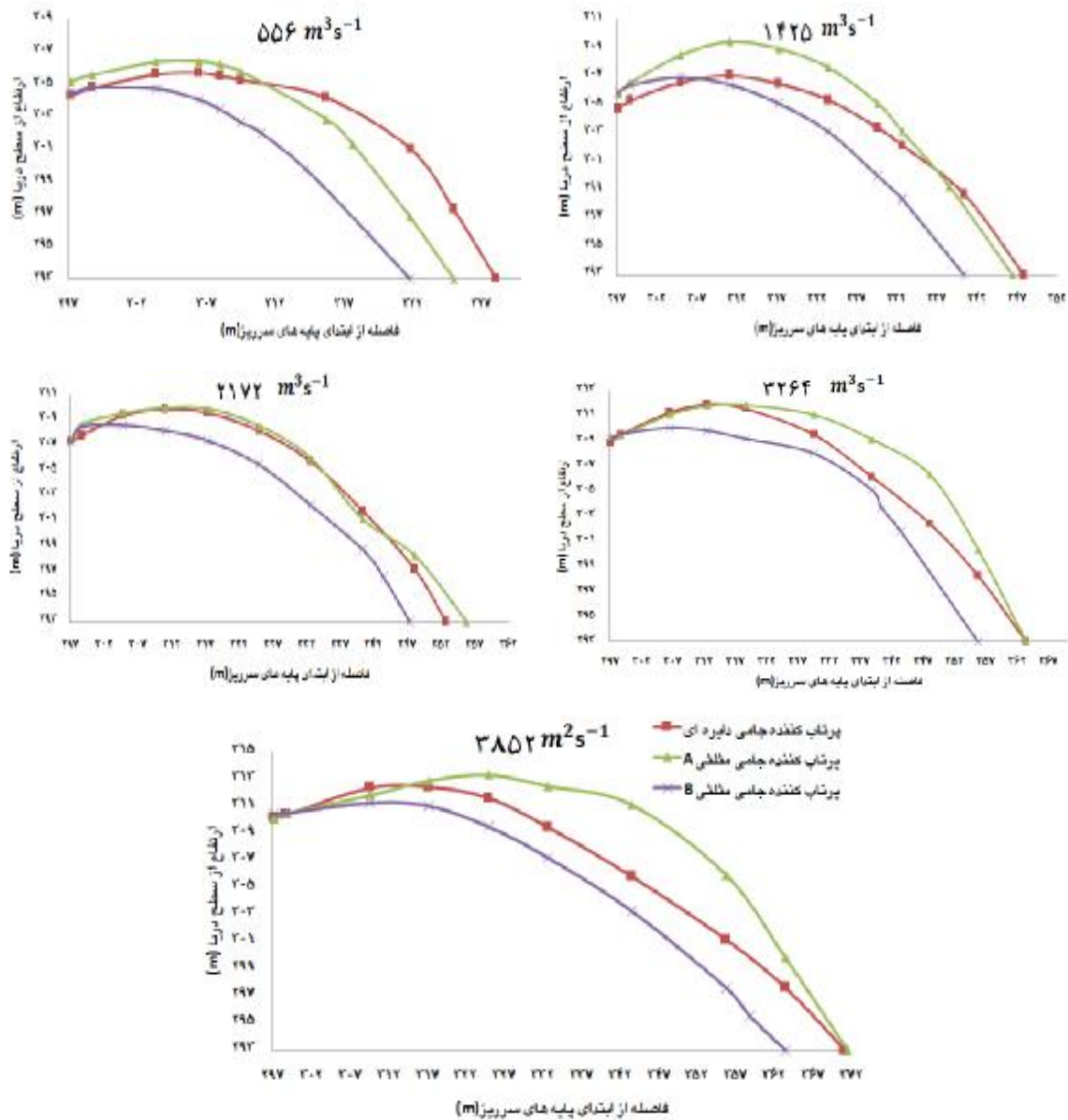
در روابط 9 و 10،  $\% \text{ opening}$  میزان بازشدگی (m) است که باید برحسب درصد وارد رابطه شود و  $R_{\text{opening}}$  برد (m) در بازشدگی خواسته‌شده است.  $H_{\text{opening}}$  ارتفاع جت (m) در حالت بازشدگی خواسته‌شده است.  $R_{\%100}$  و  $H_{\%100}$  میزان برد و بیشینه ارتفاع در حالت 100% بازشدگی است. شایان‌ذکر است روابط لگاریتمی 9 و 10 بیشترین دقت را در برآورد مقادیر خواسته‌شده نسبت به دیگر فرم‌های معادلات نظیر نمایی و چندجمله‌ای دارا می‌باشند.

#### پرتاب‌کننده جامی مثلثی

عموماً شکلی که از پرتاب‌کننده جامی مورد استفاده قرار می‌گیرد دایره‌ای شکل است، در این تحقیق نوع دیگری از پرتاب‌کننده تحت عنوان پرتاب‌کننده مثلثی شکل معرفی و مدل‌سازی شده است. با بررسی‌های انجام‌گرفته بر روی شکل پرتاب‌کننده که به پیشنهاد استینر و همکاران (2008) بر روی شکل پرتاب‌کننده صورت گرفت، به ارائه شکل تازه‌ای از پرتاب‌کننده موسوم به پرتاب‌کننده جامی مثلثی منجر شد. از مزیت‌های اصلی پرتاب‌کننده جامی مثلثی طراحی و اجرای ساده آن در مقایسه با پرتاب‌کننده جامی دایره‌ای



شکل 9- پرتاب‌کننده‌های مثلثی A و B.



شکل 10- منحنی جت پرتابی مدل عددی پرتاب‌کننده‌های دایره‌ای و پرتاب‌کننده‌های مثلثی A و B

حاکی از دقت بالای رابطه USBR در تعیین برد نسبت به سایر روابط تجربی در تعیین برد پرتابه هست. بررسی تأثیر بازشدگی دریچه بر جت پرتابی منجر به ارائه دو رابطه در تغییر برد و بیشینه ارتفاع به‌ازای دبی‌های گوناگون گردید که می‌توان از آن‌ها در برآورد ویژگی‌های جت پرتابی بهره جست. با مقایسه صورت گرفته بین منحنی‌های جت پرتابی نوع A و B و دایره‌ای مشخص شد که به‌ازای هر پنج دبی پرتاب‌کننده جامی مثلثی نوع B دارای برد و ارتفاع کمتری نسبت به پرتاب‌کننده جامی نوع A و پرتاب‌کننده دبی‌های پایین برد و ارتفاع جت پرتابی نوع A بیشتر از نوع دایره‌ای است ولی برد پرتاب‌کننده دایره‌ای بیش از نوع A بود. با بالاتر رفتن دبی شباهت پرتاب‌کننده دایره‌ای و نوع A بیشتر می‌شود تا جایی که ارتفاع و برد بسیار به هم نزدیک شده و عملاً تفاوت چندانی بین این دو دیده نمی‌شود و این خود تأییدکننده شباهت این دو پرتاب‌کننده به هم است. بنابراین در مجموع با توجه به شباهت به‌دست‌آمده در مورد این سه پرتاب‌کننده می‌توان گفت که از نظر حفاظت پایین‌دست شباهت زیادی بین این سه پرتاب‌کننده وجود دارد. این شباهت بین دو مورد پرتاب‌کننده دایره‌ای و پرتاب‌کننده نوع A بیشتر و در مورد نوع B کمی متفاوت است.

در مقایسه بین منحنی‌های جت پرتابی نوع A و B و دایره‌ای مشخص شد که به‌ازای هر پنج دبی پرتاب‌کننده جامی مثلثی نوع B دارای برد و ارتفاع کمتری نسبت به پرتاب‌کننده جامی نوع A و پرتاب‌کننده جامی دایره‌ای است. در دبی‌های پایین برد و ارتفاع جت پرتابی نوع A بیشتر از نوع دایره‌ای است ولی برد پرتاب‌کننده دایره‌ای بیش از نوع A بود. با بالاتر رفتن دبی شباهت پرتاب‌کننده دایره‌ای و نوع A بیشتر گردید تا جایی که ارتفاع و برد بسیار به هم نزدیک شده و عملاً تفاوت چندانی بین این دو دیده نمی‌شود و این خود تأییدکننده شباهت این دو پرتاب‌کننده به هم است.

### نتیجه‌گیری کلی

در تحقیق حاضر با مدل‌سازی دو نوع پرتاب‌کننده جامی مثلثی جریان به‌ازای 5 دبی از روی آن عبور داده‌شده و با مقدار دایره‌ای مقایسه شده است. در بررسی جت پرتابی پرتاب‌کننده جامی دایره‌ای و عددی شباهت زیادی در برد و بیشینه ارتفاع پرتاب‌کننده و همچنین منحنی جت ریزشی مدل عددی و آزمایشگاهی به‌دست آمد. به‌این‌ترتیب استفاده از نرم‌افزار Flow-3D در بررسی جت پرتابی پرتاب‌کننده جامی توصیه می‌گردد. همچنین بررسی‌ها بر روی روابط تجربی

### منابع مورد استفاده

- بی‌نام، 1383. گزارش مطالعات مرحله اول طرح سد مخزنی بالارود. شرکت مهندسی مشاور دز آب، شرکت آب منطقه‌ای خوزستان، اهواز.
- حسینی م و ابریشمی ج، 1384. هیدرولیک کانال‌های باز. چاپ نهم، انتشارات دانشگاه امام رضا، مشهد.
- سامانی ح، 1387. طراحی سازه‌های هیدرولیکی. شرکت مهندسی مشاور دز آب.
- کاکش‌پور م، 1392. شبیه‌سازی عددی جریان ریزشی آزاد از سرریز اوجی با پرتاب‌کننده‌های جامی (مطالعه موردی سرریز سد بالارود). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر.
- مهری م و فتحی‌مقدم م، ابن‌جلال ر، 1387. بررسی خلأ زائی (کاویتاسیون) بر روی سرریز سد بالارود با استفاده از مدل فیزیکی. صفحه‌های 435 تا 443، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران.
- Anderson A, Tannehill J, and Pletcher R, 1997. Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer Taylor and Francis Publishers. London, UK.
- Anonymous, 2010. Flow-3D User Manual Version 10. Flow Science, Inc, USA.

- Berchtold RM and Pfister M, 2011. Measures to reduce dynamic plunge pool pressures generated by a free jet. *Journal of Hydraulic Research* 117(4): 693-700.
- Savage BM and Johnson MC, 2001. Flow over ogee spillway: physical and numerical model case study. *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)* 127(8): 640-649
- Dargahi B, 2006. Experimental study and 3D numerical simulations for a free-overflow spillway. *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)* 132(9): 899-907.
- Steiner R, Heller V, Hager Minor HE, 2008. Deflector ski jump. *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)* 134(5): 562-571.
- Wilcox D C, 1993. *Turbulence Modeling for CFD*. 1st ed, DCW Industries Inc.
- Zhenwei MU and Zhiyan Z. 2012. Numerical simulation of 3-D flow field of spillway based on VOF method. *Procedia Engineering* 28: 808-812.