

Simulation of the Effect of Flip Bucket Edge Angle on Flow Hydraulic Characteristics

HAMZEH EBRAHIMNEZHADIAN¹, MOHAMMAD MANAFPOUR^{1*}, VAHID BABAZADEH¹

1. Civil Engineering Department, Engineering Faculty, Urmia University, Urmia, Iran.

(Received: Feb. 22, 2020- Revised: May. 6, 2020- Accepted: May. 30, 2020)

ABSTRACT

The Flip bucket is one of the spillway components of dams used to dissipate the flow kinetic energy. In these dissipaters, Part of supercritical flow energy due to air friction and partly due to mixing and turbulence in the erosion cavity that is formed at the landing site is dissipated. One of the geometrical parameters affecting the hydraulic performance of flip buckets is the angle of the bucket edge. In this study, using FLOW 3D software and RNG K- ϵ turbulence model, flow on Gavoshan Dam spillway and flip bucket was simulated in order to determine the hydraulic flow characteristics and the effect of bucket edge angle on the hydraulic flow pressure, outlet depth, velocity and developing of outlet jet as well. In order to validate the parameters obtained from numerical analysis, the experimental results of Gavoshan dam spillway hydraulic model have been used. Comparison of the results of numerical model with experimental data indicates acceptable agreement of the numerical results. The results show that increasing the angle of the bucket edge has a little effect on the maximum pressure on the bucket while it increases the depth and decreases the outlet flow velocity of the bucket. The 30° angle was determined as the optimum angle of the flip bucket edge in terms of increasing energy dissipation rate. Also for a fixed flip bucket edge angle with increasing discharge, the horizontal length of the upper and lower nappes of the jet are increased.

Keywords: FLOW 3D Software, Edge Angle of Bucket, Gavoshan Dam Spillway, K- ϵ RNG Turbulence Model.

* Corresponding Author's Email: m.manafpour@urmia.ac.ir

شبیه‌سازی اثر زاویه لبه‌ی پرتاب‌کننده‌ی جامی شکل بر مشخصه‌های هیدرولیکی جریان

حمزه ابراهیم نژادیان^۱، محمد مناف‌پور^{*}، حمید بابازاده^۱

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۳ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۲/۱۷ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۳/۱۰)

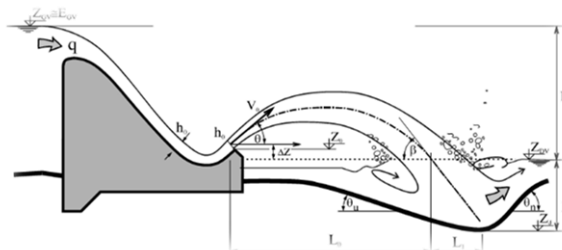
چکیده

پرتاب‌کننده‌ی جامی یکی از اجزای سرریز سدهاست که با هدف مستهلک نمودن انرژی جنبشی جریان مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مستهلک کننده قسمتی از انرژی جریان فوق بحرانی در اثر اصطکاک با هوا و بخشی نیز در اثر اختلاط و تلاطم در حفره فرسایش که در محل فرود تشکیل می‌گردد، مستهلک می‌شود. یکی از پارامترهای هندسی تأثیرگذار در عملکرد هیدرولیکی پرتابه‌های جامی شکل، زاویه لبه‌ی جام می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار FLOW 3D و مدل آشفتگی R-NG K-ε، شبیه‌سازی جریان بر روی سرریز و پرتابه جامی شکل سد گاوشان انجام پذیرفته و علاوه بر تعیین مشخصه‌های هیدرولیکی جریان، به بررسی اثر تغییرات زاویه لبه جام بر روی فشار هیدرولیکی جریان عبوری، عمق و سرعت جریان خروجی و نحوه توسعه جت خروجی از پرتابه جامی شکل پرداخته شده است. برای صحت‌سنجی پارامترهای حاصل از تحلیل عددی، از نتایج آزمایشگاهی مدل هیدرولیکی سرریز سد گاوشان استفاده شده است. مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل عددی با مقادیر نظیر آزمایشگاهی حاکی از دقت قابل قبول نتایج عددی دارد. بررسی نتایج تحقیق نشان می‌دهد که افزایش زاویه لبه جام تأثیر چندانی روی حداکثر فشار روی جام ندارد، درحالی‌که منجر به افزایش عمق و کاهش سرعت جریان خروجی از جام می‌گردد. زاویه ۳۰ درجه به‌عنوان زاویه بهینه لبه جام پرتابی از نقطه نظر افزایش میزان استهلاک انرژی تعیین گردید. همچنین به‌ازای یک زاویه لبه جام ثابت با افزایش دبی طول پرتاب افقی سطح فوقانی و تحتانی جت پرتابی افزایش یافته است.

واژه‌های کلیدی: نرم‌افزار FLOW 3D، زاویه لبه جام، سرریز سد گاوشان، مدل آشفتگی R-NG K-ε.

مقدمه

جریان در جام می‌شود. بخش عظیمی از انرژی جریان با پخش و پراکنده شدن جت خروجی جریان از سازه به‌صورت پرش اسکی مستهلک می‌شود. بدیهی است هرچه طول طی شده توسط جت بیشتر باشد استهلاک انرژی بیشتری نیز به‌وقوع خواهد پیوست (Barani and Abbasi, 2005). با برخورد جت پودر شده با حوضچه استغراق در پایاب و به‌وجود آمدن جریان آشفته و متلاطم در حوضچه فرآیند استهلاک انرژی در سیستم پرش اسکی تکمیل می‌شود (شکل ۱).



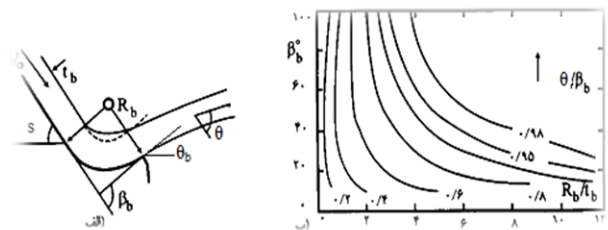
شکل ۱- مدل شماتیک از سرریز و پرتابه جامی شکل

پرش‌های اسکی اواسط دهه ۱۹۳۰ در پروژه هیدرولیکی Dordogne در فرانسه به‌عنوان یک طرح هیدرولیکی موفق معرفی

یکی از مسائل مهم در ساخت سدها و مطالعه آن‌ها، سرریزها و تأسیسات وابسته به آن‌ها می‌باشد. از این‌رو توجه به عملکرد و کارایی این سازه‌ها دارای اهمیت فراوانی می‌باشد. از آنجایی‌که سرریز جریان را از حالت زیر بحرانی به فوق بحرانی تبدیل می‌کند، امکان فرسایش شدید آبی در پایانه سرریز محتمل بوده و لذا سازه‌های مستهلک کننده انرژی یکی از اجزای جدانشدنی برای پایاب سرریز به حساب می‌آیند (Beyrami, 2003). معمول‌ترین روش‌های استهلاک انرژی عبارت‌اند از حوضچه‌های آرامش از نوع پرش هیدرولیکی، جام غلتانی و جام پرتابی. در حوضچه‌های پرتابی که جام پرتابی یکی از اجزای آن است، هنگامی‌که جریان از تندآب وارد جام می‌شود، بخشی از انرژی جنبشی آن در جام مستهلک می‌گردد، اما به خاطر طول نسبتاً کوتاه جام، اصطکاک بین بستر کانال با سطح زیرین جریان و مقاومت هوا با سطح آزاد جریان، نقش زیادی در استهلاک انرژی ندارد. در این حالت تغییر جهت جریان در جام به سمت بالا و مقاومت ثقلی زمین که شتاب رو به پایین وارد می‌کند، باعث کاهش شتاب حرکت و سرعت

با شعاع و زاویه‌ی پرتاب جام در ارتباط هستند. موضوعات مختلفی در طراحی پرتابه‌های جامی شکل همچون بررسی فشارهای هیدرودینامیکی روی بستر جام و میزان استهلاک انرژی جریان پس از برخورد جت پرتابی با کانال پائین‌دست مورد توجه محققان قرار گرفته است. خلاصه‌ای از توصیه‌های طراحی توسط (Mason, 1993) ارائه گردید. او شعاع باکت را حداقل ۳ تا ۵ برابر عمق جریان ورودی و زاویه لبه یا زاویه برخاست بین ۲۰ تا ۳۵ درجه و زاویه گسترش جت در هوا حدود ۵ درجه را توصیه نمود. رون و پترکا در سال ۱۹۵۹ با بررسی چند نوع جام، منحنی‌های بی‌بعدی برای کمک به تعیین طول پرتابه جت، انتشار جت، فروکش کردن عمق پایاب و فشار روی کف و دیواره‌های جانبی جام به دست آوردند. Heller *et al.* (2005) با گسترش آزمایش‌های جوان و هگر و بررسی فشار در کف جام و ویژگی‌های جریان برای هندسه و اعداد فرود متفاوت، روابطی را برای محاسبه بیشینه فشار و مکان وقوع آن ارائه دادند. نتایج کار آن‌ها حاکی از تأثیر معنی‌دار عدد فرود روی خمیدگی و زاویه‌ی پرتابه‌ی جامی شکل داشت. Isbester *et al.* (1967) با مطالعه بر روی مدل آزمایشگاهی سرریز و پرتابه جامی شکل سد الوادو اقدام به بررسی تأثیر پرتابه در کاهش فرسایش در بستر رودخانه و ارائه یک مدل مناسب از پخش‌شدگی جریان روی پرتابه نمودند. Mehri and Fathi Moghadam (2008) مدل سرریز سد بالارود که از نوع اوجی دریچه‌دار با تنداب و پرتاب‌کننده جامی می‌باشد را مورد مطالعه قرار داده و به این نتیجه رسیدند که در انتهای جام به‌علت تأثیر امواج بالادست و اصطکاک دیواره‌های کناری در مقابل جریان، در دبی حداکثر سیلاب محتمل، پس‌زدگی جریان آب از روی دیواره‌های کناری اتفاق خواهد افتاد. Kermannezhad *et al.* (2011)، به بررسی تأثیر زاویه دیواره‌های جانبی حوضچه پایین‌دست تحت اثر فشارهای دینامیکی ناشی از پرتابه جامی شکل پرداختند. آن‌ها با بررسی و تجزیه و تحلیل آماری نتایج به‌دست‌آمده از نوسانات فشار بیان کردند که با افزایش دبی ضریب میانگین نوسانات فشار روی دیواره‌ها افزایش می‌یابد، همچنین با افزایش زاویه دیواره جانبی نسبت به افق فشارهای دینامیکی کاهش پیدا می‌کنند که دلیل آن کاهش ضخامت هسته جت در لحظه برخورد است. Dehdar Behbahani and Fathi Moghadam (2010)، با استفاده از مدل آزمایشگاهی، توزیع نوسانات فشار روی سطح ناشی از برخورد جت خروجی از پرتابه جامی شکل مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها بر اساس تجزیه و تحلیل انجام‌شده بر روی داده‌های به‌دست‌آمده از مدل فیزیکی نتیجه گرفتند که با افزایش عمق اولیه آب در حوضچه، میزان فشار کاهش می‌یابد، چون عمق نفوذ و پخش

شدند. از جمله اجزاء و پارامترهای مهم در طراحی مستهلک‌کننده‌های جامی شکل، زاویه‌ی پرتاب جت جام پرتابی می‌باشد. زاویه‌ای که راستای جت پرتابی از جام با خط افق می‌سازد، به زاویه پرتاب جت معروف بوده و تقریباً برابر با زاویه‌ای است که امتداد لبه جام با افق می‌سازد (زاویه لبه جام). زاویه پرتابی جت یک عامل مهم در تعیین فاصله طی شده توسط جت و سایر خصوصیات هیدرولیکی جریان در ناحیه برخورد جت با پایاب است. مطابق رابطه جت پرتابی، زاویه‌ای که حداکثر طول طی شده توسط جت پرتاب‌شده از جام را منجر می‌شود، زاویه 45° است. عموماً دامنه تغییرات آن بین ۲۰ تا ۴۰ درجه خواهد بود. تحقیقات دانشمندان نشان می‌دهد که به‌علت انحراف خطوط جریان روی جام از مدل جریان خطوط هم‌مرکز، زاویه پرتابی جت (θ) همیشه از زاویه لبه جام θ_b کوچک‌تر است (شکل ۲-الف). (Orlov, 1974) با توجه به زاویه تقریبی سرریز (S)، زاویه انحراف جام β_b و شعاع انحناء جام R_b یک نسبت بین $\frac{\theta}{\beta_b}$ و $\frac{R_b}{t_b \rho}$ ارائه کرده است؛ که به‌ازای مقادیر بالای این دو نسبت، زاویه پرتابی جت (θ) به مقدار $S - \beta_b$ میل می‌کند. در شکل (۲-ب) نسبت $\frac{\theta}{\beta_b}$ برحسب تغییرات β_b و $\frac{R_b}{t_b}$ حاصل از بررسی‌های تجربی، ارائه‌شده است. البته استفاده از این نمودار محدود به برقراری شرط $F_b > 5(\sin s)^{\frac{1}{2}}$ است.



شکل ۲- زاویه‌ی پرتابی جت $\theta = \theta_b - S$ (الف) پارامترهای هندسی (ب)

تعریف نسبت زاویه جام $\frac{\theta}{\beta_b}$ (Vischer and Hager, 1995)

هزینه پائین ساخت مستهلک‌کننده‌ی جامی شکل، اجرا و نگهداری ساده آن در طول عمر سد باعث شده است در بیشتر سدها در صورت مناسب بودن شرایط زمین‌شناسی بستر رودخانه در پایاب از این سازه استفاده شود (USBR, 1990). تلاطم و آشفتنگی جریان، اعمال ضربات نوسانی شدید آب بر کف و دیواره‌های پرتابه‌ی جامی شکل، فشارهای هیدرودینامیکی روی بستر جام و میزان استهلاک انرژی جریان از جمله‌ی فاکتورهای مهم در مستهلک‌کننده‌ی جام پرتابی هستند که باید مورد بررسی دقیق قرار گیرند. اغلب فاکتورهای مذکور به‌طور مستقیمی

حاکمی از آن است که علیرغم مطالعات گسترده در زمینه‌ی پارامترهایی همچون فشار دینامیکی وارد بر بستر جام و میزان استهلاک ناشی از پرتابه‌ی جامی شکل، مطالعه‌ی دقیقی در مورد زاویه‌ی لبه‌ی جام بهینه (زاویه‌ی برخاست) که از تأثیرگذارترین پارامترها بر میزان استهلاک انرژی و شرایط جت جریان پائین‌دست جام پرتابی است ارائه نشده است. در این راستا، در تحقیق حاضر با استفاده از نرم‌افزار FLOW 3D و با بهره‌گیری از مدل آشفتگی RNG K-ε عملکرد هیدرولیکی پرتابه‌ی جامی شکل برای زاویه لبه جام با خط افق به ازای ۴ زاویه ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درجه بر روی فشار متوسط استاتیکی کف، عمق و سرعت جریان خروجی و نحوه توسعه جت خروجی از پرتابه جامی شکل مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

مشخصات هندسی و هیدرولیکی سرریز و پرتابه‌ی جامی مورد مطالعه

سد مخزنی گاوشان از نوع سنگریزه‌ای با هسته قائم رسی است که بر روی رودخانه گاو رود، در غرب ایران و در ۲۰ کیلومتری شهرستان کامیاران (۷۵ کیلومتری کرمانشاه) قرار دارد. مختصات جغرافیایی این سد در محل تاج سرریز ۳۴ درجه و ۵۸ دقیقه و ۱/۶۰ ثانیه شمالی و ۴۶ درجه و ۵۹ دقیقه و ۳۹/۰۷ ثانیه شرقی می‌باشد. همچنین سرریز سد گاوشان نیز در مختصات جغرافیایی ۳۴ درجه و ۵۷ دقیقه و ۵۰/۰۹ ثانیه شمالی و ۴۶ درجه و ۵۹ دقیقه و ۴۰/۶۳ دقیقه شرقی قرار دارد. طول کل تاج سرریز ۵۰ متر بوده که وجه بالادست آن سطح شیب‌دار ۱:۱ و وجه پایین‌دست آن قوسی از یک دایره به شعاع ۱۲ متر و زاویه مرکزی ۲۵/۰۳ درجه تشکیل شده است. عرض تنداب ابتدا ۴۹/۳۵ متر و انتها ۳۱/۲ متر و طول آن ۲۵۱ متر می‌باشد که به پرتابه جامی شکل با شعاع ۲۰ متر که عرض ابتدای آن ۳۱/۲ و عرض انتهای آن ۳۰ متر می‌باشد، منتهی می‌گردد. برای کالیبراسیون و امتحان مدل عددی از داده‌های آزمایشگاهی مدل هیدرولیکی سرریز سد گاوشان با مقیاس ۱:۴۰ موجود در موسسه تحقیقات آب استفاده گردید (Water Research Institute Report, 2003). در ادامه نمایی از عکس‌های هوایی سرریز سد گاوشان در شکل (۳) نشان داده شده است.

تحلیل ابعادی

در این تحقیق با توجه به پارامترهای موثر بر پدیده‌های هیدرولیکی پائین دست پرتاب کننده‌های جامی شکل شامل آبشستگی و تغییرات بستر و اثرگذاری پارامترهای هندسی پرتابه

جت در حوضچه افزایش یافته و در نتیجه انرژی جت آب به مقدار بیشتری مستهلک شده و فشار کمتری به دیواره وارد می‌کند. Karimi Pashaki *et al.* (2012)، با بیان معادلات حاکم بر انواع مدل‌های آشفتگی موجود در FLUENT جریان آشفته سه‌بعدی در سازه پرتابه جامی شکل را شبیه‌سازی نمودند. با بررسی نتایج مشاهده شد که از انواع مدل‌های آشفتگی موجود در نرم‌افزار، مدل آشفتگی RNG دارای بهترین تطابق با نتایج آزمایشگاهی بود و محل وقوع حداکثر فشار دینامیکی، به هندسه جام پرتابی بستگی دارد و مقدار آن نیز وابسته به عدد فرود جریان ورودی بوده و تقریباً در قسمت میانی گودی جام رخ می‌دهد Steiner *et al.* (2008). توزیع فشار در مستهلک کننده‌های پرش اسکی با جام مثلی را توسط مدل آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاکمی از آن بود که عدد فرود، ارتفاع نسبی جام و زاویه دفلیکتور اثر قابل توجهی روی حداکثر فشار و توزیع آن در جام دارد. Nazari *et al.* (2013) 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. Sharif and Ravori (2014) به بررسی آزمایشگاهی و عددی اثر جدایی جریان روی اتلاف انرژی در پرتابه‌ی مرکب با دو زاویه پرتاب مختلف پرداختند که نتایج نشان داد که پرتابه‌ی مرکب با زاویه‌ی پرتاب کوچک‌تر مناسب‌تر است. Parsaei *et al.* (2016) به بررسی پدیده کویتاسیون روی پرتابه‌ی سرریز سد بالارود به کمک مدل عددی پرداختند. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان داد که وقوع کویتاسیون بر اساس شاخص کویتاسیون بحرانی ۰/۲۵ در طول سرریز و پرتابه سد بالارود امکان‌پذیر نمی‌باشد. Safavi *et al.* (2010) به مطالعه‌ی آزمایشگاهی جام‌های پرتابی در پایانه‌ی سرریزهای آزاد و دریچه‌دار پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که نحوه بهره‌برداری از سرریز، به‌ازای دبی‌های کم تأثیر 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. Farzin *et al.* (2018) با بهره‌گیری از مدل عددی FLOW 3D به شبیه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی جریان از جمله تغییرات فشار، سرعت، عدد فرود و استهلاک انرژی در دو مدل سرریز با پرتابه‌ی جامی شکل ساده و پرتابه‌ی جامی شکل با کانال مرکب نزدیک شونده پرداختند. نتایج تحقیق حاکمی از آن بود که در پرتابه‌ی جامی شکل با کانال نزدیک شونده، استهلاک انرژی بیشتری صورت می‌گیرد.

مروری بر تحقیقات پیشین در زمینه‌ی پرتابه‌ی جامی شکل

حرکت در جهت محورهای مختصات به صورت روابط (۳) و (۴)، بیان می‌شوند (Ferziger and Peric, 1996, Hirt and Nichols, 1981).

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij}) \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در معادلات بالا، u_i مؤلفه‌ی سرعت در جهت x_i ، P فشار کل، ρ جرم مخصوص سیال، g_i مؤلفه‌ی شتاب ثقل در جهت x_i و τ_{ij} تانسور تنش بوده که با فرض لزجت گردابه‌ای بویزینسک به صورت رابطه‌ی (۵) نشان داده می‌شود.

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \rho \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (\text{رابطه ۵})$$

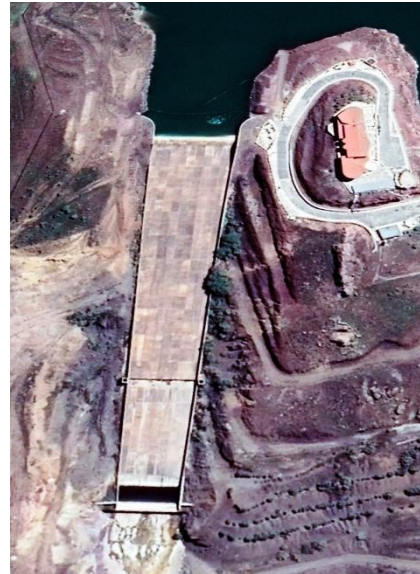
که در معادله‌ی بالا، ν_t لزجت گردابه‌ای و δ_{ij} برای کاربردی کردن تعریف لزجت گردابه‌ای می‌باشد.

با توجه به طبیعت آشفته حاکم بر جریان سیال بر روی سرریز و پرتابه‌ی جامی شکل، لزوم مدل‌سازی آشفتگی نیز در مدل عددی وجود دارد. شبیه‌سازی آشفتگی در نرم‌افزار FLOW 3D با استفاده از یکی از پنج مدل آشفتگی طول اختلاط پراتل، مدل تک معادله‌ای، مدل‌های دو معادله‌ای K-ε و RNG K-ε و مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ صورت می‌گیرد. در تحقیق حاضر با استناد به تحقیقات پیشین در این زمینه، مدل‌های آشفتگی دو معادله‌ای K-ε و RNG K-ε مورد استفاده قرار گرفتند. مدل K-ε شامل دو معادله‌ی انتقال برای انرژی جنبشی آشفتگی و اتلاف آن است که K معرف انرژی جنبشی آشفتگی و ε کمیت اتلاف آشفتگی می‌باشد. مدل آشفتگی RNG K-ε، قادر است ضرایبی که در مدل K-ε به صورت تجربی استخراج شده‌اند را به‌طور صریح بیان کند. مدل آشفتگی RNG K-ε برای استخراج معادلات متوسط‌گیری شده برای کمیت‌های آشفتگی مانند انرژی جنبشی آشفتگی، از روش‌های آماری بهره می‌برد.

نرم‌افزار FLOW 3D

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 غیردائمی با هندسه پیچیده کاربرد فراوانی (VOF) دارد. در این نرم‌افزار از روش حجم سیال برای حل معادلات حاکم بر جریان در شبکه‌بندی منظم استفاده می‌شود. شکل معادلات گسسته‌سازی شده در این روش نظیر معادلات گسسته‌سازی شده در روش تفاضل محدود هست. بر این اساس، نرم‌افزار FLOW 3D

ی جامی شکل بر این پدیده‌ها به شناسایی و استخراج پارمترهای بی‌بعد اقدام گردید.



شکل ۳- نمایی از عکس‌های هوایی مربوط به سرریز سد گاوشان در محل تاج سد

پارامترهای متعددی در ایجاد پدیده آب شستگی در زیر جت‌ها دخالت دارند که عبارت‌اند از: q : دبی در واحد عرض، ρ_s : جرم حجمی مصالح بستر، ρ_w جرم حجمی آب، μ : لزجت دینامیکی، g : شتاب ثقل، b : ضخامت جت در جام سرریز، H : ارتفاع ریزش یا اختلاف بین رقوم آب سطح مخزن و پایاب، D : بیش‌ترین عمق آبشستگی که از سطح اولیه بستر اندازه‌گیری می‌شود، θ : زاویه برخورد جت به پایاب، R : شعاع پرتابه جامی شکل، φ : زاویه پرتابه جامی شکل، Y : فاصله عمودی بین لبه پرتاب‌کننده و سطح اولیه، t : زمان. در نتیجه می‌توان نوشت:

(رابطه ۱)

$f(q, \rho_s, \rho_w, D, d_s, h_t, g, b, Y, H, R, t, \theta, \mu, \cos\varphi) = 0$
با انتخاب متغیرهای تکراری و با استفاده از تئوری باکینگهام، معادلات بدون بعدی به فرم زیر حاصل می‌گردد:

$$f\left(\frac{\rho_s}{\rho_w}, \frac{q}{\sqrt{gH^3}}, \frac{d_s}{H}, \frac{D}{H}, \frac{h_t}{H}, \frac{R}{H}, \frac{Y}{H}, \cos\varphi\right) = 0 \quad (\text{رابطه ۲})$$

همان‌گونه که مشخص است پارامترهای بی‌بعد متعددی در این پدیده دخالت دارند که در این تحقیق عددی بررسی اثر زاویه‌ی لبه‌ی جام پرتابی $\cos\varphi$ مورد بررسی قرار گرفته است.

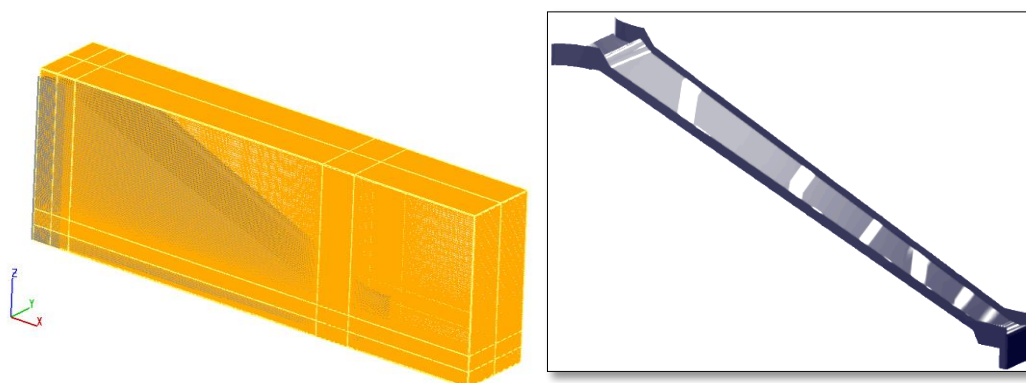
معادلات حاکم بر میدان جریان

قوانین حاکم بر جریان سیال تراکم‌ناپذیر در حالت آشفته، توسط معادلات متوسط‌گیری شده‌ی زمانی ناویراستوکس، مرسوم به معادلات رینولدز بیان می‌شوند. معادلات پیوستگی و اندازه‌ی

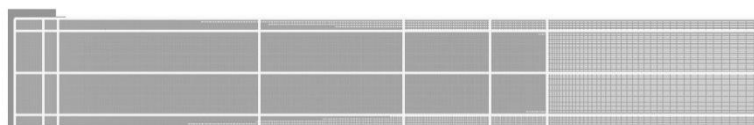
است.

در این تحقیق عملکرد هیدرولیکی پرتابه جامی شکل به ازای ۴ زاویه‌ی اختیاری لبه‌ی جام با خط افق یعنی ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درجه مورد توجه قرار گرفته و نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی ارائه گردیده است. در شکل (۵) مشخصات هندسی پرتابه-های جامی شکل برای ۳ زاویه‌ی لبه‌ی جام مختلف به ازای شعاع جام ثابت ۲۰ متر نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش زاویه لبه جام، طول جام و ارتفاع لبه از کف جام افزایش یافته است. جدول (۱) حاوی اطلاعاتی در مورد شبکه‌بندی، شرایط مرزی و انفصال معادلات در مدل عددی می‌باشد.

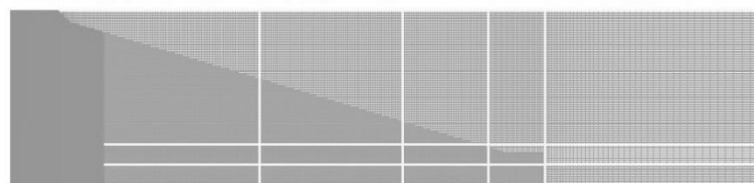
از روش‌های دقت مرتبه اول و دوم در حل معادلات استفاده می‌کند. در این پژوهش از مدل‌های آشفتگی RNG K-ε و همچنین به منظور شبیه‌سازی سطح آزاد از روش VOF استفاده شده است. در روش VOF تابع متغیر به نام α به کار رفته که نشان‌دهنده‌ی حجم آب در سلول محاسباتی است. اگر α برابر صفر باشد یعنی سلول پر از هوا است و برای حالتی که α 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. هندسه میدان جریان توسط نرم‌افزار CATIA تهیه و مش‌بندی و مدل‌سازی هیدرولیکی به وسیله‌ی نرم‌افزار FLOW 3D انجام گرفته است. نمایی از هندسه سه‌بعدی، مش‌بندی و شرایط مرزی مدل عددی در شکل (۴) نشان داده شده



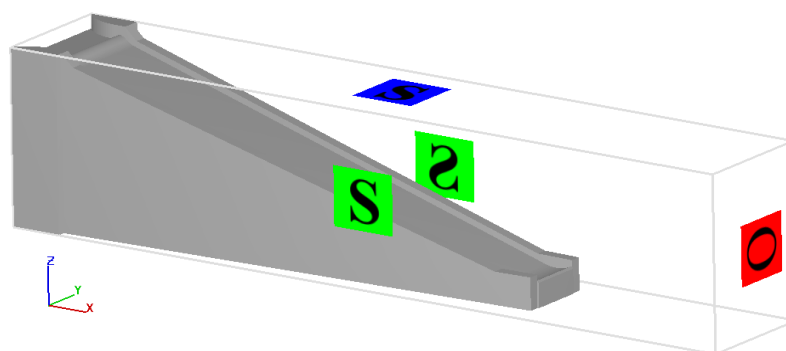
مرزهای جامد و شبکه‌بندی هندسه‌ی مدل



شبکه‌بندی در پلان



شبکه‌بندی در پروفیل

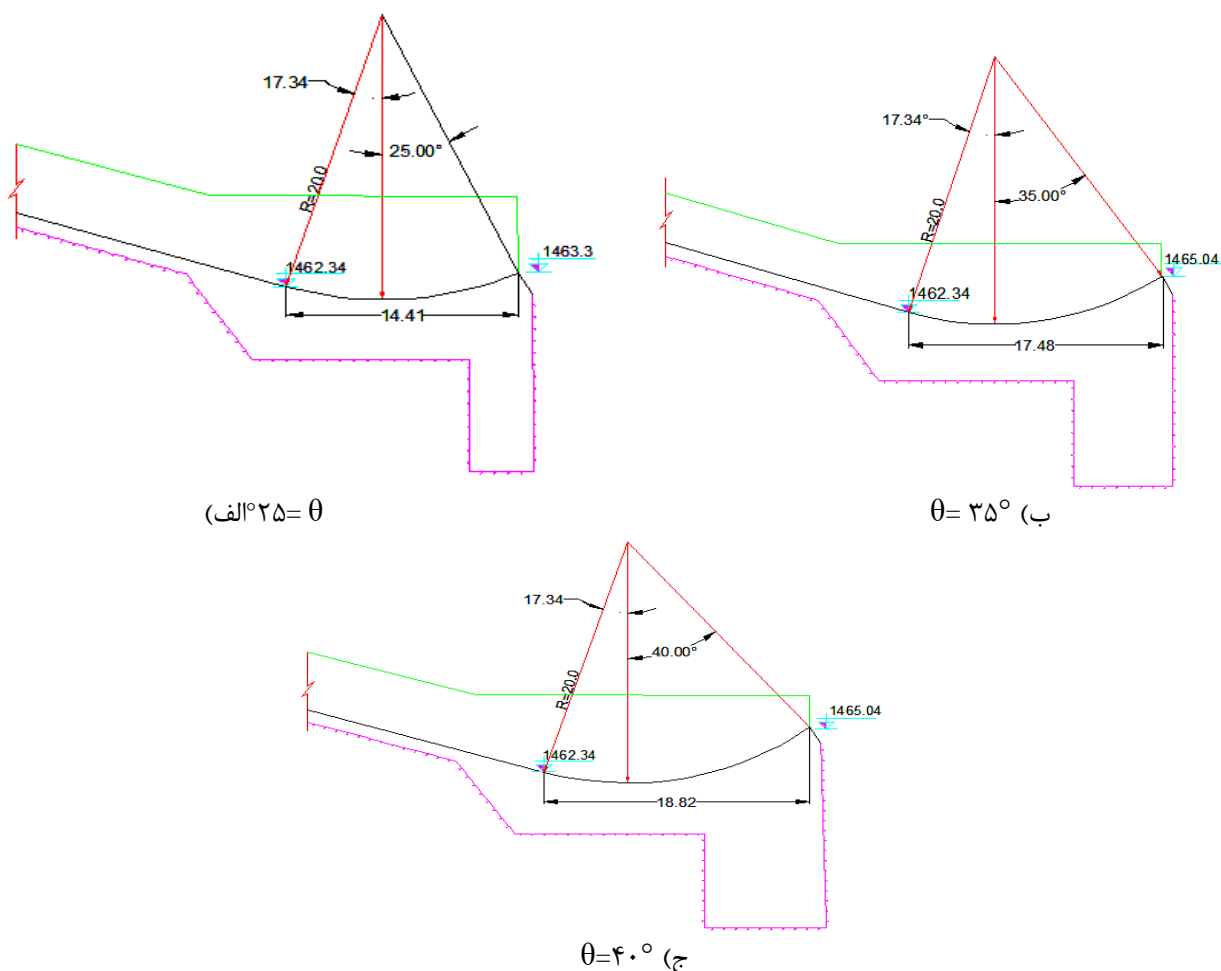


شرایط مرزی مدل عددی

شکل ۴- هندسه مرزهای جامد، شبکه‌بندی و شرایط مرزی مدل عددی

جدول ۱- مرزهای جامد و شبکه‌بندی مدل عددی

VOF	نوع مدل	شبکه
مستطیلی تطبیقی	نوع شبکه	
۴۰۰۰۰۰	تعداد حجم‌های محاسباتی	
Solid	بدنه سرریز	
Symmetry	مرزهای کناری	شرایط مرزی
Specific velocity	ورودی	
Outlet	خروجی	
RNG	مدل آشفتگی	
GMRES	الگوریتم حل معادلات فشار	معادلات
صریح	الگوریتم حل تنش برشی سیال	
الگوی حجم سیال	مدل سطح آزاد	
۰/۰۱	گام‌های زمانی حل (ثانیه)	



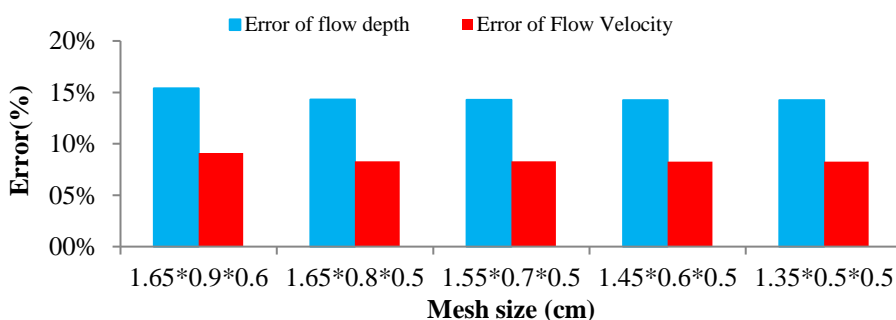
شکل ۵- مشخصات جام پرتابی با توجه به تغییر زاویه لبه جام برای $R=20$ m

ارزیابی مدل عددی

به‌منظور ارزیابی و صحت‌سنجی مدل عددی شرایط مختلف مرزبندی شبکه سلول محاسباتی به‌صورت مرز ورودی با حالات سرعت ورودی و دبی-عمق جریان و غیره، مرز خروجی و دیواره‌های جانبی شبکه سلول‌های محاسباتی در حالت دیواره و تقارن، کف و سقف شبکه سلول‌های محاسباتی به‌ترتیب، دیواره و

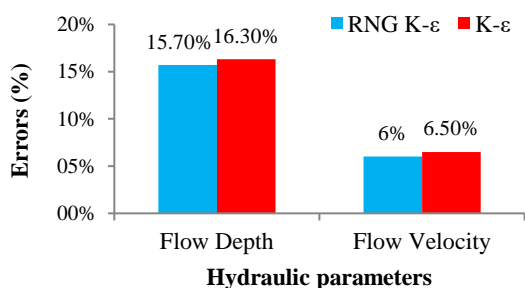
تقارن در نظر گرفته شد. علت استفاده از دیواره‌ها وجود دیواره در کنارها بود. جریان ورودی بر اساس دبی ورودی و همچنین جریان خروجی نیز به‌صورت outflow انتخاب گردید. سقف بلوک نیز به‌صورت شرط مرزی تقارن در نظر گرفته شد. شرایط مرزی اعمالی با توجه به فیزیک جریان به مدل ریاضی اعمال شده است با این وجود انجام آزمون‌هایی بین شرایط مرزی مختلف موجود در مدل‌های عددی می‌تواند به‌دقت عملکرد مدل کمک کند.

بالاتر مدل عددی می‌گردد. از این‌رو با بررسی ابعاد مختلف شبکه‌بندی مدل در نهایت ابعاد شبکه به صورت $1/65 \times 0/8 \times 0/5$ سانتی‌متر در راستای طولی، عرضی و ارتفاعی در نظر گرفته شده است. در مجموع تعداد سلول‌های محاسباتی در نظر گرفته شده در مدل عددی در حدود ۴,۰۰۰,۰۰۰ سلول گردید. نتیجه‌ی حساسیت‌سنجی داده‌های خروجی مدل عددی (سرعت و عمق جریان) نسبت به ابعاد سلول‌های به کار رفته در مدل عددی در شکل (۶) ارائه گردیده است.



شکل ۶- درصد اختلاف مقادیر عمق و سرعت جریان در مدل عددی با مقادیر نظیر آزمایشگاهی به ازای ابعاد مختلف مش

شبیه‌سازی جریان بر روی سرریز و پرتابه‌ی جامی شکل دارد.

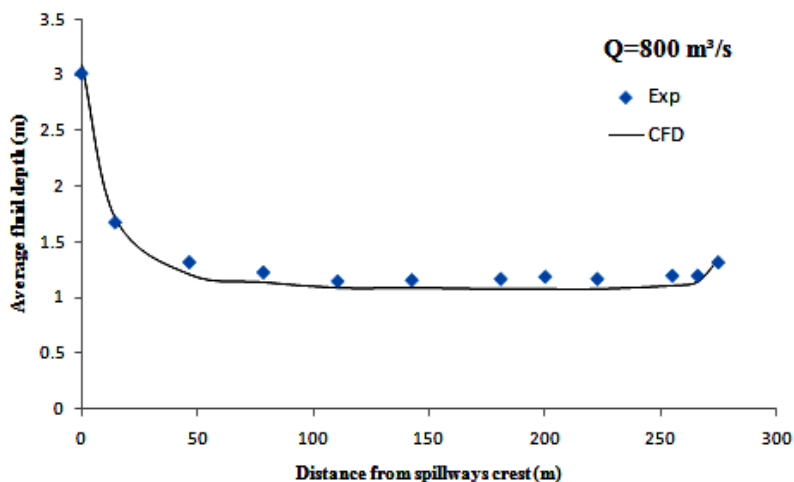


شکل ۷- درصد اختلاف مقادیر عمق و سرعت جریان در مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی به ازای مدل‌های آشفتگی مختلف

به‌علاوه برای اطمینان از نتایج مدل عددی، مقادیر سرعت و عمق جریان در مدل عددی در نقاط نظیر به نظیر با نتایج آزمایشگاهی موجود برای دبی ۸۰۰ مترمکعب بر ثانیه مقایسه شد. بررسی پروفیل عمق جریان بر روی سرریز و پرتابه حاکی از آن است که برخلاف افزایش سرعت، عمق آب در طول جریان به تدریج کاهش می‌یابد. چون تنداب طول زیادی داشته و دارای شیب ثابت است کاهش عمق تا رسیدن به عمق جریان یکنواخت، ادامه پیدا می‌کند. فاصله محل تشکیل جریان یکنواخت روی تنداب، بستگی به میزان دبی جریان دارد و با افزایش دبی، این فاصله نیز افزایش پیدا می‌کند. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی پروفیل عمق جریان روی محور طولی سرریز و پرتابه بیانگر دقت قابل قبول مدل عددی می‌باشد (شکل ۸).

باید اندازه شبکه مدل به صورت بهینه و مناسب از هر جهت انتخاب شود. از این‌رو برای حساسیت‌سنجی شبکه‌ی مدل عددی مطابق شکل (۶)، پنج سناریو به ازای اندازه‌های مختلف شبکه در سه جهت x ، y و z مورد بررسی قرار گرفت. همان‌گونه که از شکل (۶) مشخص است با کاهش اندازه‌ی مش و بالا رفتن تعداد مش‌ها نتایج عددی و آزمایشگاهی به هم نزدیک‌تر شده‌اند با این‌وجود از یک اندازه‌ی سایز معین شبکه ($1/65 \times 0/8 \times 0/5$)، کاهش بیش‌تر سایز شبکه مدل عددی نه تنها تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای بر بالا رفتن دقت نتایج نداشته است بلکه منجر به هزینه‌ی محاسباتی

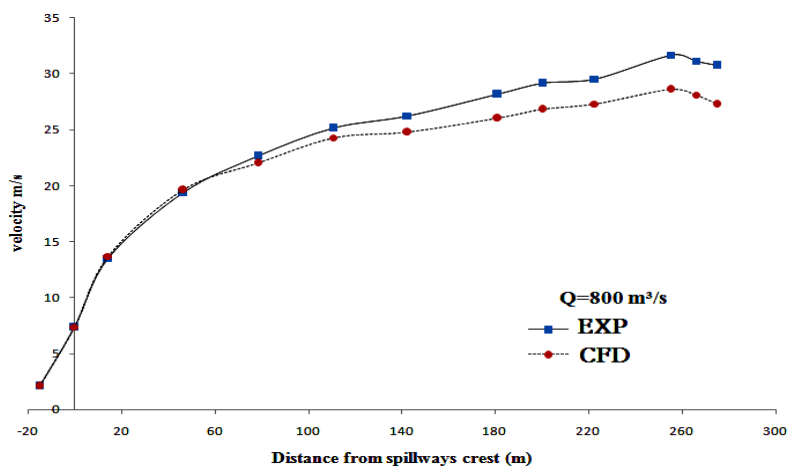
از دیگر پارامترهای تأثیرگذار در مدل‌سازی عددی جریان فوق بحرانی و آشفته بر روی سرریزها و پرتابه‌های جامی شکل، انتخاب مدل آشفتگی متناسب می‌باشد. شبیه‌سازی آشفتگی در FLOW 3D با استفاده از یکی از پنج مدل آشفتگی طول اختلاط پراتنل، یک معادله‌ای انرژی جنبشی آشفتگی، دو معادله‌ی $k-\epsilon$ ، مدل گروه نرمال شده‌ی RNG و مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ LES صورت می‌گیرد. در تحقیق حاضر بنا به فیزیک مسئله و با استناد به مطالعات داخلی و خارجی پیشین صورت گرفته در زمینه‌ی شبیه‌سازی جریان بر روی سرریزها و پرتابه‌های جامی شکل (Parsaei *et al.*, 2016; Cherachi *et al.*, 2019; Ahadi *et al.*, 2008; Soltani *et al.*, 2011; Paul, *et al.*, 2017) که مدل آشفتگی RNG $k-\epsilon$ را مورد استفاده قرار دادند، این مدل انتخاب گردید. دلیل استفاده از این مدل آشفتگی را می‌توان در ویژگی‌های و مزیت آن نسبت به مدل‌هایی چون $k-\epsilon$ دانست. این مدل به‌واسطه داشتن ترم اضافی در معادله ϵ ، برای تحلیل جریان‌ات سریعاً کرنش یافته و جریان‌ات بر روی سطوح با انحنای زیاد (همچون سرریز و پرتابه‌ی جامی شکل) بهبود یافته است. همچنین این مدل در شبیه‌سازی جریان‌های گذرا توان بالایی دارد. علاوه بر این جهت اطمینان از کارایی بالاتر مدل آشفتگی RNG $k-\epsilon$ نسبت به مدل $k-\epsilon$ ، نتایج مدل عددی به ازای این دو مدل با یکدیگر در شکل (۷) مقایسه شدند که نتایج حاکی از دقت و کارایی بالاتر مدل آشفتگی RNG $k-\epsilon$ نسبت به $k-\epsilon$ در



شکل ۸- مقایسه مقادیر عددی و آزمایشگاهی عمق متوسط جریان روی سرریز و پرتاب‌کننده‌ی جامی شکل

سرریز می‌باشد. دلیل این امر را می‌توان در نحوه برخورد شبکه‌بندی نرم‌افزار با مرزهای جامد جستجو کرد. در مدل عددی، کف شوت در مدل به صورت کاملاً مسطح شبیه‌سازی نمی‌گردد و دارای ناهمواری‌هایی می‌باشد که این مسئله باعث کاهش سرعت در طول شوت و تجمیع این خطا می‌گردد. در نتیجه رفته‌رفته از میزان سرعت در طول شوت کاسته شده و مقادیر عددی و آزمایشگاهی اختلاف بیشتری پیدا می‌کند (شکل ۹).

همچنین جهت صحت‌سنجی نتایج مدل عددی، نتایج نظیر به نظیر پروفیل سرعت متوسط جریان بر روی محور طولی سرریز و پرتابه با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید. مقایسه‌ی نتایج حاکی از آن است که مدل عددی با دقت قابل قبولی قادر به تخمین مقادیر سرعت متوسط جریان بر روی سرریز و پرتابه‌ی جامی شکل بوده است. با این وجود اختلاف نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی در محدوده‌ی جام پرتابی بیش‌تر از دیگر نواحی

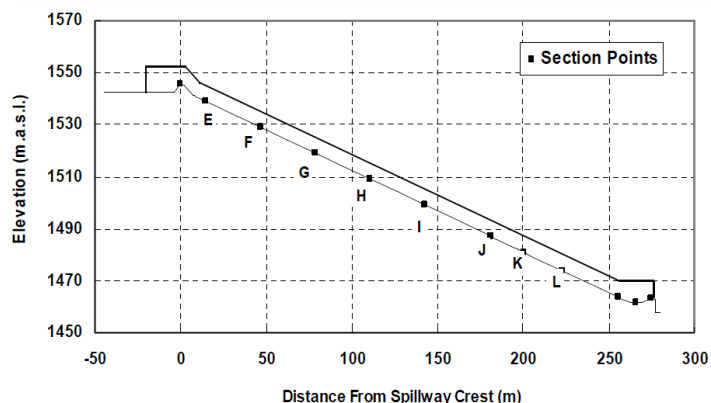


شکل ۹- مقایسه مقادیر عددی و آزمایشگاهی سرعت متوسط جریان روی سرریز و پرتاب‌کننده‌ی جامی شکل

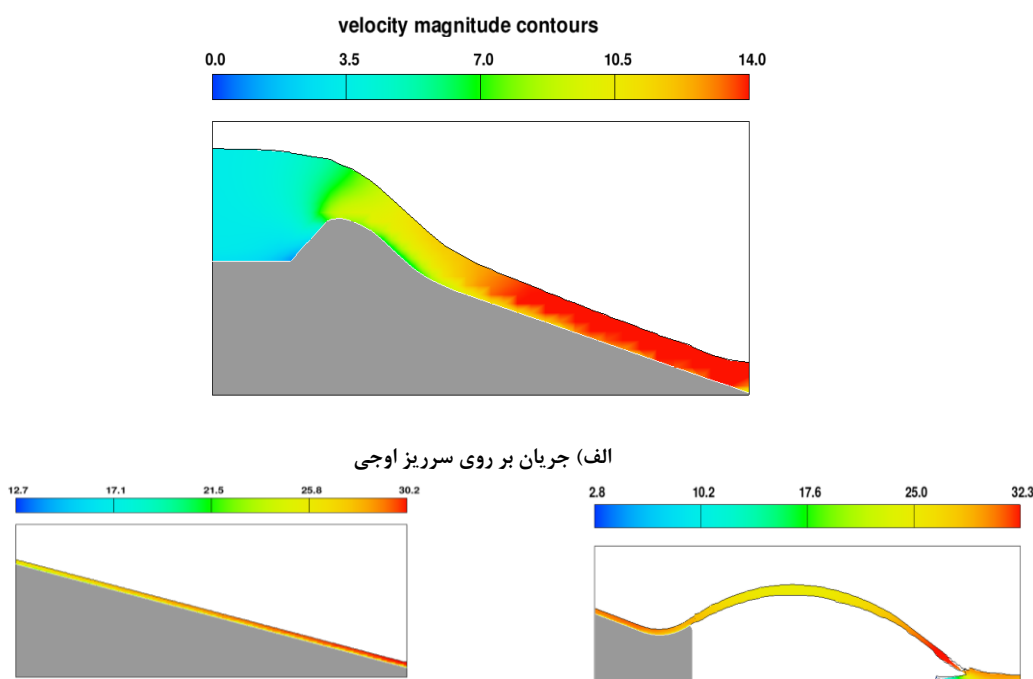
سیلاب محتمل) می‌باشد. اندازه‌گیری پارامترهای هیدرولیکی مانند عمق آب و سرعت جریان روی سرریز اندازه‌گیری‌ها در محور تاج سرریز (در ۵ محور) و همچنین بر روی تنداب و پرتاب‌کننده جامی شکل در سه محور (راست، چپ و وسط) مطابق شکل (۱۰) انجام گرفته است. خروجی‌هایی از نتایج نحوه‌ی شکل‌گیری جریان در مدل عددی در شکل (۱۱) ارائه شده است.

نتایج و بحث

نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق حاضر شامل متوسط سرعت جریان و عمق آب در مقاطع ذکرشده در طول سازه سرریز سد گاوشان به ازای چهار دبی ۶۰۰، ۸۰۰، ۹۵۰ (دبی سیلاب به ازای دوره بازگشت ۱۰۰۰۰ ساله) و ۱۳۵۰ مترمکعب بر ثانیه (دبی حداکثر



شکل ۱۰- موقعیت مقاطع اندازه‌گیری سرعت و عمق آب بر روی سرریز و پرتاب‌کننده‌ی جامی شکل



ب) جریان در مسیر شوت

ج) جریان در پرتابه جامی شکل

شکل ۱۱- نحوه شکل‌گیری جریان در مدل عددی

سرریز شدت این افزایش اندک بوده ولی در بخش‌های انتهایی سرریز بیشتر می‌باشد که شکل (۱۲) نمایانگر آن می‌باشد. همان‌طوری که از شکل (۱۲) مشهود است در شوت بدون جمع شدگی دیواره‌ها ($\theta = 0^\circ$)، در امتداد شوت با توسعه یافتگی جریان، از شرایط متغییر تدریجی (در ابتدا) نهایتاً در بخش‌های انتهایی شوت به جریان یکنواخت با سرعت ثابت رسیده و متناسباً با توجه به دائمی بودن جریان، بالاجبار سطح مقطع جریان با کاهش عمق جریان کاهش یافته و به مقدار ثابت در بخش‌های انتهایی شوت یعنی به مقدار ثابت عمق می‌رسد حال با اعمال همگرایی به دیواره‌های سرریز، کاهش سطح مقطع جریان کم کم با کاهش عرض مقطع جبران شده و از شدت کاهش عمق جریان کاسته می‌شود به‌طوری‌که در زوایای همگرایی بالا دیواره‌های سرریز ($\theta = 3^\circ$)، به‌دلیل کاهش زیاد عرض مقطع، عمق جریان مجبوراً افزایش

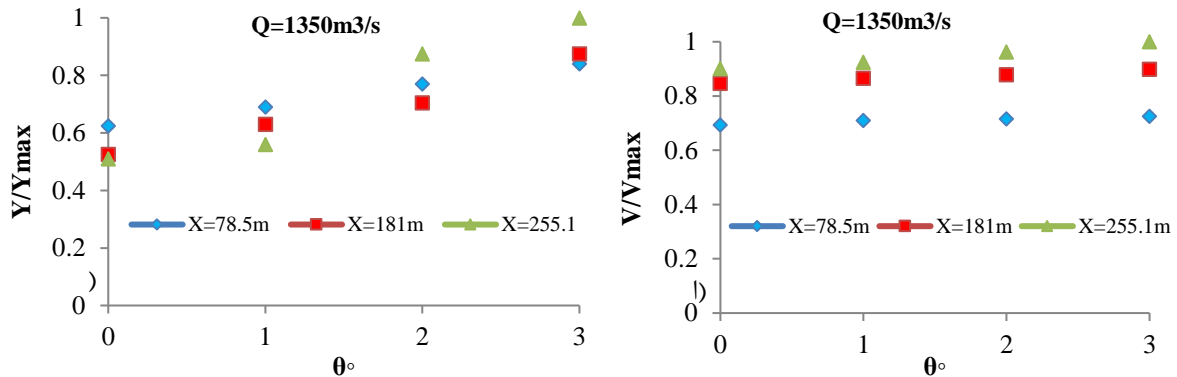
همان‌گونه که از الگوی جریان بر روی پرتابه در شکل (۱۱) مشخص می‌باشد، جریان در خروجی پرتابه دارای اغتشاشات و نامنظمی‌های فراوانی است به‌طوری‌که همین مسئله باعث ورود خطای قابل توجهی در مقادیر طول پرتابه می‌شود که این مقدار به ۱۰-۲۰ درصد رسیده است.

در ادامه‌ی این تحقیق قبل از بررسی اثر زاویه‌ی لبه‌ی جام بر مشخصات هیدرولیکی جریان اثر همگرایی دیواره‌ها بر مشخصه‌های جریان و تشکیل امواج عرضی بر روی شوت مورد بررسی قرار گرفته است.

بررسی اثر همگرایی دیواره‌ها بر مشخصات هیدرولیکی جریان و تشکیل امواج عرضی بر روی شوت
با افزایش زاویه جمع‌شوندگی دیواره‌های شوت سرریز در هر مقطع از جریان، عمق آب افزایش می‌یابد و در بخش ابتدایی جریان

جریان در هریک از مقاطع جریان نداشته است.

یافته است. از طرفی شکل (۱۲-ب) نشان می‌دهد افزایش زاویه همگرایی دیواره‌های سرریز تاثیر قابل توجهی در افزایش سرعت

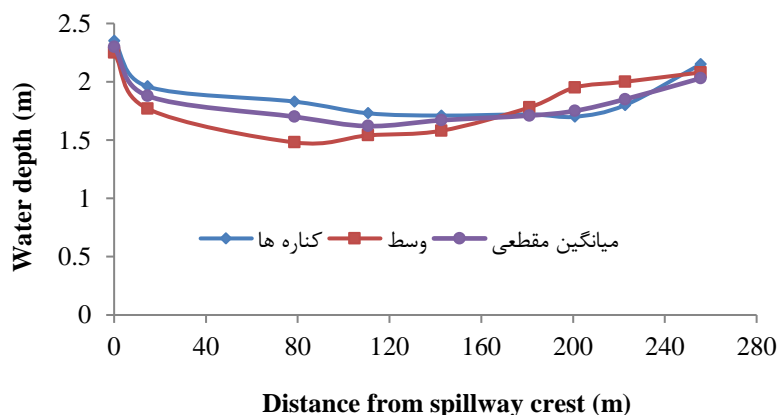


شکل ۱۲- نمودار تغییرات الف) سرعت و ب) عمق جریان در سه مقطع متفاوت نسبت به زوایای جمع‌شوندگی مختلف دیواره سرریز

افزایش عمق آب و تشکیل امواجی روی محور مرکزی سرریز می‌شوند. سپس این امواج به سمت کناره‌ها حرکت کرده و در اثر برخورد با دیواره‌های سرریز تقریباً مستهلک می‌شوند.

این امواج با افزایش دبی عبوری از سرریز (دبی در واحد عرض) تقویت شده و بی‌نظمی آن‌ها نیز افزایش می‌یابد. تشکیل این امواج ضمن متلاطم کردن جریان روی سطح سرریز و به خصوص پرتاب‌کننده جامی شکل، موجب ایجاد نوسان‌های شدید فشار هیدرودینامیکی می‌گردد که خود منشأ وقوع ارتعاش‌های سازه‌ای روی کف و دیواره‌های پرتاب‌کننده خواهد بود. ضمن آنکه جت پرتابی خروجی را در هم ریخته و ناموزون می‌نماید.

بررسی منابع حاکی از آنست که افزایش زاویه‌ی همگرایی دیواره‌های سرریز، منجر به ایجاد موج‌های عرضی روی تنداب می‌شود. برای بررسی این موضوع در شکل (۱۳) پروفیل جریان در کناره‌های دیوار و محور مرکزی کانال و میانگین هر مقطع برای جمع‌شوندگی ۳ درجه دیواره‌ها نشان داده شده است. همانگونه که از نتایج شکل (۱۳) مشخص است در اثر تنگ‌شوندگی و برخورد جریان با دیواره‌های کناری سرریز یک جبهه آشفته‌گی (امواج ایستا) با زاویه ضربه‌ای تشکیل می‌گردد که باعث افزایش پروفیل موضعی جریان در کناره‌های دیواره سرریز می‌گردد، این امواج پس از انعکاس از کناره‌ها به سمت محور مرکزی سرریز در جهت جریان حرکت می‌کنند و پس از برخورد با یکدیگر باعث



شکل ۱۳- پروفیل‌های طولی عمق جریان در محور کناری و مرکزی سرریز برای جمع‌شوندگی سه درجه و دبی بیشینه

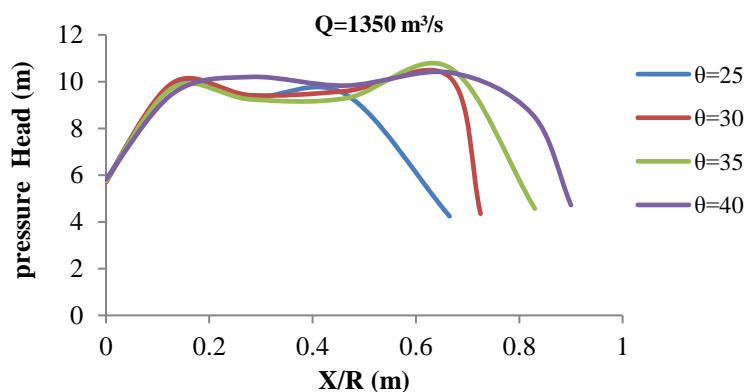
اثر زاویه‌ی لبه جام بر فشار متوسط استاتیکی کف

به‌منظور فراهم نمودن امکان بررسی و مقایسه‌ی تغییرات فشار متوسط استاتیکی وارد بر کف پرتابه‌ی جامی شکل در طول جریان به ازای زوایای مختلف لبه جام و شعاع ثابت جام پرتابی $R=20m$

بررسی اثر زاویه‌ی لبه جام بر مشخصات هیدرولیکی جریان در ادامه مقاله به بررسی اثر زوایای مختلف لبه جام پرتابی بر فشار متوسط استاتیکی کف، عمق و سرعت جریان خروجی و نحوه توسعه جت خروجی از پرتابه جامی شکل پرداخته شده است.

مختلف لبه‌ی جام و دبی بیشینه نشان می‌دهد، می‌توان گفت که تغییر زاویه لبه جام تأثیر چندانی روی ماکزیمم فشار روی جام ندارد زیرا با توجه به ثابت بودن شعاع مقدار فشار ناشی از نیروی گریز از مرکز نیز ثابت می‌ماند.

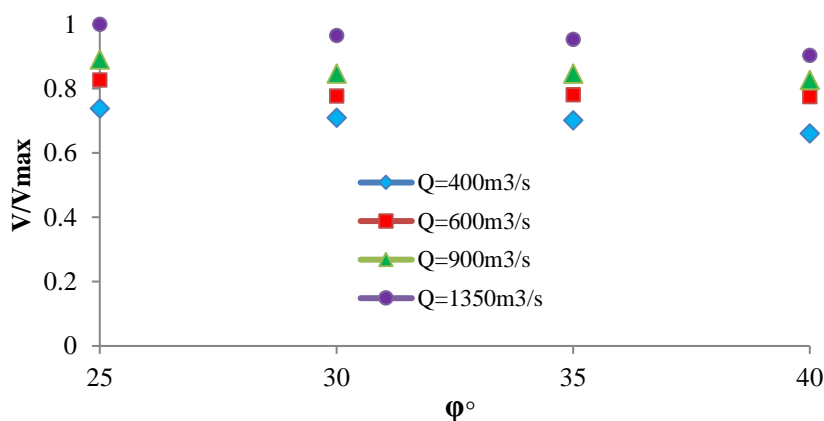
در شکل (۱۴) پروفیل فشار استاتیکی وارد بر بستر پرتابه در طول محور مرکزی جام بی‌بعد شده با شعاع جام پرتابی (X/R_b)، به‌ازای زوایای مختلف لبه‌ی جام ارائه گردیده است. با توجه به شکل (۱۴)، که پروفیل فشار روی محور مرکزی جام را برای زوایای



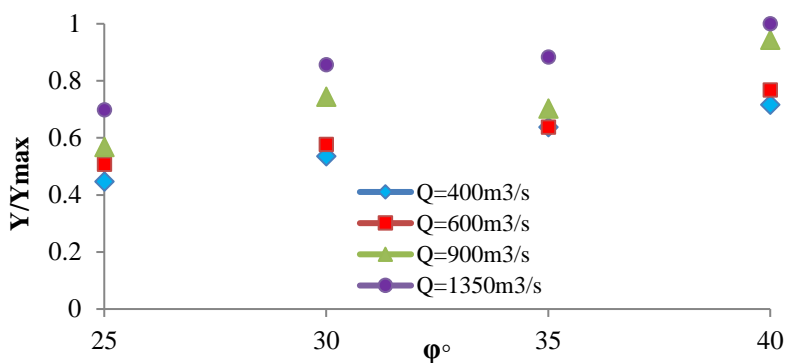
شکل ۱۴- مقادیر فشار متوسط جریان روی محور جام درازای زوایای مختلف و $R=20\text{ m}$

اثر زاویه‌ی لبه جام بر نحوه‌ی توسعه جت خروجی از باکت در بررسی طول پرتاب افقی سطح فوقانی جت پرتابی (L_2) مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه‌ی لبه‌ی جام از ۲۵ درجه به ۴۰ درجه مقدار این طول افزایش یافته است. روند افزایش طول پرتابی از زاویه ۳۰ درجه به بالاتر کم‌تر می‌باشد، زیرا زمانی که زاویه لبه زیرین جت پرتابی به ۳۵ درجه می‌رسد، زاویه لبه فوقانی جت تقریباً به ۴۵ درجه رسیده، لذا طول جت پرتابه دیگر افزایش چندانی نمی‌یابد. روند صعودی افزایش طول پرتاب افقی سطح فوقانی جت پرتابی (L_2) برای هر ۴ دبی مورد بررسی تقریباً شرایط یکسانی را نشان می‌دهد و با افزایش دبی افزایش یافته‌اند (شکل ۱۷).

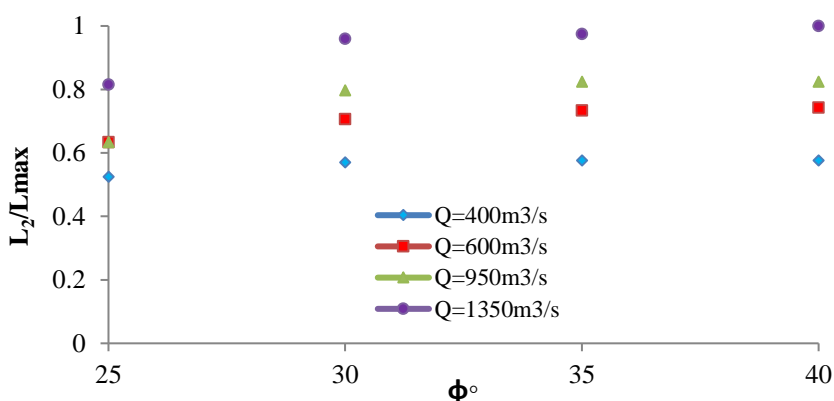
اثر زاویه‌ی لبه جام بر عمق و سرعت جریان خروجی با توجه به اهمیت پارامترهای سرعت و عمق جریان خروجی از پرتابه جامی شکل در موضوع استهلاک انرژی و آب شستگی پایاب سرریزها، مقادیر مذکور در شکل‌های (۱۵ و ۱۶) ارائه شده‌اند. تأثیر افزایش زاویه‌ی لبه‌ی جام پرتابه جامی شکل بر روی عمق جریان آب و سرعت متوسط جریان در مقطع خروجی جام به‌ازاء دبی‌های ۶۰۰ و ۱۳۵۰ مترمکعب بر ثانیه، از روند یکسانی برخوردار نیستند به طوری که عمق آب و سرعت متوسط جریان در مقطع خروجی جام به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابند.



شکل ۱۵- مقادیر سرعت خروجی از جام روی محور مرکزی برای زوایای مختلف دبی‌های مختلف



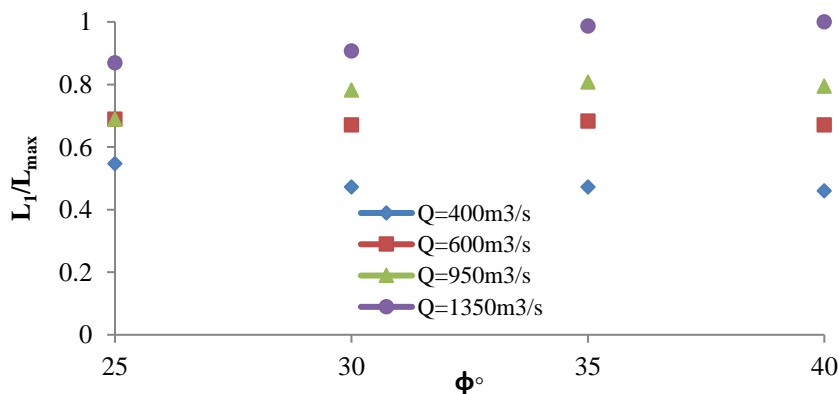
شکل ۱۶. مقادیر عمق جریان خروجی از جام روی محور مرکزی برای زوایا و دبی‌های مختلف



شکل ۱۷- فاصله لایه فوقانی جت پرتابی از انتهای جام در محل برخورد با پایاب

شیب تندى به خود مى‌گیرد. افزایش اختلاف ارتفاع بین لبه جام با قعر آن درازای افزایش زاویه لبه جام باعث کاهش سرعت جریان خروجی شده و در نتیجه جریان خروجی دارای مومنتوم کافی برای خروج از جام نبوده و در فاصله نزدیک‌تری از سازه با پایاب برخورد می‌نماید.

در شکل (۱۸) نیز طول پرتاب افقی سطح تحتانی جت پرتابی از انتهای جام (L_1) نشان داده شده است. افزایش زاویه لبه جام باعث افزایش این طول شده است. در بررسی تأثیر دبی ورودی به جام روی طول پرتاب افقی سطح تحتانی جت پرتابی از انتهای جام (L_1) مشاهده می‌کنیم که با افزایش دبی نمودار



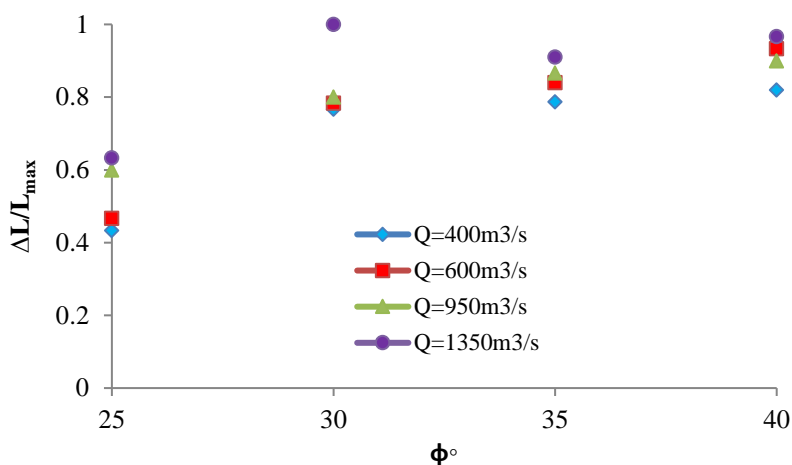
شکل ۱۸- فاصله لایه زیرین جت پرتابی از انتهای جام در محل برخورد با پایاب

۳۰ درجه برای لبه جام تأثیر زیادی در طول جت پرتابی و بازشدگی آن ندارد، جز آنکه باعث افزایش ارتفاع لبه جام و عملکرد نامناسب جام در دبی‌های پایین می‌شود. در نتیجه زاویه ۳۰ درجه برای لبه جام می‌تواند به‌عنوان یک انتخاب مناسب در طراحی پرتابه‌های جامی شکل مورد استفاده قرار گیرد. همچنین

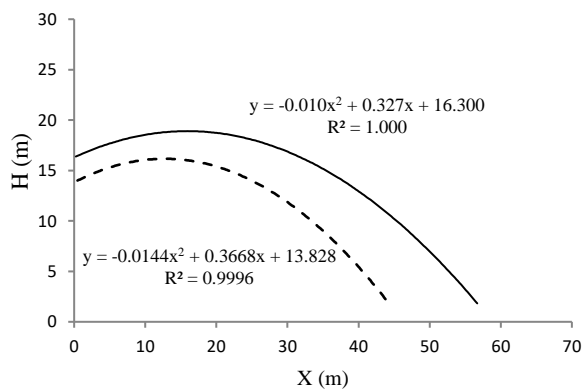
در شکل (۱۹) مقدار بازشدگی جت پرتابی در محل برخورد با پایاب برای زوایای مختلف لبه‌ی جام نشان داده شده است. با مشاهده این نمودارها نتیجه می‌شود که با افزایش زاویه لبه جام مقدار بازشدگی جت خروجی افزایش یافته است. با بررسی نتایج مشاهده می‌شود که انتخاب زاویه بیشتر از

پرتاب افقی سطح فوقانی جت پرتابی به ازای یک دبی ثابت با افزایش زاویه لبه‌ی جام پرتابی تا ۳۰ درجه افزایش یافته و از این زاویه به بعد تغییر قابل ملاحظه‌ای پیدا نکرده است به علاوه به ازای یک زاویه لبه‌ی جام ثابت با افزایش دبی طول پرتاب افقی سطح فوقانی و تحتانی جت پرتابی افزایش یافته است.

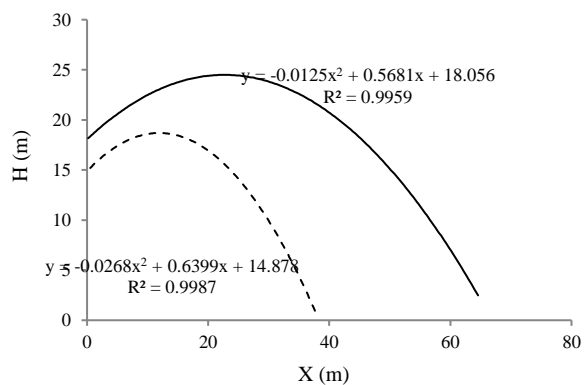
با انتخاب زاویه ۳۰ درجه، نسبت مقدار ارتفاع لبه جام به شعاع جام پرتابی (h_b/R_b) ، می‌شود که نزدیک به محدوده ارائه شده توسط (Elevatroski, 1958) می‌باشد. پروفیل‌های ارتفاعی سطح فوقانی و تحتانی جت پرتابی برای دبی‌های کمینه و بیشینه به ازای زوایای مختلف لبه‌ی جام از ۲۵ تا ۴۰ درجه در شکل (۲۰) ارائه شده است. همان‌گونه که قابل مشاهده است طول



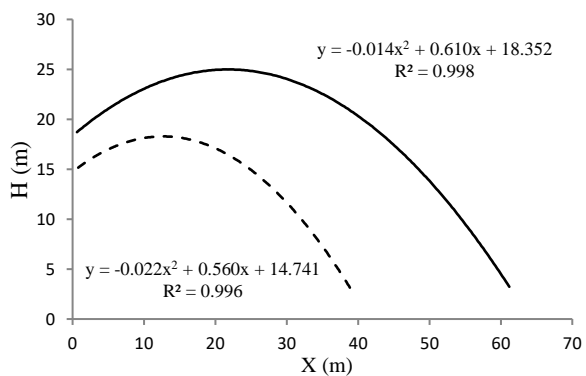
شکل ۱۹- مقدار بازشدگی جت پرتابی در محل برخورد با پایاب



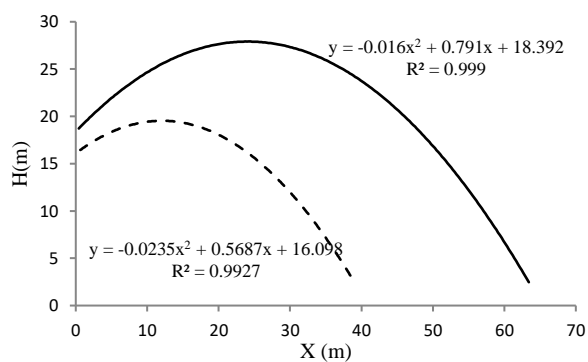
$400 \text{ m}^3/\text{s}, \phi=40^\circ$



$300 \text{ m}^3/\text{s}, \phi=40^\circ$

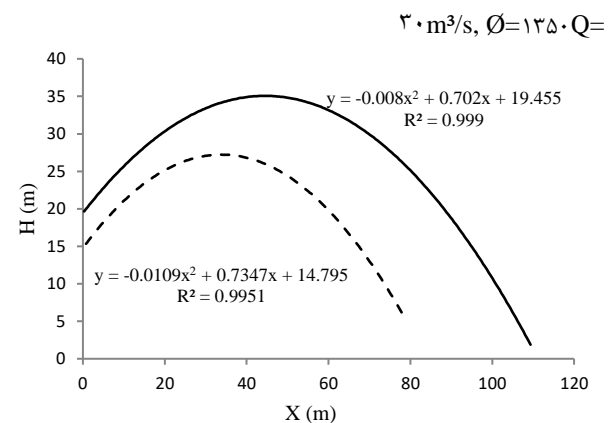
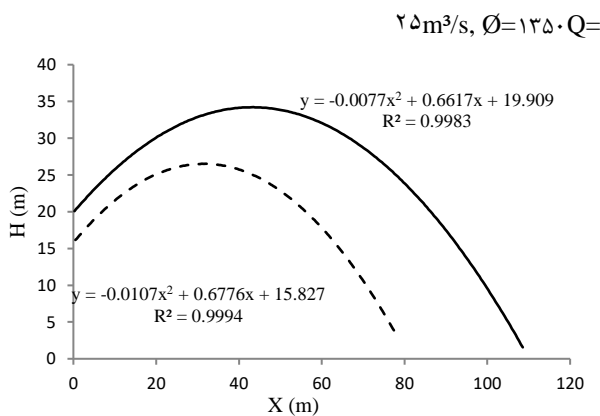
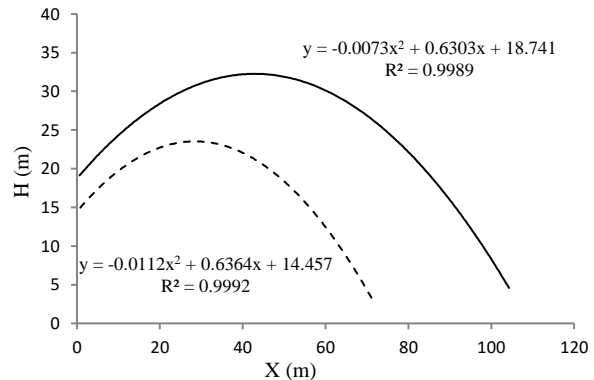
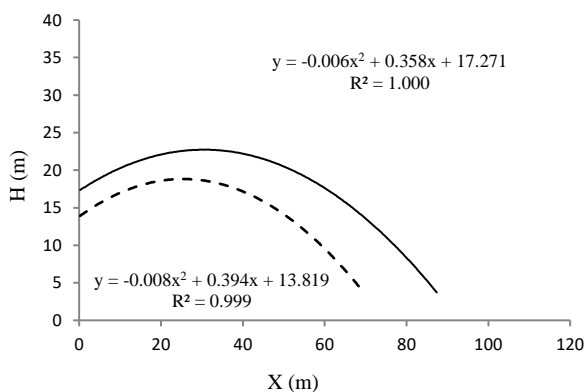


$350 \text{ m}^3/\text{s}, \phi=40^\circ$



$400 \text{ m}^3/\text{s}, \phi=30^\circ$

شکل ۲۰- پروفیل‌های سطح فوقانی و تحتانی جت پرتابی برای دبی‌های کمینه و بیشینه در زوایای مختلف لبه‌ی جام پرتابی



ادامه شکل ۲۰- پروفیل‌های سطح فوقانی و تحتانی جت پرتابی برای دبی‌های کمینه و بیشینه در زوایای مختلف لبه جام پرتابی

- ۴- تغییر زاویه لبه جام تأثیر چندانی روی ماکزیمم فشار روی جام ندارد زیرا با توجه به ثابت بودن شعاع مقدار فشار ناشی از نیروی گریز از مرکز نیز ثابت می‌ماند.
 - ۵- با افزایش زاویه لبه جام پرتابی سرعت کاهش و عمق جریان افزایش می‌یابد.
 - ۶- طول پرتاب افقی سطح فوقانی جت پرتابی به ازای یک دبی ثابت با افزایش زاویه لبه جام پرتابی تا ۳۰ درجه افزایش یافته و از این زاویه به بعد تغییر قابل ملاحظه‌ای پیدا نمی‌کند.
 - ۷- به ازای یک زاویه لبه جام ثابت با افزایش دبی طول پرتاب افقی سطح فوقانی و تحتانی جت پرتابی افزایش یافته است.
- "هیچ‌گونه تعاض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:

- ۱- نرم افزار FLOW 3D از قابلیت مطلوبی جهت استفاده در مدل‌سازی جریان سطح آزاد با سرعت بالا برخوردار می‌باشد.
- ۲- با افزایش زاویه لبه جام مقدار بازشدگی جت خروجی از جام پرتابی افزایش می‌یابد.
- ۳- انتخاب زاویه بیشتر از ۳۰ درجه برای لبه جام تأثیر زیادی در طول جت پرتابی و بازشدگی آن ندارد، جز آنکه باعث افزایش ارتفاع لبه جام و عملکرد نامناسب جام در دبی‌های پایین می‌شود. در نتیجه زاویه ۳۰ درجه برای لبه جام می‌تواند به عنوان یک زاویه بهینه در طراحی پرتابه‌های جامی شکل مورد استفاده قرار گیرد.

REFERENCES

- Beyrami, M. K. (2003). *Water transfer structures*. Esfahan University of Technology. Esfahan, Fourth Edition, 300P. (In Farsi)
- Barani, GH. and Abbasi, A. (2005). Optimization of flat bed flip bucket radius using dimensional analysis. Proc. of 5th Hydraulic Conference, Kerman, Iran. (In Farsi)
- Dehdar Behbahani, S. and Fathi Moghadam, M. (2010). Investigating the dynamic pressures caused by the flip bucket on lateral walls under the influence of the flow depth. 3th National Conference on Irrigation and Drainage, Ahvaz, Iran. (In Farsi)
- Elevatroski, E.A. (1958). Trajectory bucket-type energy dissipators. *Proceedings of ASCE, Journal of the Power Division*. 84(2). 1-15.
- Farzin, S., Karami, H., Nayyer, Sh. and Zamiri, E.

- (2018). Numerical modeling and analysis of flow hydrodynamics in flip bucket and approach channel. *J. Iran-Watershed Management Science and Engineering*, 11(39), 29-37. (In Farsi)
- Farzin, S., Karami, H., Fazlollahnezhad, M. and Nayyer, Sh. (2018). The introduction of oblique cylindrical overflow as an effective approach to increase the discharge coefficient. *J. Iran-Watershed Management Science and Engineering*. 12(41), 41-50. (In Farsi)
- Ferziger, J. and Peric, M. (1996). *Computational methods for fluid dynamics*. Springer. Verlag, 350P.
- Hirt, C. and Nichols, B. (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *J. Hydraulic Engineering*. 39(6), 201-225.
- Heller, V., Hager, W. H. and Minor, H. E. (2005). Ski jump hydraulics. *J. Hydraulic Engineering*. 131(5), 347-355.
- Karimi Pashaki, M.H., Shafaei Bejestan, M. and Mosavi Jahromi, S.H. (2012). Application of turbulence models to simulate three-dimensional flow in dam Flip Buckets. 10th National Conference on Hydraulic, Rasht, Iran. (In Farsi)
- Kermannezhad, J., Fathi-Moghadam, M. and Lashkarara, B. (2011). Dynamic pressure of flip bucket jets. *J. of ISSN*. 12(9), 1448-1454.
- Mason, P.J. (1993). Practical guidelines for the design of flip buckets and plunge pools. *J. Water Power and Dam Construction*. 45(9/10), 40-45.
- Mehri, M. and Fathi Moghadam, A. (2008). Investigation of the hydraulic performance of a Ski Jump under the overflow of the dam using physical model. *3th Iranian Water Resources Management Conference*, Tehran, Iran. (In Farsi)
- Nazari, O., Jabbari, E. and Sarkardeh, H. (2013). Dynamic pressure analysis at chute flip buckets of five dam model studies. *International Journal of Civil Engineering*. 13(1), 45-52. (In Farsi)
- Orlov, V. (1974). Die Bestimmung des Strahlsteigwinkels beim Abfluss ubereinen Sprungschanzenuberfall. *Wasserwirtschaft-Wassertechnik*. 24(9): 320-321. (in German).
- Parsaei, 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.
- Safavi, Kh., Khorasanizadeh, A. and Ghafouri, S. (2010). Design considerations in flip buckets downstream of free falling jets. *Proc. of 9th Hydraulic Conference*, Tehran, Iran. (In Farsi)
- 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.
- Steiner, R., Heller, V. and Hager, W. H. (2008). Deflector ski jump hydraulics. *J. Hydraulic Engineering*. 134(5), 562-571.
- USBR, (1990). Hydraulic design of spillway. Chap 7.
- Vischer, D.L. and Hager, W.H. (1995). *Energy dissipaters*. IAHR, Hydraulic Structures Design. Manual 9, A.A. Balkema, Rotterdam.
- Water Research Institute. (2003). Final report of the hydraulic model of Gavoshan dam spillway.