

واژه‌های کلیدی: پرتابه جامی شکل، کانال نزدیک‌شونده، استهلاک انرژی، مدل‌های آشفستگی، Flow-3D.

## مقدمه

جریان در پایین‌دست سرریزها دارای سرعت بسیار زیادی می‌باشد. جهت ممانعت از اثرات تخریبی این جریان از سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی استفاده می‌شود. سه سازه از متداول‌ترین سازه‌های استهلاک انرژی جریان عبارتند از: حوضچه‌های آرامش که در این سازه‌ها استهلاک انرژی جریان با استفاده از پرش هیدرولیکی صورت می‌گیرد. جام غلتابی<sup>۵</sup> که در آن با ایجاد جریان چرخشی و غلتاندن آب، انرژی اضافی از بین می‌رود. جام پرتابی<sup>۶</sup> که در این سازه به منظور استهلاک انرژی، جریان آب با انجام یک پرش اسکی<sup>۷</sup> به صورت جت، به پایین‌دست سد پرتاب می‌گردد تا اثرات فرسایشی جریان بر روی سد و سازه‌های مهم اطراف سد کاسته شود.

امروزه از پرتابه جامی شکل به دلیل داشتن اطمینان قابل قبول در زمینه استهلاک انرژی به طور گسترده‌ای در سراسر جهان استفاده می‌گردد. پرتاب‌کننده جامی سازه‌ای است که در آن جریان آب جهت پرتاب هدایت می‌شود و جریان به صورت یک فواره پرتاب‌شونده در هوا در می‌آید و سپس در رودخانه فرود می‌آید. قسمتی از انرژی جریان فوق بحرانی در اثر اصطکاک با هوا مستهلک می‌گردد و عمده انرژی در اثر اختلاط و تلاطم در حفره فرسایشی که در محل فرود تشکیل می‌گردد مستهلک می‌شود. چنانچه بستر مقاوم نباشد از حوضچه فرود فواره<sup>۸</sup> استفاده می‌گردد.

پرتاب‌کننده جامی در سدهای بلند و در مواردی که سرعت جریان بیش از ۱۵ تا ۲۰ متر بر ثانیه باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. استفاده از پرتاب‌کننده جامی زمانی که شرایط زمین‌شناسی پایاب مناسب باشد، به خصوص برای سدهای بلند ارزان‌ترین روش استهلاک انرژی می‌باشد و نسبت به سایر مستهلک‌کننده‌های انرژی متداول از قبیل حوضچه‌های هیدرولیکی و جام‌های غلتابی از مزایای اقتصادی و ایمنی قابل ملاحظه‌ای برخوردار است. از این رو بررسی جریان بر روی پرتاب‌کننده برای طراحی سازه‌های مستهلک‌کننده

## مدل‌سازی عددی و تحلیل هیدرودینامیک جریان در پرتابه جامی شکل و کانال نزدیک‌شونده

سعید فرزین<sup>۱</sup>، حجت کریمی<sup>۲</sup>، میلاد فضل‌اله نژاد<sup>۳</sup> و شهاب نیر<sup>۴</sup>  
تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۲/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۲۳

## چکیده

پرتابه جامی شکل بخش اصلی از یک مجموعه استهلاک انرژی جریان به نام سیستم پرش اسکی محسوب می‌شود. در این پژوهش پارامترهای هیدرولیکی طول پرتاب، سرعت، فشار و عدد فرود با ۴ دبی مختلف توسط نرم‌افزار Flow-3D روی دو مدل شامل سرریز با پرتابه جامی شکل ساده و سرریز با پرتابه جامی شکل بعلاوه کانال نزدیک‌شونده بررسی گردیده است. به منظور مدل‌سازی آشفستگی، از مدل‌های RNG و  $k-\varepsilon$  استفاده شد و صحت‌سنجی نشان داد که مدل  $k-\varepsilon$  دقت بالاتری دارد. نتایج حاکی از آن بود که مدل شامل کانال نزدیک‌شونده نسبت به مدل دیگر، طول پرتاب و استهلاک انرژی بیشتری دارد. حداکثر سرعت در این مدل، در دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه و برابر ۲/۳۰ متر بر ثانیه در ابتدای کانال تشکیل شد. بیشترین درصد افزایش سرعت مدل شامل کانال نزدیک‌شونده نسبت به مدل نخست نیز برابر ۳۲ درصد و مربوط به دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه بود. مقایسه پروفیل‌های فشار نیز نشان داد تغییرات فشار در دو مدل تفاوت محسوسی ندارد. علاوه بر این حداکثر فشار، در مدل نخست و در دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه و برابر ۲۸۳۳ پاسکال در پنجه سرریز رخ داد. همچنین، مکان حداکثر عدد فرود (برابر با ۴/۵) در مدل شامل کانال نزدیک‌شونده بر روی کانال و در مدل نخست، در محل فرود پرتابه بود.

- ۱- نویسنده مسئول و استادیار گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان. (Saeed.farzin@semnan.ac.ir)
- ۲- استادیار، گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.
- ۳- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی عمران، گروه آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه سمنان.
- ۴- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی عمران، گروه آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه سمنان.

5. Roller bucket
6. Flip bucket
7. Ski jump
8. Plunge pool

انرژی اهمیت زیادی دارد. پرش اسکی برای اولین بار قبل از سال ۱۹۳۰ در فرانسه استفاده شد و از آن روز تاکنون انواع گوناگونی از جام‌های پرتابی با اندازه‌ها و زوایای مختلف در سراسر جهان در حال اجرا و بهره‌برداری است [۱۳]. مدل‌سازی این پدیده‌ها به کمک مدل‌های عددی می‌تواند سودمند و مفید باشد. از جمله مدل‌های عددی که اخیراً کاربرد زیادی در این زمینه پیدا کرده و پاسخ‌های قابل قبولی در مورد شبیه‌سازی‌های هیدرولیکی تولید کرده است، مدل Flow-3D می‌باشد [۴].

Flow-3D یک نرم‌افزار نیرومند تحلیلی در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۱</sup> می‌باشد. این نرم‌افزار قابلیت تحلیل سه‌بعدی میدان جریان را دارد و محدوده کاربردی بسیار وسیعی در مسائل مربوط به سیالات دارد [۵].

یکی از قابلیت‌های این برنامه در زمینه آنالیزهای هیدرولیکی، توانایی در استفاده از روش جزء حجمی<sup>۲</sup> در مدل کردن جریان‌های با سطح آزاد است که مسائل موجود در روش‌های مبتنی بر آزمون و خطا را برطرف کرده است. این روش، حجم سیال در هر سلول مستطیلی را ثبت می‌کند. این حجم با احجام سلول‌های مجاور مقایسه می‌شود تا شیب، موقعیت و انحناهای سیال درون سلول مشخص شود [۴].

مسائل مربوط به پرتابه‌های جامی همواره مورد توجه محققان بوده است. جون و هگر [۷] پرتاب‌کننده جامی را به صورت یک کانال منشوری مستطیل شکل و جام دارای منحنف‌کننده جریان جانبی مورد ارزیابی قرار دادند. در این تحقیق اثرات مقیاس در مدل‌های هیدرولیکی، توزیع فشار در باکت، مسیر پرتابه جریان، شرایط ایجاد امواج شوکی و روابط آب بندشدگی در جام‌ها بررسی گردید. هلر و همکاران [۶] به مطالعه آزمایشگاهی پرتابه‌های جامی پرداختند و حداکثر فشار و محل وقوع آن را در پرتابه جامی بررسی کردند. نتایج نشان داد عدد فرود، انحناهای نسبی جام و زاویه جام اثر قابل توجهی روی حداکثر فشار و محل وقوع آن دارند. لارس و همکاران [۸] با استفاده از روش اجزای محدود جزئی توزیع فشار و هندسه جت پرتابی را در پرتاب‌کننده جامی بررسی نمودند. استینر و همکاران [۱۷] توزیع فشار در مستهلک‌کننده‌های پرش اسکی با جام مثلثی را توسط مدل آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاکی از آن بود عدد فرود، ارتفاع نسبی جام و زاویه دفلیکتور اثر قابل توجهی روی حداکثر فشار و توزیع آن در جام دارد. یمینی و کاویانپور [۱۸] به بررسی فشار استاتیک و دینامیک روی پرتابه جامی شکل ساده پرداختند و مقادیر فشار حداکثر را در دو مدل پرتابه ساده بدست آوردند و نتایج با دیگر تحقیقات مقایسه شد. نظری و همکاران [۹] تحلیل فشار دینامیکی در پرتابه‌های جامی شکل از مطالعات مدل پنج سد را مورد بررسی قرار دادند که در نهایت روابط مقادیر فشار دینامیکی حداکثر و حداقل در امتداد پرتابه جامی شکل و هم‌چنین

توزیع فشار در راستای محور مرکزی پرتابه جامی استخراج شد. شریف و راوری [۱۶] به بررسی آزمایشگاهی و عددی اثر جدایی جریان روی اتلاف انرژی در پرتابه مرکب با دو زاویه پرتاب مختلف پرداختند که نتایج نشان داد پرتابه مرکب با زاویه پرتاب کوچک‌تر مناسب‌تر است. سبزی و افروس [۱۲] توزیع فشار روی تاج سرریز را با Ansys-Fluent بررسی کردند و نشان دادند که شیب ملایم، افزایش فشار را به سمت تاج سرریز هدایت می‌کند و هم‌چنین موجب افزایش بار هیدرولیکی در مخزن سد می‌گردد. پرسایی و همکاران [۱۱] به بررسی پدیده کاویتاسیون روی پرتابه سرریز سد بالاورد به کمک مدل عددی پرداختند. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان داد که وقوع کاویتاسیون بر اساس شاخص کاویتاسیون بحرانی ۰/۲۵ در طول سرریز و پرتابه سد بالاورد امکان‌پذیر نمی‌باشد.

در کشور ما ایران نیز، سخایی و همکاران [۱۵] سرعت و عمق جریان بر روی سرریز اوجی سد جره را با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D شبیه‌سازی نمودند و نتایج حاصل را با نتایج مدل فیزیکی مورد مقایسه قرار دادند. ایشان به این نتیجه رسیدند که مقادیر محاسبه شده دو پارامتر فوق از مطابقت قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی برخوردارند. صفوی و همکاران [۱۳] به مطالعه آزمایشگاهی جام‌های پرتابی در پایانه سرریزهای آزاد و دریچه‌دار پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که نحوه بهره‌برداری از سرریز، به ازای دبی‌های کم تاثیر زیادی در طراحی جام‌ها دارد و ممکن است پرش هیدرولیکی تشکیل شده بر روی جام، در دبی‌های اولیه سیلاب ایمنی جام را به خطر اندازد. عطارزاده و همکاران [۱] به کمک مدل عددی Fluent مشخصه‌های جریان از جمله پروفیل سطح آب، سرعت و فشار را در محل تغییر شیب ناگهانی سرریز مورد بررسی قرار دادند که مشخص شد نتایج حاصل از مدل عددی از جمله پروفیل سرعت و توزیع فشار در بستر در تمام زوایای تغییر شیب، در قسمت کانال سرریز و نیز محل تغییر شیب با نتایج آزمایشگاهی مطابقت خوبی دارند. نیک‌پور و همکاران [۱۰] با شبیه‌سازی دو بعدی با استفاده از روش‌های المان محدود و حجم محدود در تحلیل جریان آب روی سرریز اوجی به این نتیجه رسیدند که روش حجم محدود در شبیه‌سازی هیدرولیک جریان عملکرد بهتری داشته است.

با توجه به موارد ذکر شده، مطالعه جامع سازه پرتابه با عملکرد مؤثر آن در استهلاک انرژی جریان خروجی به خصوص در سرریزهای بلند از اهمیت زیادی برخوردار است. در این راستا، شبیه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی جریان از جمله تغییرات فشار، سرعت و عدد فرود طول پرتاب در سرریز با پرتابه جامی شکل ساده و به ویژه پرتابه جامی شکل با کانال نزدیک‌شونده، از جمله موضوعات مهم در طراحی این سازه‌ها می‌باشد که مطالعات چندانی در مورد آن صورت نپذیرفته است و در این پژوهش بدان پرداخته شده است. نتایج تحقیق حاضر اطلاعات مناسبی برای طراحی این سازه‌ها و سازه‌های وابسته ارائه می‌دهد.

1. Computational Fluid Dynamics
2. Volume Fraction Method

قوانین حاکم بر جریان یک سیال تراکم‌ناپذیر لزج، توسط معادلات پیوستگی و اندازه حرکت در جهت محورهای مختصات که به معادلات ناویر استوکس معروف هستند، بیان می‌شوند. این معادلات در واقع بیانگر پایداری جرم و اندازه حرکت به بیان ریاضی می‌باشند. چنانچه المانی از سیال به عنوان حجم کنترل ثابت در فضای محاسباتی در نظر گرفته شود در این صورت نیروهای وارد بر آن و اصل بقای جرم در این المان به صورت معادلات مشتق جزئی نمایان می‌شوند. رابطه ۱ و ۲ به ترتیب رابطه پیوستگی و اندازه حرکت در جهت اختیاری  $i$  می‌باشند.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i + \nu \nabla^2 u_i \quad (2)$$

در روابط ۱ و ۲،  $u_i$  مولفه سرعت لحظه‌ای در جهت  $i$  ( $m/s$ )،  $\nu$  لزجت دینامیک سیال ( $N \cdot s/m^2$ )،  $\rho$  چگالی سیال ( $kg/m^3$ )،  $g_i$  مولفه شتاب ثقل در جهت  $i$  ( $m/s^2$ ) و  $p$  فشار در هر نقطه از سیال ( $Pa$ ) می‌باشد [۴].

نرم‌افزار Flow-3D از روش‌های دقت مرتبه اول و دوم در حل معادلات بهره می‌برد. در این نرم‌افزار، معادلات حاکم بر جریان غیر قابل تراکم به صورت روابط ۳ و ۴ می‌باشد.

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V_F} (u_i A_i \frac{\partial u_i}{\partial x_i}) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i + f_i \quad (4)$$

در روابط ۳ و ۴،  $u$ ،  $v$  و  $w$  مولفه‌های سرعت سیال در جهت‌های  $x$ ،  $y$  و  $z$  ( $m/s$ )،  $V_F$  کسر حجمی جریان ( $m^3$ )،  $A_x$ ،  $A_y$  و  $A_z$  کسرهای سطحی جریان در جهت‌های  $x$ ،  $y$  و  $z$  ( $m^2$ )،  $\rho$  چگالی سیال ( $kg/m^3$ )،  $p$  فشار در هر نقطه از سیال ( $Pa$ )،  $g_i$  مولفه شتاب ثقل در جهت  $i$  ( $m/s^2$ ) و  $f_i$  بیانگر تنش رینولدز ( $Pa$ ) می‌باشد [۴].

### مدل‌سازی آشفتگی

مدل‌های آشفتگی زیادی توسط محققان برای شبیه‌سازی جریان‌های آشفته تدوین شده است. تعداد معادلات دیفرانسیل مورد استفاده برای کمیت‌های آشفتگی به دسته‌های مختلفی شامل مدل‌های صفرمعادله‌ای، مدل‌های تک‌معادله‌ای، مدل‌های دومعادله‌ای، مدل‌های دارای معادله تنش و مدل‌های شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ<sup>۱</sup> تقسیم می‌شوند. شبیه‌سازی آشفتگی در Flow-3D با استفاده از یکی از پنج مدل آشفتگی طول اختلاط پراتل<sup>۲</sup>، یک

1. Large Eddy Simulation Models (LES)
2. Prandtl mixing-length model

معادله‌ای انرژی جنبشی آشفتگی<sup>۳</sup>، مدل دو معادله‌ای  $k-\epsilon$ <sup>۴</sup>، مدل گروه‌های نرمال شده (RNG)<sup>۵</sup> و مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ صورت می‌گیرد. مدل‌های آشفتگی استفاده شده در تحقیق حاضر به صورت زیر است:

### مدل آشفتگی K-ε

معادله K-ε شامل دو معادله انتقال برای انرژی جنبشی آشفتگی و اتلاف آن است که K معرف انرژی جنبشی آشفتگی و  $\epsilon$  ( $m^2/s^3$ )، کمیت اتلاف آشفتگی می‌باشد. معادله انتقال برای اتلاف آشفتگی،  $\epsilon_T$  مطابق رابطه (۷) تعریف می‌شود:

$$\frac{\partial \epsilon_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} (uA_x \frac{\partial \epsilon_T}{\partial x} + vA_y \frac{\partial \epsilon_T}{\partial y} + wA_z \frac{\partial \epsilon_T}{\partial z}) = \frac{CDIS1 \cdot \epsilon_T}{K_T} (P_T + CDIS3 \cdot G_T) + Diff_{\epsilon} - CDIS2 \frac{\epsilon_T^2}{K_T} \quad (5)$$

در رابطه (۵)، CDIS1، CDIS2، CDIS3 پارامترهای بی‌بعدی هستند که مقدارشان برای مدل K-ε، به ترتیب دارای مقادیر پیشفرض ۱/۴۴، ۱/۹۲، ۰/۲ هستند [۳].

### مدل آشفتگی RNG

مدل آشفتگی RNG قادر است ضرایبی که در مدل K-ε به صورت تجربی استخراج شده‌اند را به‌طور صریح بیان کند. این مدل در جریان‌های با نواحی برشی قوی و شدت آشفتگی کم، نتایج دقیق‌تری را تولید می‌کند. مدل آشفتگی RNG برای استخراج معادلات متوسط‌گیری شده برای کمیت‌های آشفتگی مانند انرژی جنبشی آشفتگی، از روش‌های آماری بهره می‌برد و مقدار پارامترهای CDIS1 و CDIS2 در این مدل، به ترتیب ۱/۴۲ و ۱/۶۸ می‌باشد [۳].

### مدل‌سازی شرایط مرزی

در این تحقیق از نسخه ۱۰/۱ نرم‌افزار Flow-3D جهت شبیه‌سازی عددی استفاده شده است. این نرم‌افزار دارای ۱۰ نوع شرط مرزی بر روی وجه‌های شبکه حل است. شروط مرزی که در این تحقیق استفاده شده است شامل متقارن<sup>۶</sup>، دیوار<sup>۷</sup>، دبی خروجی<sup>۸</sup>، سرعت<sup>۹</sup> و دبی ورودی<sup>۱۰</sup> می‌باشد. شرط مرزی متقارن نشان‌دهنده این است که شبکه محاسباتی در جهاتی خیلی عریض است و امکان مدل‌سازی در کل آن ناحیه نیست. شرط دیوار به منظور مدل‌کردن دیواره و یا مکان‌هایی که جسم صلب در مرز واقع شده است استفاده می‌شود. شرط دبی خروجی برای مرزهایی استفاده می‌شود که جریان از آن قسمت خارج می‌گردد. این شرط مرزی برای سیالات غیر قابل تراکم و دارای سرعت کم کاربرد دارد و بهترین شرط مرزی برای مرزهای

3. One-equation turbulent energy model
4. Two equation  $k-\epsilon$  model
5. Renormalized group model
6. Symmetry
7. Wall
8. Outflow
9. Specified velocity
10. Volume flow rate

مدل آزمایشگاهی شامل کانال ورودی افقی به طول ۱ متر، جام پرتابی و کانال خروجی که ۰/۲۵ متر پایین تر از کانال ورودی قرار گرفته است، می باشد. شعاع جام ۰/۱ متر و زاویه انحراف ۱۰ درجه می باشد. تاج باکت به اندازه  $S$  بالاتر از کانال پایین دست قرار گرفته است که  $w = R(1 - \cos \beta)$  ارتفاع باکت،  $R$  شعاع باکت،  $\beta$  زاویه انحراف باکت و  $S - w$  اختلاف ارتفاع بین باکت و کانال پایین دست می باشد. جدول ۱ شامل شرایط هندسی و هیدرولیکی آزمایشات صورت گرفته در جام پرتابی می باشد.

جدول ۱- شرایط هندسی و هیدرولیکی آزمایشات صورت گرفته در جام پرتابی [۵]

Table 1. Hydraulic and geometric conditions of test in flip bucket

عدد فرود (Fr)	سرعت ورودی $V_0(m/s)$	عمق ورودی $h_0(m)$	هندسه پرتابه جامی
3	1.88	0.040	
4	2.5	0.040	
5	3.1	0.040	$R = 0.1$
7	4.4	0.040	$\beta = 10$
8.5	5.3	0.040	
10	6.3	0.041	

شکل ۲ پروفیل سطح آب را با عدد فرود ۱۰ و مدل های آشفتگی RNG و  $k-\epsilon$  نشان می دهد. با توجه به شکل پروفیل سطح آب با هر دو مدل آشفتگی، مطابقت مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارند. شبکه بندی مدل عددی با طول ۷/۵ متر، عرض ۰/۵ متر و ارتفاع ۱ متر و هم چنین ابعاد سلولی ۲ سانتی متر انجام شد. در بالادست شبکه حل شرط مرزی سرعت، در پایین دست شرط مرزی خروجی، در کف شرط مرزی دیوار و در مرز فوقانی و دیواره ها شرط متقارن حاکم می باشد. در جدول ۲ نتایج ارزیابی مدل آورده شده است. با توجه به جدول ۲، به دلیل بالا بودن ضریب همبستگی و نزدیک بودن مقادیر شاخص های ارزیابی نسبت به حالت بهینه، تحلیل با مدل های آشفتگی RNG و  $k-\epsilon$  از جواب های قابل قبولی برخوردار می باشند. اما در دو شاخص ارزیابی، تحلیل با مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  به حالت بهینه نزدیک تر است.

جدول ۲- نتایج ارزیابی مدل

Table 2. Results of model evaluation

R <sup>2</sup>	RMSE	MAE	شاخص ارزیابی
0.97	1.346	0.963	تحلیل با مدل آشفتگی RNG
0.98	0.406	0.356	تحلیل با مدل آشفتگی $k-\epsilon$

خروجی در حوزه هیدرولیک است. برای تعریف سرعت جریان در مرز از شرط سرعت می شود. شرط دبی ورودی برای تعریف دبی در مرز ورودی بکار می رود. هم چنین میزان دبی عبوری از مرز را می توان در یک جهت یا هر سه جهت هم زمان به صورت درصدی تعریف کرد [۵].

### معیارهای ارزیابی مدل

برای مقایسه کمی عملکرد مدل های پیشنهادی می توان از تجزیه و تحلیل خطاهای باقی مانده و اختلاف بین مقادیر اندازه گیری شده و برآورد شده بهره گرفت. در این تحقیق از میانگین مطلق خطا ( $MAE^1$ )، جذر میانگین مربعات خطا ( $RMSE^2$ ) و ضریب همبستگی ( $R^2$ ) برای ارزیابی عملکرد مدل استفاده شد. بیان ریاضی این آزمون ها در روابط ۵، ۶ و ۷ آورده شده است.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum |y_i^* - y_i| \quad (6)$$

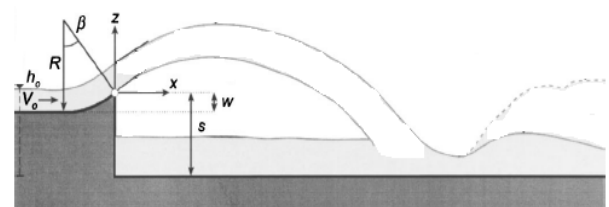
$$RMSE = \left[ \frac{1}{n} \sum (y_i^* - y_i)^2 \right]^{0.5} \quad (7)$$

$$R^2 = \frac{Cov(y_i^*, y_i)}{\sigma_{y_i^*} \sigma_{y_i}} \quad (8)$$

منظور از  $y_i^*$  و  $y_i$  در روابط ۶ و ۷ به ترتیب تراز سطح آب در مدل عددی، تراز سطح آب اندازه گیری شده و تعداد کل داده ها می باشد. در رابطه ۸ نیز  $Cov(y_i^*, y_i)$  و  $\sigma_{y_i^*} \sigma_{y_i}$  به ترتیب کوواریانس تراز سطح آب مدل عددی و اندازه گیری شده و انحراف معیارهای آنها می باشد [۳].

### اعتبارسنجی مدل عددی

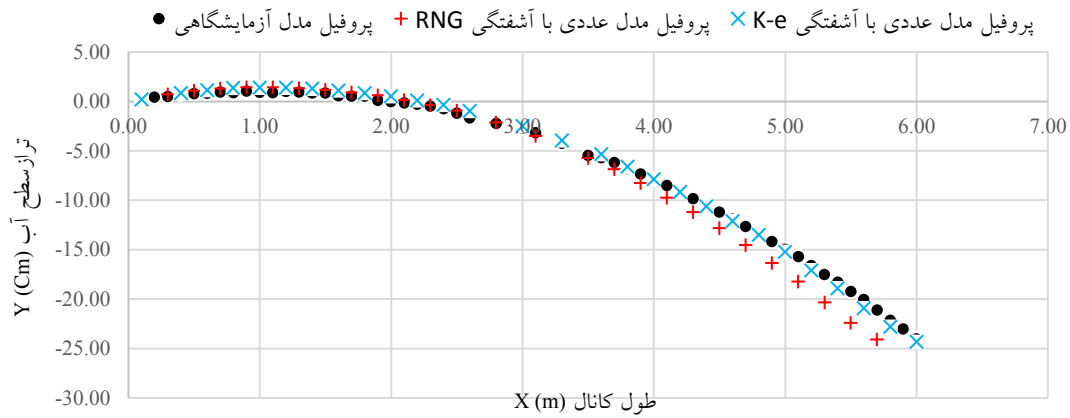
به منظور اعتبارسنجی مدل عددی و بدست آوردن بهترین مدل آشفتگی برای پروفیل سطح آب در پرتاب کننده جامی، از آزمایشات هلر و همکاران [۶] استفاده شده است. این آزمایشات در یک کانال مستطیلی به عرض ۰/۵ متر، ارتفاع ۰/۷ متر و طول ۷ متر انجام شده است. کف کانال و دیواره راست از جنس PVC و دیواره چپ کانال از جنس شیشه می باشد. شکل ۱ شماتیک مدل آزمایشگاهی مورد نظر را نشان می دهد.



شکل ۱- طرح مدل آزمایشگاهی [۶]

Figure 1. Laboratory model design

1. Mean Absolute Error
2. Root Mean Square Error



شکل ۲- شبیه‌سازی پروفیل سطح آب با مدل‌های آشفتگی RNG و  $k-\varepsilon$  و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی

Figure 2. Simulation of water surface profile with RNG and  $k-\varepsilon$  turbulence models and compared with experimental results

ساخته شده است. پرتابه جامی شکل هر دو مدل با شعاع ۸ سانتی‌متر و ارتفاع ۴/۵ سانتی‌متر می‌باشد که مدل دوم شامل یک کانال نزدیک‌شونده بین سرریز و پرتابه با طول ۱۳ سانتی‌متر و شیب ۱:۳ می‌باشد.

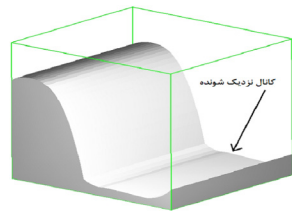
در جدول ۳ نیز شرایط هیدرولیکی و مرزی تحلیل‌های صورت گرفته در تحقیق حاضر نشان داده شده است. با توجه به تعداد دبی‌ها، مجموعاً ۱۶ تحلیل صورت گرفته است. به عنوان مثال منظور از  $X_{min}$  و  $X_{max}$  به ترتیب صفحه ابتدایی و انتهایی شبکه حل بر روی محور X می‌باشند. شبکه‌بندی مدل عددی با طول ۱ متر، عرض ۰/۳ متر و ارتفاع ۰/۴ متر و همچنین ابعاد سلولی ۱ سانتی‌متر انجام شد. در بالادست شبکه حل شرط مرزی دبی ورودی، در پایین‌دست شرط مرزی خروجی، در کف شرط مرزی دیوار و در مرز فوقانی و دیواره‌ها شرط متقارن حاکم می‌باشد. به عنوان نمونه، شرایط مرزی و شبکه‌بندی مدل ۲ در شکل ۴ نشان داده شده است.

## نتایج و بحث

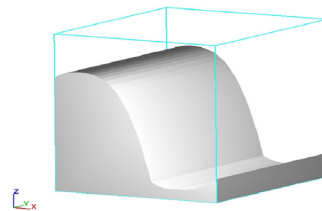
### مدل‌سازی عددی

آزمایش‌های مورد بررسی در مطالعه عددی حاضر، توسط صادقی عسکری و قمشی [۱۳] در یک فلوم به طول ۱۵ متر، عرض ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر به انجام رسیده است. آزمایش‌ها روی دو مدل پرتابه جامی شکل در انتهای سرریز اوجی انجام گرفت. مدل ۱ شامل سرریز با پرتابه جامی شکل ساده و مدل ۲ شامل سرریز با پرتابه جامی شکل با کانال نزدیک‌شونده می‌باشد. البته در مطالعه صادقی عسکری و قمشی [۱۳]، تلفات انرژی ناشی از دفلیکتور، در دو مدل سرریز در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفت، لیکن در پژوهش حاضر بررسی عددی پارامترهای سرعت، فشار، عدد فرود و طول پرتاب در دو مدل سرریز مذکور انجام شده است.

شکل ۳ نمایی از دو مدل را نشان می‌دهد. سرریز هر دو مدل طبق استاندارد USBR با ارتفاع ۲۳ سانتی‌متر و از جنس فایبرگلاس



شکل ۳- ب



شکل ۳- الف

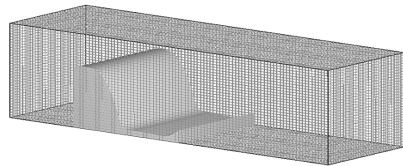
شکل ۳- نمای سه‌بعدی مدل‌های شبیه‌سازی شده، الف- سرریز با پرتابه جامی شکل ساده، ب- سرریز با پرتابه جامی شکل با کانال نزدیک‌شونده

Figure 3. View a simulated 3-dimensional models, a. Overflow with simple flip bucket, b. Overflow with flip bucket and approach channel

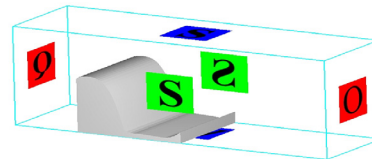
جدول ۳- شرایط هیدرولیکی و مرزی جریان مورد استفاده در مدل‌سازی

Table 3. Hydraulic and flow boundary conditions used in modeling

شرایط مرزی						مدل آشفتگی	دبی ( $L/s$ )	مدل
$Z_{max}$	$Z_{min}$	$Y_{max}$	$Y_{min}$	$X_{max}$	$X_{min}$			
متقارن	دیوار	متقارن	متقارن	خروجی	دبی ورودی	RNG, $k-\varepsilon$	10, 15, 20, 25	مدل ۱
متقارن	دیوار	متقارن	متقارن	خروجی	دبی ورودی	RNG, $k-\varepsilon$	10, 15, 20, 25	مدل ۲



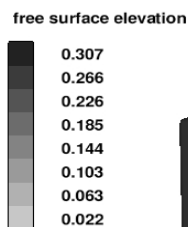
شکل ۴-ب



شکل ۴-الف

شکل ۴- شرایط مرزی و شبکه‌بندی مدل ۲، الف- شرایط مرزی، ب- شبکه‌بندی

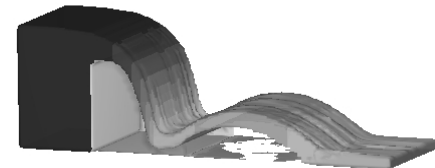
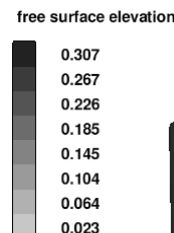
Figure 4. Boundary conditions and meshing model, a. Boundary conditions, b. Meshing



(m)

X (m)

شکل ۵-ب



(m)

X (m)

شکل ۵-الف

شکل ۵- پروفیل سطح آب در مدل ۱ با دبی ۱۵ L/s، الف- مدل‌سازی با آشفتگی  $k-\varepsilon$ ، ب- مدل‌سازی با آشفتگی RNG

Figure 5. Water surface profile in model 1 with  $Q=15 L/s$ , a. Modeling with  $k-\varepsilon$  turbulence, b. Modeling with RNG turbulence

در همه موارد، جریان در مدل ۲ در فاصله دورتری نسبت به مدل ۱ پرتاب شد. برای مثال طول پرتاب در مدل ۱ و ۲ با دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه در شکل ۶ آورده شده است. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده، طول پرتاب در مدل ۲، ۳۷ سانتی‌متر و در مدل ۱ حدود ۲۵ سانتی‌متر می‌باشد.

بررسی روند تغییرات سرعت و الگوی جریان عبوری از روی

سرریز

به طور کلی در سرریزهای بلند با افزایش دبی عبوری، سرعت در تمامی نواحی سرریز افزایش می‌یابد و محدوده سرعت‌های ماکزیمم در انتهای سرریز به وجود می‌آید و کمترین مقدار سرعت که دارای بیشترین عمق نسبت به نواحی دیگر سرریز می‌باشد، قبل از رسیدن جریان به تاج سرریز مشاهده می‌شود.

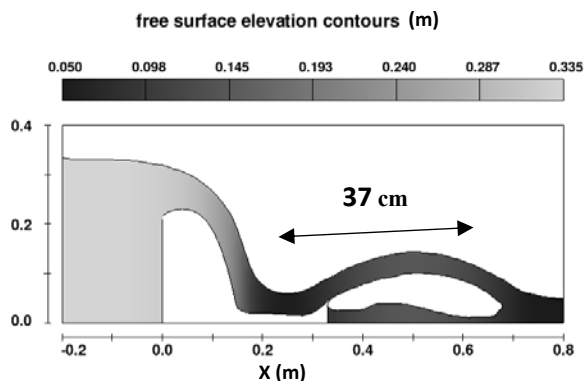
از آنجا که در این تحقیق، پارامتر سرعت در محدوده سرریز بررسی

شبیه‌سازی پروفیل سطح آزاد

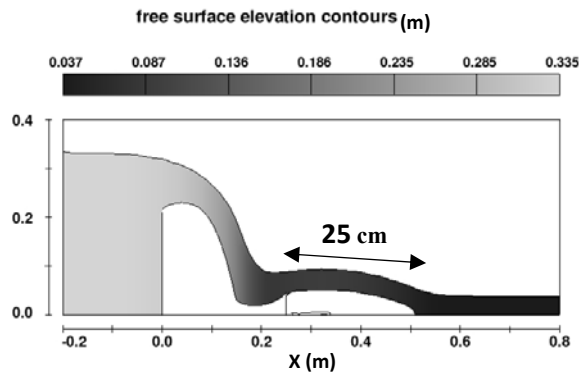
در ادامه پروفیل‌های سطح آزاد جریان مورد بررسی قرار گرفته است. برای نمونه می‌توان تغییرات سطح آزاد آب را در مدل ۱ با دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه در دو مدل آشفتگی RNG و  $k-\varepsilon$  در شکل ۵ مشاهده و مقایسه کرد. با توجه به شکل، تغییرات محسوسی در نتایج شبیه‌سازی‌ها با دو مدل آشفتگی مذکور مشاهده نمی‌شود. بنابراین طبق نتایج صحت‌سنجی، از این پس در ادامه پژوهش حاضر، نتایج شبیه‌سازی مدل‌ها با مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  که نتایج دقیق‌تری نسبت به مدل آزمایشگاهی ارائه داد، مورد بحث قرار می‌گیرد.

بررسی طول پرتاب جریان

از آنجا که در مدل ۲، سرریز شامل کانال نزدیک‌شونده می‌باشد، این امکان را به جریان می‌دهد تا در کانال سرعت بیشتری بگیرد و در فاصله دورتری پرتاب شود. با مقایسه طول پرتاب دو مدل، تقریباً

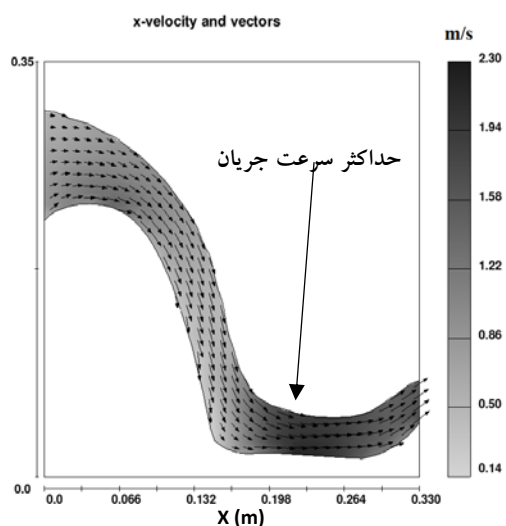


شکل ۶- ب

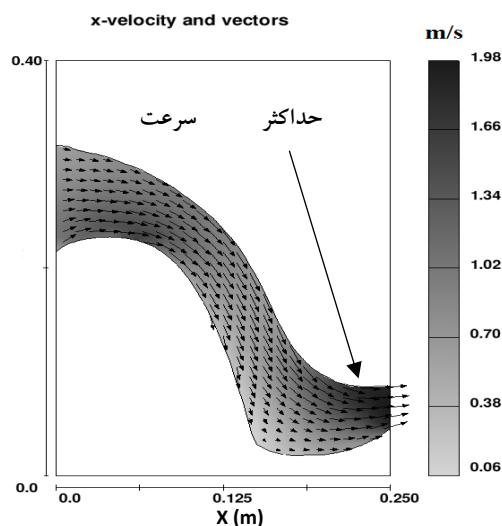


شکل ۶- الف

شکل ۶- مقایسه طول پرتاب با دبی ۲۵ L/s، الف- مدل ۱، ب- مدل ۲  
Figure 6. Compare the jet length with  $Q = 25 \text{ L/s}$ , a. Model 1, b. Model 2



شکل ۷- ب



شکل ۷- الف

شکل ۷- حداکثر سرعت و الگوی جریان روی سرریز و پرتابه در مدل‌ها، الف- مدل ۱ با دبی ۲۵ L/s، ب- مدل ۲ با دبی ۲۰ L/s  
Figure 7. Maximum velocity and flow pattern over the spillway and flip bucket in models, a. Model 1, and b. Model 2

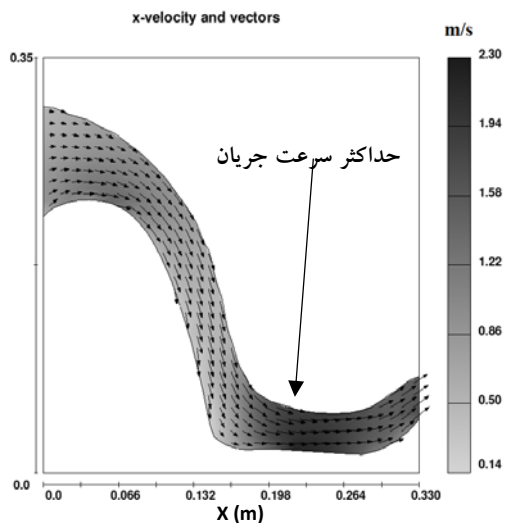
استهلاک انرژی بیشتری است و جریان را در فاصله دورتری پرتاب می‌کند و از طرف دیگر خطر پدیده کاویتاسیون در سرعت‌های بالا آن را تهدید می‌کند.

معمولاً هنگامی که سرعت جریان در قسمتی از سازه هیدرولیکی از یک حد مجاز فراتر رود، آن سازه در معرض خسارت ناشی از خلأزایی قرار می‌گیرد. برجستگی‌ها و ناصافی‌های سطوح بتنی نیز باعث انحراف خطوط جریان و کاهش فشار در بعضی نقاط می‌گردد که چنانچه این کاهش فشار بر اثر افزایش سرعت باشد، شرایط آستانه یا آغاز خلأزایی (خوردگی) پیش خواهد آمد.

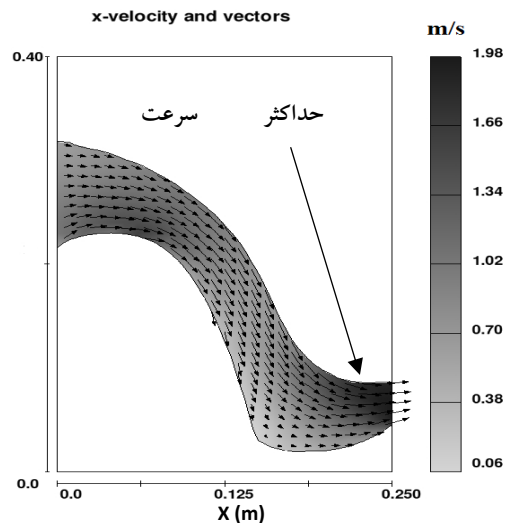
هم‌چنین در شکل ۷ نمایش برداری جریان عبوری از روی سرریز و پرتابه برای هر دو مدل با دبی ۲۵ و ۲۰ لیتر بر ثانیه نشان داده شده است. در واقع در این تصویر شبیه‌سازی شده، جهت حرکت جریان

شد، با توجه به شکل ۷ حداکثر سرعت در دو مدل در دبی ۲۵ و ۲۰ لیتر بر ثانیه روی داده است. با بررسی روند تغییرات سرعت جریان روی سرریز و پرتابه، مشاهده می‌شود که جریان در بالادست سرریز دارای سرعت بسیار پایین‌تری نسبت به سایر قسمت‌های سرریز است و محدوده این سرعت در مدل ۲ با دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه، بین ۰/۱۴ تا ۰/۵ متر بر ثانیه می‌باشد. حداکثر سرعت جریان نیز در مدل ۱ و ۲ به ترتیب در انتهای پرتابه و فاصله ۲۳ سانتی‌متری از ابتدای سرریز رخ داده است و به ترتیب برابر ۱/۹۸ و ۲/۳۰ متر بر ثانیه می‌باشد. در شکل نواحی کم‌سرعت با رنگ سفید و نواحی که دارای سرعت جریان زیاد هستند با رنگ سیاه نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۷ جریان در مدل ۲ که شامل کانال نزدیک‌شونده می‌باشد دارای سرعت بیشتری است. از یک جهت مدل ۲ دارای



شکل ۸-ب



شکل ۸-الف

شکل ۸- حداکثر فشار روی سرریز و پرتابه در مدل‌ها، الف- مدل ۱ با دبی ۲۵ L/s، ب- مدل ۲ با دبی ۲۵ L/s

Figure 8. Maximum pressure over the spillway and flip bucket in models with  $Q = 25 \text{ L/s}$ , a. Model 1, b. Model 2

بالا و میزان سرعت جریان پایین باشد تا نهایتاً اندیس کاویتاسیون از حد بحرانی کمتر نشود. در سرریزها، کاهش ابعاد به صورت همگرا موجب افزایش عمق و به تبع آن باعث افزایش فشار جریان می‌گردد. همچنین تغییر انحنای کف موجب افزایش فشار خواهد شد. یکی دیگر از مؤثرترین و اقتصادی‌ترین روش‌های جلوگیری از خسارات ناشی از کاویتاسیون هوادهی جریان است.

#### بررسی روند تغییرات عدد فرود روی شبکه حل

از جمله نیازهای طراح تعیین سرعت آب در پای سرریز می‌باشد. همچنین تعیین سرعت آب پس از عبور از روی بدنه می‌تواند در محاسبه عدد فرود و طرح حوضچه آرامش در پایین‌دست سرریز نقش مهمی داشته باشد. از آنجا که جریان در قسمتی از روی سرریز به صورت متغیر تدریجی بوده و از طرفی افت‌های انرژی دیگر نیز در جریان تاثیر می‌گذارند، محاسبه عدد فرود مشکل و از پیچیدگی خاصی برخوردار می‌باشد. از سوی دیگر مشخص بودن عدد فرود در پنجه سرریز می‌تواند در تخمین عمق آبستگي در پایین‌دست پرتابه جامی شکل مهم باشد. شکل ۹ روند تغییرات عدد فرود را نشان داده است. با توجه به شکل حداکثر عدد فرود در هر دو مدل در دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه صورت گرفته است. جریان زیربحرانی تا تاج سرریز و جریان فوق بحرانی از تاج سرریز تا پایین‌دست برقرار می‌باشد. حداقل عدد فرود در بالادست سرریز و حداکثر عدد فرود در مدل ۱ و ۲ به ترتیب در محل فرود پرتابه و کانال نزدیک‌شونده رخ داده است. خلاصه نتایج بدست آمده از توزیع فشار، سرعت در جهت طولی کانال و عدد فرود در جدول ۴ ذکر شده است. جدول ۴ مقادیر حداکثر و حداقل فشار، سرعت و عدد فرود را با استفاده از مدل  $k-\epsilon$  و همچنین درصد افزایش یا کاهش فشار و سرعت را در تحلیل‌های مختلف نشان می‌دهد.

و برخورد بخشی از جریان با کف سرریز و تغییر جهت دادن آن نمایش داده شده است.

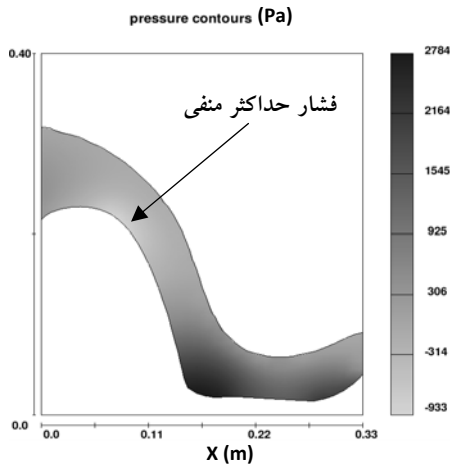
#### بررسی روند تغییرات فشار روی سرریز

به طور کلی در سرریزهای بلند با افزایش دبی عبوری، از فشار انتهای سرریز کاسته می‌شود و مکش در انتهای سرریز افزایش می‌یابد که احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون را افزایش می‌دهد.

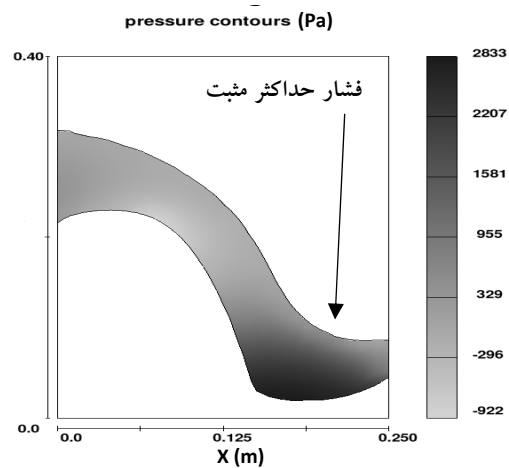
در شکل ۸ حداکثر فشار جریان عبوری روی سرریز مدل‌ها نشان داده شده است. در این شکل نواحی کم فشار با رنگ سفید و نواحی که دارای فشار زیادی هستند با رنگ سیاه نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین فشار در هر دو مدل با دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه، در انتهای سرریز و در فاصله ۱۷ سانتی‌متری از ابتدای سرریز روی داده است. در واقع در این ناحیه ارتفاع بیشتر آب نسبت به نواحی دیگر موجب افزایش فشار در این ناحیه شده و با عبور جریان از این ناحیه، بر سرعت جریان افزوده شده و در ابتدای کانال نزدیک‌شونده با توجه به افزایش سرعت عبور جریان و شتاب گرفتن جریان، شاهد کاهش فشار هستیم. در مقایسه دو مدل نیز، حداکثر فشار در سرریز با پرتابه جامی شکل ساده و برابر ۲۸۳۳ پاسکال در پنجه سرریز رخ داده است.

با توجه به شکل ۸ و از آنجا که فشار، بیشتر به ارتفاع آب روی سازه وابسته است در دو مدل ۱ و ۲ به دلیل تغییرات ارتفاع کم آب روی سرریز، تغییرات فشار محسوس نیست. به علت ارتفاع زیاد آب روی پنجه سرریز نسبت به نقاط دیگر، فشار حداکثر مثبت در این نقطه اتفاق می‌افتد. همین‌طور فشار حداکثر منفی در ابتدای قوس بعد از تاج سرریز به بالاترین حد خود می‌رسد که اگر با سرعت بالا همراه شود امکان ایجاد پدیده خلازایی بیشتر می‌شود. طراحی سرریز باید به گونه‌ای انجام شود که حتی الامکان در تمام طول سرریز فشار





شکل ۹- ب



شکل ۹- الف

شکل ۹- روند تغییرات عدد فرود با دبی ۱۰ L/s، الف- مدل ۱، ب- مدل ۲

Figure 9. Changing procedure of Froude number with  $Q = 10 \text{ L/s}$ , a. Model 1, b. Model 2

جدول ۴- نتایج بدست آمده از تحلیل مدل عددی

Table 4. The results of numerical modeling analysis

تحلیل‌ها	حداکثر- حداقل فشار (Pa)	حداکثر- حداقل سرعت (m/s)	حداکثر- حداقل عدد فرود	درصد افزایش فشار	درصد افزایش سرعت
مدل ۱ (دبی ۱۰ L/s)	(-268 - 2346)	(0.22 - 1.86)	(0.07 - 4.48)	0.47	14.52
مدل ۲ (دبی ۱۰ L/s)	(-271 - 2357)	(0.23 - 2.13)	(0.07 - 4.51)		
مدل ۱ (دبی ۱۵ L/s)	(-456 - 2617)	(0.17 - 1.68)	(0.09 - 3.77)	-0.19	32.14
مدل ۲ (دبی ۱۵ L/s)	(-455 - 2612)	(0.18 - 2.22)	(0.09 - 4.47)		
مدل ۱ (دبی ۲۰ L/s)	(-670 - 2720)	(0.11 - 1.84)	(0.12 - 3.66)	2.28	25.00
مدل ۲ (دبی ۲۰ L/s)	(-668 - 2782)	(0.14 - 2.30)	(0.12 - 3.45)		
مدل ۱ (دبی ۲۵ L/s)	(-922 - 2833)	(0.06 - 1.98)	(0.14 - 3.62)	-1.73	-0.51
مدل ۲ (دبی ۲۵ L/s)	(-933 - 2784)	(0.10 - 1.97)	(0.14 - 2.74)		

### نتیجه‌گیری

دو مدل قابل ملاحظه نیست. پس می‌توان نتیجه گرفت محل وقوع حداکثر فشار دینامیکی به عمق جریان وابسته است و همچنین با افزایش دبی مقدار این فشار بیشتر می‌شود و در قسمت انتهایی سرریز و میانی جام پرتابی رخ می‌دهد. نتیجتاً می‌توان بیان کرد که با افزایش ۲/۵ برابری دبی برای مدل‌های ۱ و ۲، فشار حداقل و حداکثر به صورت متوسط، به ترتیب ۳/۴۴ و ۱/۱۹ برابر می‌شود. هم‌چنین با افزایش دبی، افزایش سرعت در مدل ۲ به دلیل دارا بودن کانال نزدیک‌شونده محسوس‌تر از مدل ۱ می‌باشد و طبق ستون آخر جدول ۴ بیشترین افزایش سرعت مدل ۲ نسبت به مدل ۱، ۳۲ درصد و در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه اتفاق افتاده است.

با توجه به جدول ۴ حداکثر عدد فرود در هر دو مدل در دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه و برابر ۴/۵ می‌باشد. هم‌چنین با افزایش دبی جریان، حداکثر عدد فرود در هر دو مدل کاهش می‌یابد که یکی از دلایل

در این تحقیق مدل عددی Flow-3D، به منظور شبیه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی جریان از جمله تغییرات فشار، سرعت و عدد فرود در دو مدل سرریز با پرتابه جامی شکل ساده و پرتابه جامی شکل با کانال نزدیک‌شونده مورد استفاده قرار گرفت.

با توجه به جدول ۴ با افزایش دبی، میزان فشار مثبت وارده به پنجه سرریز و همین‌طور فشار منفی وارده به قوس ابتدایی بعد تاج سرریز در هر دو مدل بیشتر می‌شود. از آنجا که در مدل ۱ جریان آب بلافاصله توسط سازه پرتابه به پایین دست فرستاده می‌شود، فشار بیشتری را نسبت به مدل ۲ که جریان وارد کانال نزدیک‌شونده می‌شود در پنجه سرریز تحمل می‌کند. صحت این مطلب را می‌توان در دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه مشاهده کرد. اما با این حال و با توجه به جدول ۴ و درصد افزایش فشار مشاهده می‌شود تغییرات فشار در

pressure analysis at chute flip buckets of five dam model studies. *International Journal of Civil Engineering*, Vol.13, No.1, Transaction A: Civil Engineering, March 2015.

10. Nikpour, M. R. Salmani Jelodar, Z. Hosseinzadeh Delir, A. Sanikhani, H. and Shoja, F. 2014. The application of finite element and finite volume methods in the analysis of water flow over ogee spillway (case study: Damghan dam). *Journal of Iran Water Research*. 14: 55-63. (In Persian)

11. Parsaie, A. Dehdar-Behbahani, S. and Haghiabi, A.H. 2016. Numerical modeling of cavitation on spillway's flip bucket. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 10(4): 438-444.

12. Sabzi, E. A. and Afrous, A. 2015. Examining pressure distribution on crest spillway using ANSYS-Fluent Software. *Adv. Biores*. 6(3): 93-99.

13. Sadeghi Askari, M. and Ghomshi, M. 2013. Energy dissipation due to deflector in simple flip bucket spillway and flip bucket spillway with approach channel. *Journal of Soil and Water* 23(4): 131-141. (In Persian)

14. Safavi, Kh. Khorasanizadeh, A. and Ghafouri, S. 2010. Design considerations in flip buckets downstream of free falling jets. 9th Iranian Hydraulic Conference, 18-20 Aban, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. (In Persian)

15. Sakhaei, S. Nohani, A. and Afrous, A. 2017. Calculation of hydraulic parameters of velocity and flow depth on the Ogee spillway using Flow-3D. (Case study, Jare Dam overflow). *Shabak Monthly*, Second Year, No. 3, Volume 2, Pages 1-9.

16. Sharif, N. and Ravori, A. R. 2014. Experimental and numerical study of the effect of flow separation on dissipating energy in compound bucket. 5th International Conference on Chemical, Biological and Environmental Engineering (ICBEE), & 2nd International Conference on Civil Engineering (ICCEN), 334-338.

17. Steiner, R. Heller, V. Hager, W. H. and Minor, H. E. 2008. Deflector ski jump hydraulics. *Journal of Hydraulic Engineering*. 134(5): 562-571.

18. Yamini, O. A. and Kavianpour, M. R. 2011. Experimental study of static and dynamic pressures over simple flip bucket. 5th SASTech, Khavaran Higher-education Institute, Mashhad, Iran. May 12-14.

آن افزایش عمق جریان می‌باشد. همین‌طور با افزایش دبی، کاهش حداکثر عدد فرود در مدل ۲ بیشتر از مدل ۱ است. به طور کلی، با افزایش ۲/۵ برابری دبی، مقادیر حداقل عدد فرود برای مدل‌های ۱ و ۲ در حدود ۲ برابر افزایش می‌یابد. مقادیر حداکثری آن نیز، در مدل ۱ حدود ۲۰٪ و در مدل ۲ حدود ۴۰٪ کاهش می‌یابد. بنابراین مدل ۲ می‌تواند در دبی‌های بالا عمق آبستگي کمتر و هزینه اجرای حوضچه آرامش پایین‌تری داشته باشد.

با توجه به تحلیل نتایج مشخص شد به علت تغییرات کم فشار در دو مدل، مدل ۲ به دلیل دارا بودن کانال نزدیک‌شونده جریان را با سرعت بیشتری به پایین‌دست پرتاب می‌کند و استهلاك انرژی بیشتری صورت می‌گیرد. هم‌چنین با افزایش دبی عمق آبستگي کمتری دارد. پس عملکرد سرریز مدل ۲ مناسب‌تر از مدل ۱ می‌باشد و سرریز مدل ۲ برای استفاده پیشنهاد می‌شود.

### منابع

1. Attarzadeh, A. Zarrati, A.R. and Shanehsazzadeh, A. 2012. Flow condition at sudden slope change of chutes. *Journal of Modares Civil Engineering*. 12(1): 107-117. (In Persian)

2. Ehsani, M. and Salehi Neyshabouri, S.A.A. 2015. Numerical investigation of the vertical shaft height changes on the formation of cavitation in the knee of morning glory spillway. 2nd Year. No.5: 13-23. (In Persian)

3. Farzin, S. Karami, H. Nayyer, S. Zamiri, E. 2018. The Introduction of Oblique Cylindrical Overflow as an Effective Approach to Increase the Discharge Coefficient. *Jwmseir*, 11(39): 29-37. (In Persian)

4. Ghasemzadeh, F. 2013. Simulation of hydraulic problems in Flow-3D (2th Ed.), Noavar Press, Tehran, Iran, 256 p. (In Persian)

5. Hedayatifar, M. and Poulrak, M. 2014. Fluid dynamics simulation with Flow-3D version 10.0.1 (1th Ed.), Atinegar Press, Tehran, Iran, 264 p. (In Persian)

6. Heller, V. Hager, W. H. and Minor, H. E. 2005. Ski jump hydraulics. *Journal of Hydraulic Engineering*. 131: 347-355.

7. Juon, R. and Hager, W. H. 2000. Flip bucket with and without deflector. *Journal of Hydraulic Eng.*. 126(11): 837-845.

8. Larese, A. Rossi, R. Oñate, E. and Idelsohn, S. R. 2008. Validation of the particle finite element method (PFEM) for simulation of free surface flows. *International Journal for Computer-Aided Engineering and Software* 25(4): 385-425.

9. Nazari, O. Jabbari, E. and Sarkardeh, H. 2013. Dynamic

*Abstract***Numerical Modeling and Analysis of Flow Hydrodynamics in Flip Bucket and Approach Channel**S. Farzin<sup>1</sup>, H. Karami<sup>2</sup>, M. Fazlollahnejad<sup>3</sup> and Sh. Nayyer<sup>4</sup>

Received:2016/04/26 Accepted : 2018/03/14

Flip bucket is the main part of an energy dissipation structure called ski jump system. In this research, hydraulic characteristics such as jet length, velocity, pressure and Froude Number in four discharges are studied by Flow-3D in two models including spillway with simple flip bucket and spillway with approach channel. For turbulence modeling, RNG and models are used. Validation showed that model is more accurate. The results indicate that the approach channel model has longer jet length and more energy dissipation compared to the other model. In this model, maximum velocity, equal to 2.30 meter per second, occurs at the beginning of the channel for 20 liters per second discharge. Also, maximum increase percentage in velocity happens in the model of approach channel spillway amounting 32 percent for discharge of 15 liters per second. The results of pressure analysis show that the pressure changes in the two models have no tangible differences. Moreover, maximum pressure is on the toe of the spillway in the first model amounting 2833 Pa for discharge of 25 liters per second. Additionally, maximum Froude Number (4.5) occurs at jet fall in the simple flip bucket model and in approach channel model it occurs in the channel.

**Keywords:** *Flip bucket, Approach channel, Energy dissipation, Turbulence models, Flow-3D*

1. Assistant Professor, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan. Corresponding Author Email: (Saeed.farzin@semnan.ac.ir)

2. Assistant Professor, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan.

3. Graduated M.Sc. Student, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan.

4. Graduated M.Sc. Student, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan.