

محاسبه توزیع فشار بر روی پرتاب کننده جامی

نازنین خضری^۱، امیررضا زراتی^{۲*}، فرهاد گلزاری^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران و محیط زیست دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- استاد دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیر کبیر

۳- عضو هیأت علمی مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو

* تهران، خیابان حافظ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

Zarrati@aut.ac.ir

چکیده - از پرتاب کننده جامی برای دور کردن جریان پر سرعت از سرریز یا تونل تخلیه کننده و انتقال آن به حوضچه استغراق به منظور استهلاک انرژی استفاده می شود. طراحی جام های پرتابی معمولاً با توجه به مطالعات مدل های فیزیکی یا منحنی های طراحی مبتنی بر اندازه گیری های میدانی انجام می شود. انجام آزمایشها روی مدل فیزیکی، گران قیمت و تغییر دادن در اجزای مدل بسیار مشکل و پر هزینه بوده و تقریب منحنی های طراحی نیز زیاد است. هدف از این تحقیق، بررسی فشار پویا بر روی پرتاب کننده جامی با به کارگیری نوعی مدل عددی (Fluent) است. به این منظور، توزیع فشار بر روی جام پرتابی، مقدار و محل وقوع فشار حداکثر، اثر عدد فرود جریان ورودی بر جام پرتابی و نسبت عمق جریان به شعاع جام با توجه به نتایج حاصل از روش عددی و مقایسه با نتایج تئوری و آزمایشگاهی موجود بررسی شده است. مقایسه نتایج آزمایشگاهی توزیع فشار و سطح آزاد با نتایج حاصل از مدل عددی نشان می دهد که، خطای به دست آمده کمتر از ۱۰٪ بوده و این نشان دهنده توانایی مدل عددی در تحلیل و طراحی جام های پرتابی است.

کلید واژگان: جام پرتابی، روش عددی، فشار دینامیکی، سرریز، فلوننت.

۱- مقدمه

مطالعه و بررسی سازه های هیدرولیکی در سدها همواره مورد توجه محققان علم هیدرولیک بوده و یکی از ارکان مهم ساخت سد، سرریز و مستهلک کننده های انرژی جریان است. مستهلک کننده های انرژی در انتهای سرریز سازه هیدرولیکی به منظور کاهش فرسایش در پایین دست سرریزها به کار می روند. یکی از معمولترین سازه های استهلاک انرژی، پرتاب کننده های جامی همراه با حوضچه های استغراق است.

پرتاب کننده جامی (جام پرتابی)، یکی از اجزای سرریز است که جهت جریان سرریز را تغییر داده و آب را به صورت جت در هوا پرتاب می کند. هدف اصلی از تشکیل جت، دور ساختن جریان پر سرعت از بدنه سد و استهلاک انرژی در برخورد جت به حوضچه استغراق در پایین دست است که برای جریانهایی با سرعت بیش از ۱۵ تا ۲۰ متر بر ثانیه به کار می رود (Vischer et. al. 1995). این جامها معمولاً ویژه هر پروژه بوده و به کمک نمودارهای تجربی طراحی می شوند و طراحیها به کمک

در مقاله حاضر شبیه‌سازی عددی مدل پرتاب‌کننده جامی و محاسبه سطح آزاد و فشارهای پویا به‌عنوان راهکاری نوین در کنار روشهای تحلیلی و مدل‌سازی فیزیکی بررسی شده است.

در پی استفاده موفق از نرم‌افزار فلوئنت در شبیه‌سازی پدیده‌های پیچیده در هیدرولیک و سازه‌های هیدرولیکی (Turan et al, 2008; Pirzadeh. and Shamloo, 2007; Park et al, 2004; Dargahi, 2006) در این کار تحقیقاتی از این نرم‌افزار برای حل میدان جریان در پرتاب‌کننده جامی استفاده شده است (Fluent Inc. 1993).

۲- معادلات حاکم و روش حل

رفتار جریان سیال تراکم‌ناپذیر آشفته توسط معادلات پیوستگی و ممتم توصیف می‌شود. این معادلات که در واقع بیانگر بقای جرم و ممتم هستند به صورت ذیل نوشته می‌شوند (Schlichting, H. 1979):

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

معادله ممتم:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} (\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \bar{u}_i' u_j')$$

(۲)

این معادلات به معادلات رینولدز معروفند. در روابط فوق، i و j مقادیر ۱ و ۲ و ۳ را گرفته و نشان‌دهنده سه جهت مختصات x و y و z هستند. \bar{u}_i مولفه سرعت در جهت x_i ، ν لزجت ملکولی، ρ چگالی سیال، g_i مولفه شتاب ثقل در جهت i و \bar{p} فشار در هر نقطه از سیال است. $-\rho \bar{u}_i' u_j'$ همان تنشهای رینولدز است که بر سیال

مدل‌سازی فیزیکی نهایی می‌شود. در تحلیل جریان عبوری از روی پرتاب‌کننده جامی، محاسبه سطح آب در طول جام و پیش‌بینی فشارهای وارد شده بر آن مهمترین مسائلی است که باید توسط طراح انجام شود. سطح آب روی پرتاب‌کننده جامی، در تعیین ارتفاع دیوارهای دو طرف نقش دارد و با مشخص بودن توزیع فشار، طراحی سازه‌ای دیوارهای پرتاب‌کننده جامی ممکن می‌شود. پرتاب‌کننده جامی نخستین بار در طراحی هیدرولیکی سد Dordogne فرانسه در سال ۱۹۳۰ معرفی شد و سپس توسط محققین مختلف توسعه یافت (Rhone et al. 1959, Peterka 1983).

نیروهای هیدرولیکی روی جام پرتابی، در طراحی سازه جام اهمیت دارند. مطالعات تحلیلی و مدل‌سازی نشان می‌دهند که فشار کف به‌طور پیوسته در طول جام پرتابی تغییر کرده و تابعی از سرعت ورود و عمق جریان، شعاع انحنا و زاویه مرکزی جام پرتابی است. برای مقاصد طراحی، علاوه بر فشار حداکثر، تغییرات فشار و سطح آب در طول جام پرتابی نیز باید تعیین شود.

پیشینه تحقیقاتی برای محاسبه فشار هیدرودینامیک پرتاب‌کننده جامی به بیش از پنجاه سال پیش باز می‌گردد. و روشهای تحلیلی و ساخت مدل‌های فیزیکی در این زمینه مورد استفاده قرار گرفته‌اند و از آن میان می‌توان روش حل تحلیلی با در نظر گرفتن جریان در طول جام پرتابی به صورت گرداب آزاد توسط (Chow 1959)، (Balloffet (1961)، Indian Standard (1982) و حل تحلیلی معادله لاپلاس توسط (Chen and Yu (1965)، (Shuguang and Lenau & Cassidy (1969) و (Zhengxiang (1988) و تحلیل جریان به کمک مدل‌های فیزیکی و مطالعات میدانی توسط Corps of Juon and Engineering (1990)، (Peterka (1983)، (Hager (2000) و Heller et. al. (2005) را نام برد.

عمل کرده و اثر گردابه‌های آشفتگی را در سیال اعمال می‌کند. در اکثر جریان‌های آشفته، تنش رینولدز بسیار بیشتر از تنش ناشی از لزجت ملکولی $\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$ است. در این تحقیق با توجه به عدم وجود مناطق چرخشی و جدایی در جریان و عملکرد بسیار خوب مدل $k-\epsilon$ استاندارد در حل مسائل مختلف مهندسی هیدرولیک، از این مدل استفاده شده است (Rodi W., 1980).

تعیین تراز سطح آب در بسیاری از مسائل کانال‌های باز مطرح بوده و یکی از معضلات تحلیل این‌گونه جریانها است. یکی از روشهای پیشرفته و دقیق در تعیین تراز سطح آب روش VOF^۱ است. در این روش از تابع متغیری به نام F استفاده می‌شود که برابر است با نسبت حجم آب در سلول محاسباتی به حجم سلول محاسباتی. اگر F برابر ۱ باشد، نشان‌دهنده پر بودن سلول از آب است و اگر برابر صفر باشد، سلول پر از هوا است. برای $0 < F < 1$ درصدی از سلول حاوی آب است. به این ترتیب می‌توان از F برای یافتن سطح آب استفاده کرد. در تحقیق حاضر سطح آب در محلی تعریف شده که ۹۰ درصد آن را هوا و ۱۰ درصد آن را آب تشکیل داده باشد یا به بیان دیگر $F=0.1$ باشد (Wood I.R., 1991). با توجه به رابطه پیوستگی آب می‌توان رابطه زیر را برای F به دست آورد:

$$\frac{dF}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

روشهای متعددی برای حل این معادله وجود دارد. در تحقیق حاضر، روش بازسازی حجمی استفاده شده است. این روش از نوع غیرماندگار بوده و برای انفصال معادله از روش اختلاف بالادست مرتبه اول استفاده می‌کند و در شبکه‌های منظم دارای دقت و رفتار مناسبی است (Versteeg et al. 1995).

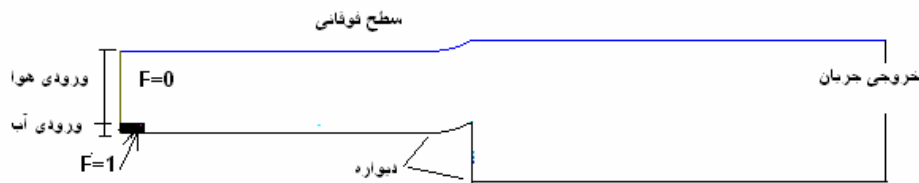
(Youngs D. L., 1982). در این روش شیب سطح بین آب و هوا در هر سلول جریان به صورت خطی فرض می‌شود. روش انفصال استفاده شده در نرم افزار فلونت برای معادلات، روش حجم محدود^۲ است. در این روش معادلات به صورت جدا جدا حل شده و روش ضمنی با مرتبه اول برای مدل‌سازی جریان غیرماندگار به کار رفته است (Patankar S.V., 1980). برای ارتباط دادن مقادیر سلول‌های مجاور دیوار به شرایط بدون لغزش بر روی دیوار و در نظر گرفتن زبری آن از تابع استاندارد دیواره استفاده شده است. این تابع در محدوده وسیعی از جریانها کاربرد دارد. شرایط مرزی ورودی و خروجی، با توجه به شرایط مسأله اعمال شده است. در این تحقیق با توجه به فوق بحرانی بودن جریان، سرعت و عمق جریان در ورودی مشخص شده و به برنامه داده می‌شود (شکل ۱).

در شروع محاسبات، فاز هوا به عنوان فاز اصلی (فاز اول) در نظر گرفته شده که کل میدان را شامل می‌شود. سپس فاز آب در سلول‌های ستون اول ورودی کانال، با عمق مشخص تعریف می‌شود. مقادیر عمق و سرعت ورودی آب و هوا و مقادیر اولیه آشفتگی محاسبه شده با استفاده از روابط تجربی، بعنوان شرایط اولیه به مرز ورودی اعمال می‌شوند. سرعت ورودی هوا را می‌توان صفر در نظر گرفت.

در مرز خروجی گرادینان تمامی متغیرها صفر در نظر گرفته شده و از شرط مرزی تقارن برای مرز فوقانی میدان - که فقط با فاز هوا تماس دارد - استفاده شده است.

در این تحقیق به منظور برقراری ارتباط بین میدان سرعت و فشار از روش PISO استفاده شده و در حل انفصال جمله جابجایی معادلات روش کوئیک به کار رفته است (Versteeg et al. 1995).

۱. Volume of Fluid



شکل ۱ شرایط مرزی و اولیه حاکم بر میدان جریان

صفر که به پرتاب‌کننده جامی با شعاع ۴۰ سانتی‌متر و زاویهٔ چرخش ۳۰ درجه منتهی می‌شود. آزمایشها در کانال مستطیلی به عرض ۴۹۹mm، طول ۷ متر و عمق ۷۰۰mm از جنس پلکسی گلاس با ضریب مانینگ ۰/۰۰۹ انجام شده است. ایجاد تغییرات سرعت و عمق جریان در محدوده وسیعی از مقادیر عدد فرود امکان پذیر بوده است. شکل کلی میدان مطابق شکل ۲ است.

به منظور تحلیل جریان بر روی پرتاب‌کننده جامی، ابتدا هندسهٔ جریان مطابق این آزمایشها توسط نرم‌افزار کمکی گمیت ایجاد و برای حل مسأله از شبکهٔ منطبق بر مرز استفاده شد. شبکهٔ محاسباتی در حالت کلی دارای ابعاد متوسط $\Delta x=0.02m$ و $\Delta y=0.005m$ بوده است. در شکل ۳ شبکه‌بندی میدان نشان داده شده است.

تحلیل جریان برای پرتاب‌کننده جامی برای R/d و مقادیر مختلف عدد فرود انجام شده است. در اینجا نتایج آزمایشگاهی برای جریان با عمق ۴ cm ($R/d=10$) و اعداد فرود ۳ و ۵ در مقایسه‌ها به کار گرفته شده است.

با توجه به اینکه مسیر مستقیم قبل از جام پرتابی، طول کافی را برای توسعه یافتن پروفیل سرعت دارد، بنابراین به اعمال سرعت توسعه یافته در ورودی میدان نیاز نیست و لذا پروفیل سرعت به صورت یکنواخت به مرز ورودی بالادست اعمال شد.

به منظور تحلیل جریان، حل به صورت آشفته و غیر ماندگار انجام و پس از آنکه میدان جریان به حالت

۳- تحلیل جریان عبوری از روی پرتاب‌کننده جامی

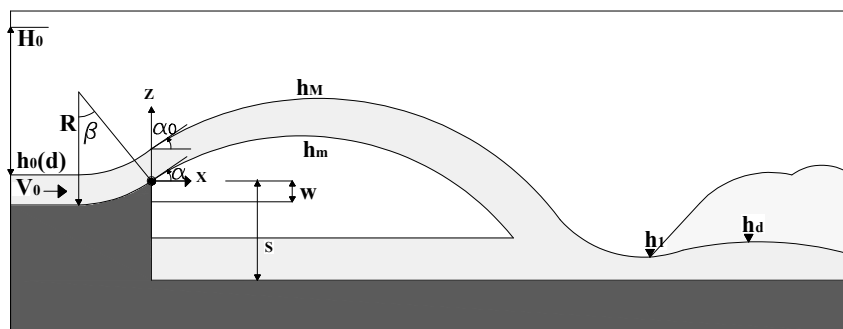
محاسبه تراز سطح آب و نحوهٔ توزیع فشار بر روی پرتاب‌کننده جامی و اثر پارامترهای مختلف از جمله R/d (شعاع جام و d عمق جریان ورودی جام)، یکی از مهمترین مسائل مدنظر در طراحی پرتاب‌کننده جامی است. خوشبختانه داده‌های آزمایشگاهی کاملی برای پرتاب‌کننده جامی در مراجع ارائه شده است (Joun et al. 2000, Heller et al. 2005). چند منحنی بدون بعد نیز برای طراحی (Corps of Engineering 1990) وجود دارد که حاصل اندازه‌گیری در شرایط محدود در نمونه اصلی هستند. برای نشان دادن کارایی روش عددی، پروفیل سطح آب و فشار دینامیکی بر روی پرتاب‌کننده جامی با این نتایج آزمایشگاهی و روابط پیشنهادی توسط محققین فوق مقایسه و پس از اطمینان از عملکرد مدل عددی، اثر پارامترهای مختلف بر توزیع فشار بررسی شده است.

۳-۱- شبیه‌سازی عددی الگوی جریان در پرتاب‌کننده جامی

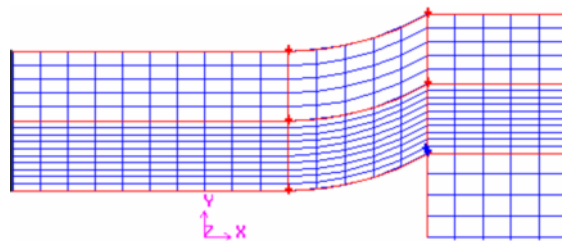
در این بخش از پژوهش، شبیه‌سازی عددی الگوی جریان و محاسبهٔ توزیع فشار بر اساس کار آزمایشگاهی (Joun et al. 2000, Heller et al. 2005) انجام شده است. میدان مورد نظر عبارت است از فلووم افقی با شیب

همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود سطح آب روی جام پرتابی از پیوستگی خوبی برخوردار بوده و نتایج، تطبیق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. خطای اندازه‌گیری در برخی نقاط با انحنای شدید در سطح آب، به ۰/۵ سانتیمتر می‌رسد، که در حد اندازه‌گیریهای آزمایشگاهی قابل قبول است. همچنین خطا برای عدد فرود برابر ۳، نسبت به عدد فرود ۵ بیشتر است.

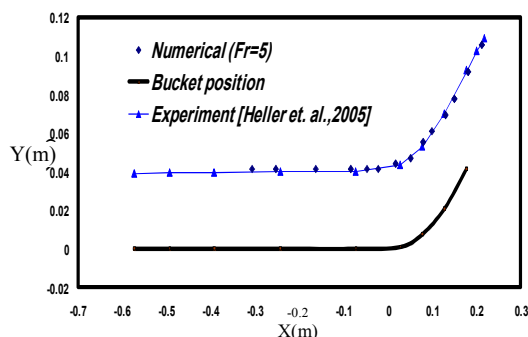
ماندگار رسید، میدان فشار و پروفیل سطح آب بر روی جام پرتابی تعیین شد. در این حل عددی، پس از تحلیل حساسیت ابعاد شبکه محاسباتی تعداد ۱۰۰۰۰ سلول محاسباتی استفاده شد و مدت زمان اجرا با کامپیوتر پنتیوم IV، بین ۱/۵ تا ۳ ساعت بوده است. پروفیل سطح آب بر روی جام پرتابی - که حاصل از حل میدان جریان آب و هوا است - در شکل ۴ مشاهده می‌شود.



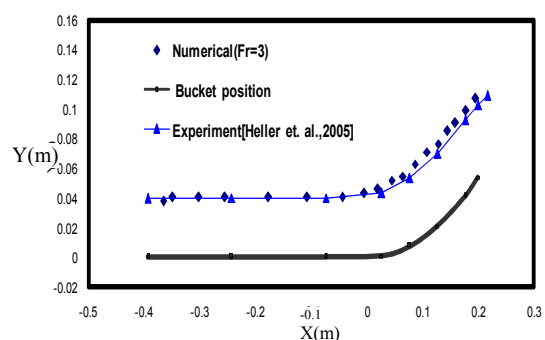
شکل ۲ شمای کلی جریان عبوری از یک پرتاب کننده جامی (Heller et. al. 2005)



شکل ۳ هندسه جام پرتابی و شبکه استفاده شده



Fr=5



Fr=3

شکل ۴ مقایسه نتایج سطح آزاد جریان برای $R/d=10$ و فرود ۳ و ۵ با نتایج آزمایشگاهی Heller et. al.(2005)

قدرت مدل عددی را به‌خوبی نشان می‌دهد؛ به‌ویژه اینکه جت پرتابی دارای دو سطح آزاد در دو طرف جت است.

۳-۱-۱- محاسبه و تحلیل فشار بر روی جام پرتابی

توزیع فشار پیزومتری در کف جام پرتابی (h_p)، پارامتر مهمی در طراحی محسوب می‌شود که شامل مجموع بلندای (هد) فشار استاتیک (h_0) و دینامیک در کف جام است.

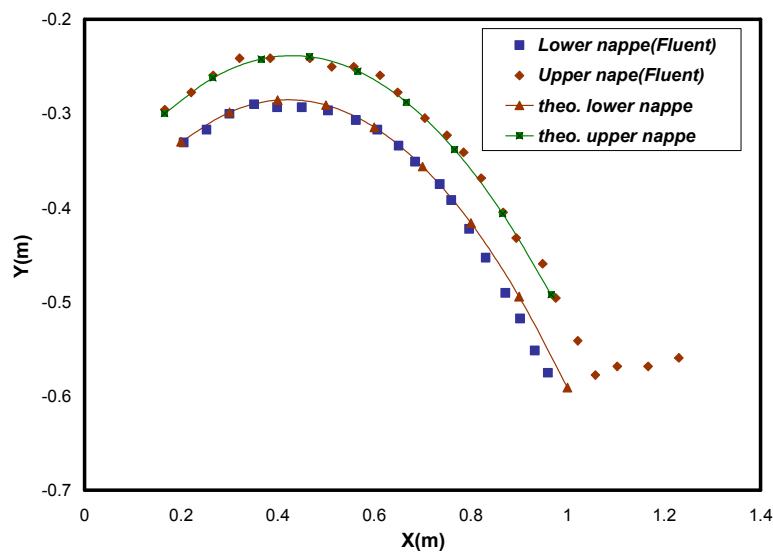
در شکل ۶ برای نسبت $R/d=10$ و اعداد فرود ۳ و ۵ تغییرات بدون بعد بلندی فشار H_p برحسب فاصله بی بعد X_p مطابق تعریف زیر ترسیم و با نتایج آزمایشگاهی Heller et. al. (2005) مقایسه شده است.

$$X_p = \frac{X}{R \sin \beta} \quad \text{و} \quad H_p = \frac{h_p - h_0}{h_{pM} - h_0} \quad (4)$$

h_{pM} حداکثر بلندی در طول جام پرتابی است؛ نقطه $X=0$ محل ورود جریان به جام پرتابی، X فاصله از ابتدای جام و β زاویه چرخش جام است. مقایسه نتایج، صحت روش عددی را در محاسبه فشارهای دینامیکی در طول جام نشان می‌دهد.

با توجه به فشارهای دینامیکی شدید و انحنای زیاد سطح آب در روی جام پرتابی، محاسبه صحیح سطح آب، کارایی مدل عددی به‌کار رفته در محاسبات را نشان می‌دهد.

پروفیل مسیر حرکت جریان پرتابی در خروج از جام پرتابی، برای جریانی به عمق ۴ سانتی‌متر و عدد فرود ۳ - محاسبه شده توسط مدل عددی - به‌صورت شکل ۵ است. نتایج معادله تئوری پرتابه نیز در این شکل ارائه و با نتایج مدل عددی مقایسه شده که دقت مناسبی را نشان می‌دهد. زاویه خروج جریان از جام پرتابی - به‌دلیل تبعیت نکردن کامل خطوط جریان از پروفیل کف جام پرتابی با زاویه انتهای جام - متفاوت و از آن کمتر است. برای اندازه‌گیری زاویه خروج جریان با استفاده از پروفیل سطح آب محاسبه شده در مدل عددی، خط مماس بر خط جریان خروجی از جام پرتابی ترسیم و زاویه آن محاسبه شده است. این زاویه با روابط تجربی ارائه شده توسط Heller et al. (2005) برای زاویه پرتابه مقایسه و مشخص شد که نتایج محاسبات مدل عددی و روابط فوق نتایج تقریباً یکسانی را نشان می‌دهند. با توجه به پیچیدگی محاسبه سطح آزاد، حل این مثال کارائی و



شکل ۵ پروفیل حرکت جریان پرتابی از پرتاب‌کننده جامی ($R/d=10, Fr=3$)

حداکثر آن در طول جامهای پرتابی ارائه کردند (توجه شود که در این روابط x فاصله از انتهای جام است):

$$\frac{h_d}{h_{dM}} = \left[\frac{x}{x_{PM}} \exp\left(1 - \frac{x}{x_{PM}}\right) \right]^{1.5} \quad (5)$$

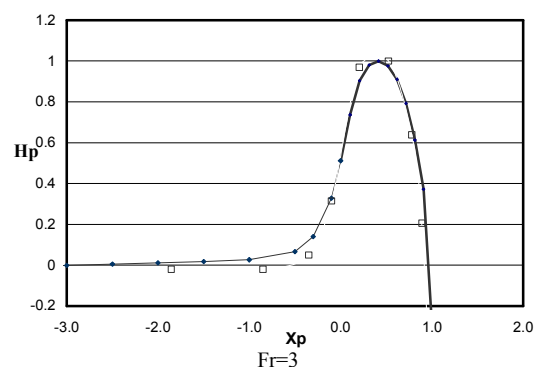
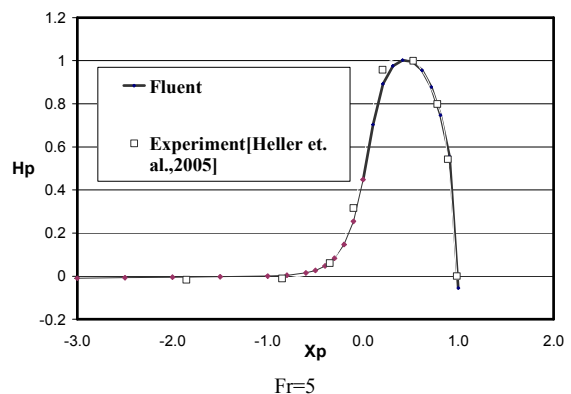
$$\frac{x_{PM}}{R \sin \beta} = -(1.5^\circ / \beta)^{1/5} \quad (6)$$

در این معادلات x_{PM} فاصله محل حداکثر فشار روی جام پرتابی (h_{PM}) از انتهای جام و h_{dM} بیشینه فشار دینامیک است. در این قسمت با استفاده از مدل عددی و محاسبات انجام شده برای $Fr=5$ و $R/d=3$ ، توزیع فشار در طول جام به صورت بی بعد با روابط (۵) و (۶) در شکل ۷ مقایسه شده است. همان گونه که مشاهده می شود نتایج به دست آمده از روش عددی تطابق بسیار خوبی با روابط تجربی که حاصل ۹۰ دسته آزمایش است دارد.

همچنین محل حداکثر فشار به دست آمده از مدل عددی با روابط تجربی ارائه شده توسط محققان فوق (رابطه ۶)، تطابق کامل دارد. (شکل ۸).

۲-۳- شبیه سازی عددی الگوی جریان در پرتاب کننده جامی سد Hartwell

پس از مقایسه نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی، در این قسمت نتایج مدل عددی با نتایج اندازه گیری شده توزیع فشار و سطح آزاد جریان در سد Hartwell مقایسه شده است. این نتایج در راهنماهای طراحی ارائه شده توسط COE^1 (Corps of Engineering, 1990) موجود است.

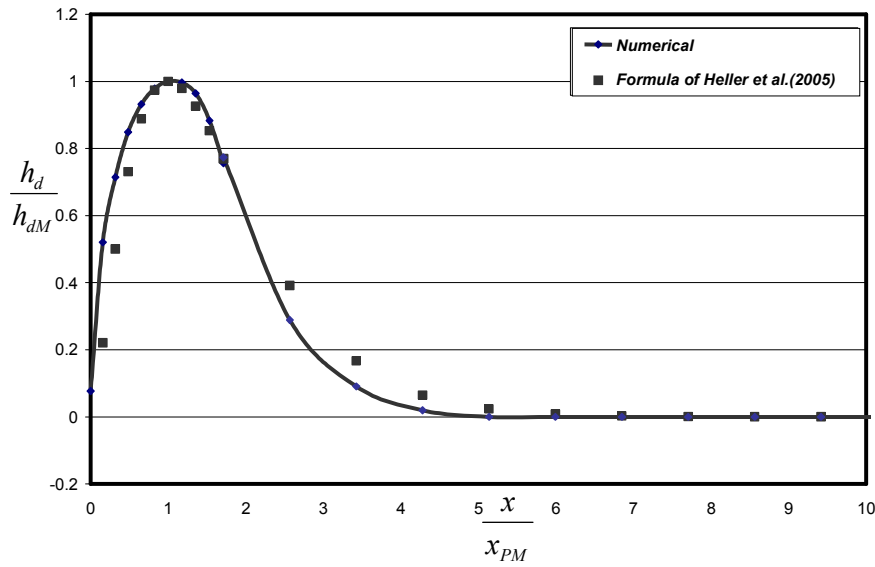


شکل ۶ تغییرات بلندی فشار روی پرتاب کننده جامی برای $R/d=10$ و اعداد فرود ۳ و ۵ و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی Heller et. al. (2005)

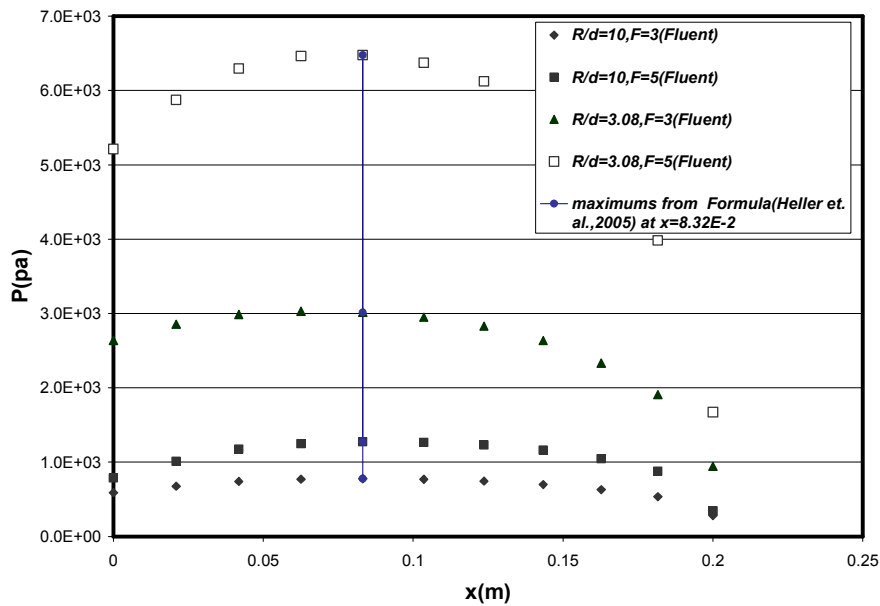
مطابق نتایج آزمایشگاهی و همچنین عددی - همان طور که در شکل ۶ مشاهده می شود- در $Xp=0$ (ابتدای جام) مقدار H_p تقریباً برابر ۰/۵ است؛ یعنی در ابتدای جام پرتابی فشار دینامیکی وجود دارد. البته این اثر در $Xp < -3$ و یا به بیان دیگر در فاصله $3 * R \sin \beta$ از شروع جام قابل صرف نظر کردن است و فشارهای موجود به فشارهای هیدرواستاتیک می رسد. همچنین در $Xp = -0/5$ - یعنی در طولی به اندازه $0.5 R \sin \beta$ در بالادست جام - فشار دینامیک به کمتر از ۲۰ درصد فشار استاتیک کاهش می یابد.

Heller et al. (2005) با استفاده از ۹۰ دسته داده های آزمایشگاهی، روابط زیر را برای توزیع فشار و محل

1. Corps of Engineering



شکل ۷ مقایسه نتایج مدل عددی برای توزیع فشار دینامیک و رابطه تجربی (۵) برای $R/d=3$ و $Fr=5$



شکل ۸ مقایسه محل بیشینه فشار حاصل از رابطه (۶) (Heller et. al. 2005) و فلونت با R/d و مقادیر مختلف عدد فرود

مطابق شکل ۹ است. برای شبکه بندی در نزدیکی دیوارها از شبکه ای با ابعاد متوسط ($\Delta x=0.1$ m, $\Delta y=0.1$ m) و در نقاط دورتر با ابعاد متوسط ($\Delta x=0.2$ m, $\Delta y=0.1$ m) استفاده شده است. گام زمانی به کار رفته برای همگرا

میدان مورد نظر عبارت است از تندابی با شیب ۵۵ درجه که به پرتاب کننده جامی با شعاع ۳۰ فوت (۹/۹۴۴ متر) و زاویه چرخش ۹۵ درجه (زاویه انتهای پرتاب کننده جامی با افق ۴۰ درجه) منتهی می شود. شکل کلی میدان

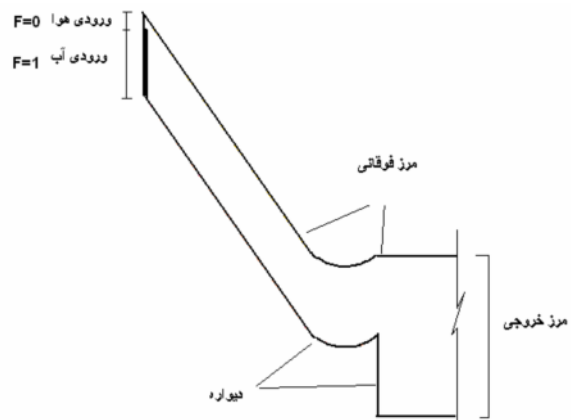
نتایج حاصل از مدل عددی برای $d/R=0.18$ اختلافی تا ۲۰ درصد را نسبت به منحنی طراحی نشان می‌دهد. لازم است ذکر شود که در منحنی طراحی، اثر عدد فرود وجود ندارد؛ در صورتی که مدل عددی که با آزمایش‌های Heller et. al. (2005) نیز تطابق دارد نشان می‌دهد که نتایج، به تغییر عدد فرود حساس است. همچنین برای ترسیم منحنی طراحی خطوط برای مقادیر مختلف d/R از میان نقاط اندازه‌گیری عبور داده شده یا به بیان دیگر، پراکندگی نتایج اندازه‌گیری در اطراف منحنی‌ها دیده می‌شود که این به معنای خطا در این منحنی‌ها است. با توجه به این نتایج می‌توان گفت که مدل عددی توانسته تا حد مناسبی توزیع فشار را تعیین کند.

۳-۳- تأثیر عدد فرود بر توزیع فشار بر روی جام پرتابی برای مقادیر مختلف d/R

پس از اطمینان یافتن از دقت مدل عددی، در این قسمت توزیع فشار برای مقادیر d/R ثابت و مقادیر عدد فرود با استفاده از نتایج حاصل از فلونتت برای هندسه مدل Juon (2000) & Hager، به شیوه ارائه شده توسط COE (Corps of Engineering, 1990) ترسیم شده است (شکل ۱۱). با توجه به این محاسبات، دیده می‌شود که عدد فرود بر نحوه توزیع فشار در روی جام پرتابی می‌گذارد و نتایج مدل عددی نشان می‌دهد که این تأثیر برای d/R های بزرگتر، بیشتر است.

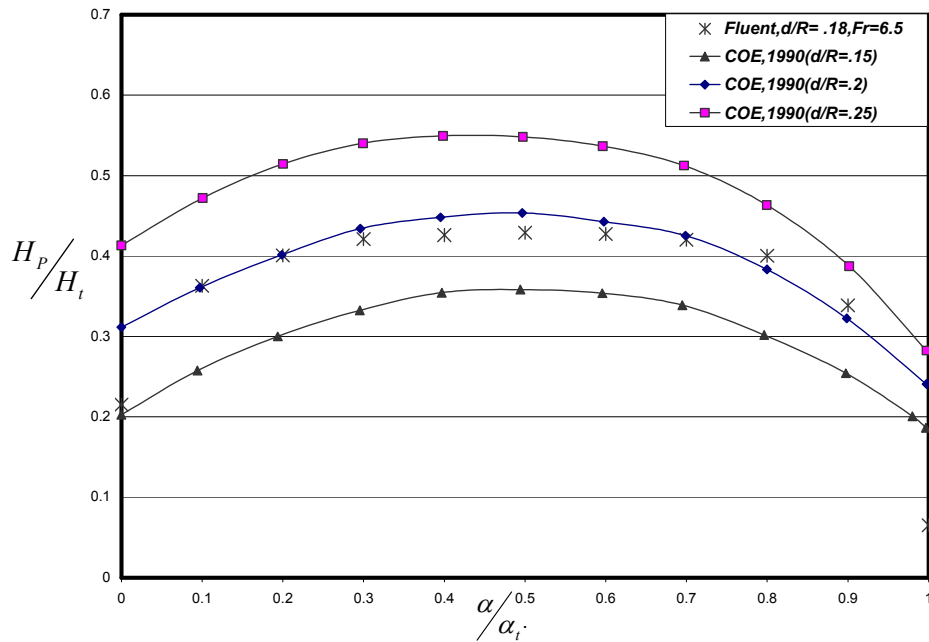
همچنین از شکل می‌توان نتیجه گرفت که برای $d/R > 0.1$ منحنی‌های طراحی، نتایج بالاتری را نسبت به نتایج مدل عددی برای مقادیر مختلف عدد فرود به دست می‌دهند. این اختلاف با افزایش عدد فرود، افزایش یافته و بین ۳۰ تا ۵۰ درصد تغییر می‌کند. برای $d/R=0.1$ و $Fr=5$ ، اختلاف مدل عددی با منحنی COE کمتر می‌شود (شکل ۱۱).

شدن، بین ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۱ ثانیه متغیر و با توجه به ابعاد نمونه، زمان لازم برای هر بار اجرای برنامه، بین ۱۵ تا ۲۰ ساعت است. شرط اولیه حل میدان جریان در ابتدا به صورت یک ستون آب در ورودی کانال به ارتفاع ۸ متر در نظر گرفته شده و مقدار جزء حجم سیال آب در این ناحیه برابر واحد و در سایر نقاط شبکه برابر صفر است. در شکل ۹ شرایط مرزی و شرط اولیه میدان جریان نشان داده شده است. در مرز ورودی کانال، با توجه به دبی جریان از شرط مرزی سرعت معین و یکنواخت $10/5 \text{ m/s}$ برای آب به موازات شیب استفاده شده است.

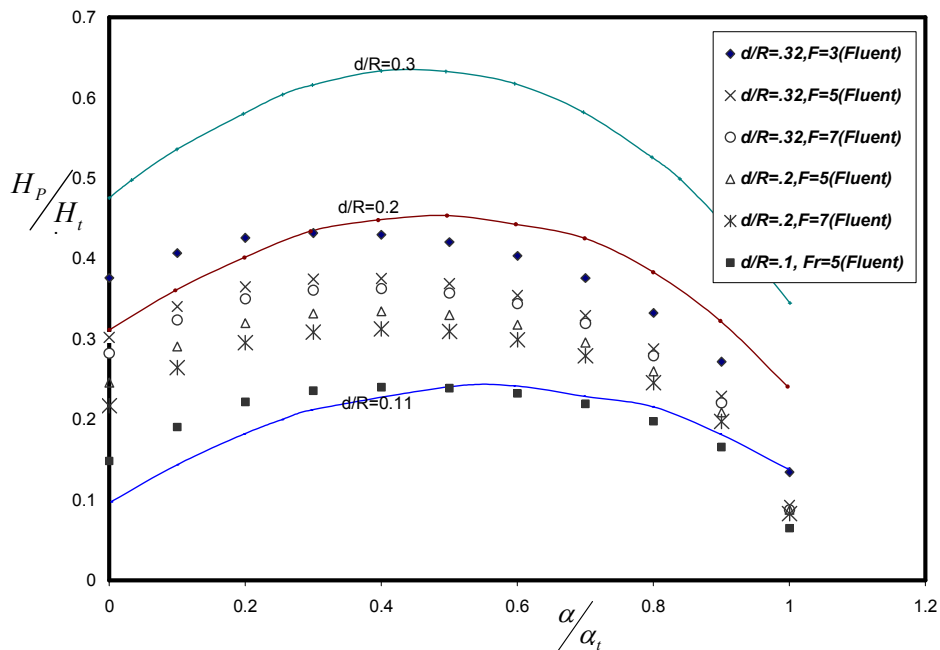


شکل ۹ شرایط مرزی و اولیه حاکم بر میدان جریان

در شکل ۱۰ بلندای فشار پیزومتری بر روی جام پرتابی که مطابق منحنی طراحی COE نسبت به بلندای فشار کل $(H_t = d + \frac{V^2}{2g} + Z)$ در ابتدای جام بی بعد شده، بر حسب زاویه چرخش بی بعد شده (نسبت زاویه چرخش از ابتدای جام، به کل زاویه چرخش جام $\frac{\alpha}{\alpha_t}$) برای $d/R=0.18$ و $Fr=6.5$ (در محل ورود جریان به جام) از ابتدای جام پرتابی رسم و با دو نمودار از منحنی طراحی مقایسه شده است.



شکل ۱۰ توزیع فشار روی جام پرتابی و مقایسه با منحنی طراحی (COE, 1990)



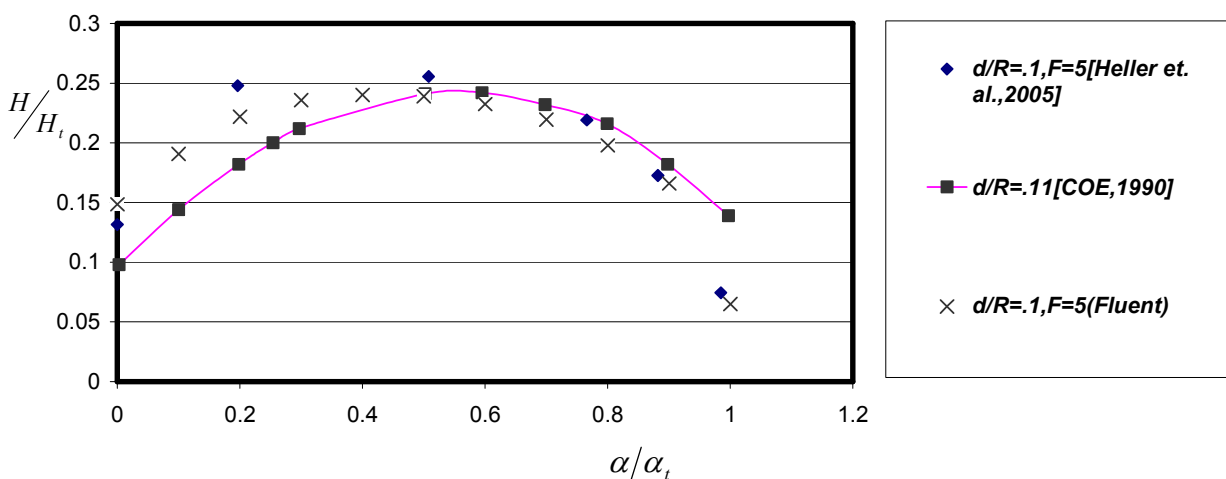
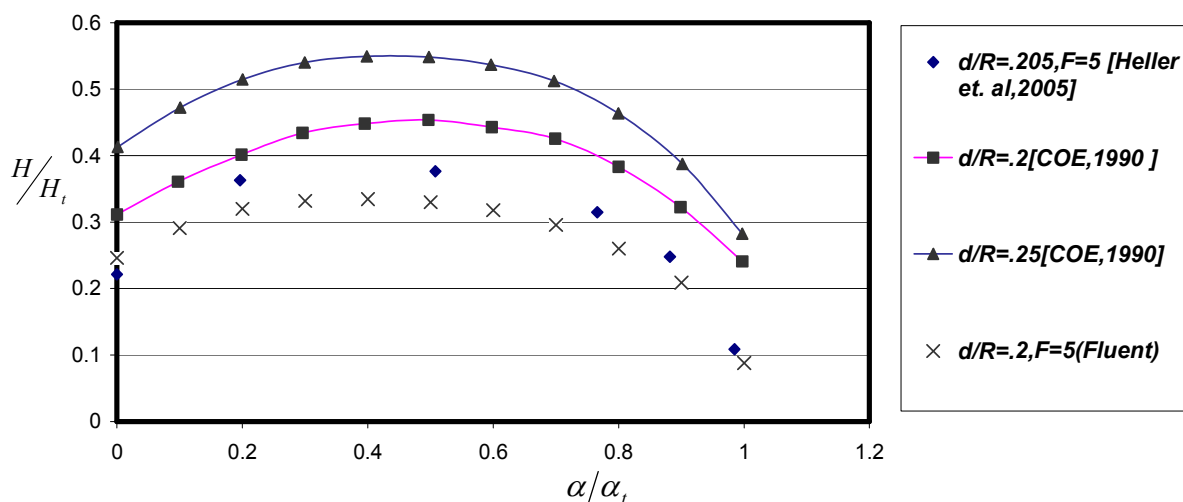
شکل ۱۱ مقایسه تغییرات توزیع فشار با تغییر عدد فرود، با توجه به منحنی طراحی (خطوط پر)

بیشتر از اختلاف نتایج محاسبات با هندسه جام پرتابی سد Hartwell است. برای بررسی این موضوع در شکل ۱۲ نتایج معادله تجربی (Heller et al. (2005) به ترتیب

همان گونه که از مقایسه شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشخص است، اختلاف نتایج محاسبات با هندسه جام پرتابی آزمایشگاهی (Heller et al. (2005) - در مقایسه با منحنی COE -

می‌رسد. نتایج حاصل از فلونت نیز در شکل ۱۲ آورده شده که نسبت به منحنی‌های طراحی، تطابق خوبی را با معادلات تجربی Heller et al. (2005) نشان می‌دهد. با کاهش d/R (جام با خم کمتر) تطابق منحنی‌های طراحی COE با معادله تجربی Heller et al. (2005) و نتایج فلونت بیشتر می‌شود.

برای $Fr=5$ و $d/R=0.1$ و $d/R=0.205$ با نمودارهای حاصل از منحنی طراحی COE مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، معادله تجربی Heller et al. (2005) - که بر اساس ۹۰ دسته نتایج آزمایشگاهی استوار است - نیز بر منحنی‌های COE منطبق نبوده و خطای حاصل در بعضی نقاط به ۲۵ درصد



شکل ۱۲ مقایسه تغییرات توزیع فشار حاصل از معادله (۱۴) با تغییر عدد فرود، با منحنی طراحی COE (Corps of Engineering, 1990)

۳-۴- بررسی دقت نتایج روابط تحلیلی برای حداکثر فشار بر روی جام پرتابی

با فرض جریان به صورت گرداب آزاد روی جام پرتابی می‌توان حداکثر فشار را با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد (Chow, V.T., 1959):

$$P = \left(\frac{V_a^2}{Rg} + 1 \right) \gamma \cdot d \quad (7)$$

رابطه فوق در استاندارد هند (Indian Standard, 1982) برای $R > 4d$ دارای دقت مناسب تشخیص داده شده است.

خطای این رابطه نسبت به نتایج حاصل از مدل عددی در جدول ۱ آورده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود خطای مزبور با افزایش R/d ، کاهش می‌یابد. برای $R/d=3$ این اختلاف به حدود ۸۰ درصد و برای $R/d=5$ به ۳۵ درصد می‌رسد. برای $R/d=10$ ، روابط تقریبی نتایج نسبتاً خوبی را ارائه کرده‌اند. برای همین R/d ، خطا برای $Fr=5$ کمتر از ۸ درصد و برای $Fr=3$ حدود ۴- درصد است. در R/d یکسان، با افزایش عدد فرود، خطا نیز افزایش یافته است. لذا می‌توان گفت که استفاده از روابط تقریبی فقط برای R/d بزرگ‌تر از ۸ تا ۱۰ و عدد فرود کمتر از ۵ قابل قبول است.

از آنجا که در این روابط اثر جاذبه و لزجت در نظر گرفته نشده، باید با کاهش اثر جاذبه (افزایش عدد فرود) مقدار خطا کاهش یابد؛ اما همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، با

افزایش عدد فرود، خطای روابط افزایش یافته است. به این ترتیب افزایش خطا با افزایش عدد فرود، ناشی از اثر ثقل و لزجت نیست و می‌توان نتیجه گرفت که الگوی جریان و تغییر مسیر خطوط جریان، اثر مهمتری بر نتایج دارد. در روشهای تحلیلی ذکر شده، خطوط جریان به صورت موازی فرض شده است. روشن است که هرچه سرعت جریان بیشتر باشد، تطبیق خطوط جریان با تغییر مسیر مرزها کمتر خواهد بود. به بیان دیگر در سرعتهای بالاتر، خطوط جریان با بستر یعنی جام پرتابی تطابق نداشته و با آن موازی نیستند. روشن است که هرچه R/d کوچکتر (تغییر سریعتر بستر) و عدد فرود بیشتر باشد، تطابق خطوط جریان با بستر کمتر و لذا خطای روشهای تحلیلی بیشتر خواهد بود.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج کلی حاصل از این پژوهش را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

۱- نتایج به‌دست‌آمده از پروفیل سطح آزاد و توزیع فشار در پرتاب‌کننده جامی توسط مدل عددی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی (Juon et al. (2000) و Heller et al. (2005)) دقت مناسبی را نشان می‌دهند.

جدول ۱ مقایسه نتایج فشار حداکثر حاصل از فلونت با رابطه تحلیلی

R/d	Fr	فشار (Pa)		درصد خطای رابطه ۱۱ با توجه به مدل عددی
		مدل عددی	رابطه ۸	
۳/۰۸	۳	۳۰۱۴/۲	۵۰۰۵/۸۳	۶۶/۱
۳/۰۸	۵	۶۴۷۹/۲	۱۱۶۳۵/۴	۷۹/۶
۵	۵	۳۵۴۰	۴۷۰۹/۷۸	۳۳
۵	۷	۶۲۶۰	۸۴۷۲/۸	۳۵
۱۰	۳	۷۷۷/۷۹	۷۴۵/۸۴	-۴
۱۰	۵	۱۲۷۲/۵	۱۳۷۲/۰۹	۷/۸

۵- فهرست علائم

P	فشار
γ	وزن مخصوص آب
ρ	چگالی سیال
g_i	مؤلفه شتاب ثقل در جهت i
V	سرعت جریان ورودی به جام پرتابی
V_a	سرعت واقعی جریان ورودی
u_i	مؤلفه سرعت لحظه‌ای در جهت x_i
R	شعاع جام پرتابی
H	هد انرژی
H_t	کل هد در ابتدای جام
H_p	پارامتر نرمال شده فشار
h_p	هد فشار روی مرز
h_{PM}	ماکزیمم فشار در جام
h_{PT}	هد فشار دینامیک تنوری
P_M	ماکزیمم فشار
P_{Md}	فشار دینامیک
α	زاویه از ابتدای انحنای (درجه)
α_T	کل زاویه چرخش جام پرتابی (درجه)
β	زاویه مرکزی (زاویه چرخش) جام پرتابی
h_0	عمق جریان ورودی به جام پرتابی
d	عمق جریان ورودی به جام پرتابی
$(\frac{d}{R})$	انحنای نسبی جام
Fr	عدد فرود جریان
(F_0)	عدد فرود جریان ورودی به جام
X_p	طول نرمال شده
(x_{PM})	محل وقوع ماکزیمم فشار دینامیک نسبت
v	لزجت مولکولی
v_i	لزجت گردابه‌ای یا لزجت آشفتگی
κ	انرژی جنبشی آشفته
ε	نرخ استهلاك انرژی جنبشی آشفته
F	متغیر جزء حجم سیال در سلول محاسباتی (Volume of Fraction)

برای $R/d=3$ حداکثر اختلاف در محاسبه سطح آزاد ۱۰ درصد و در محاسبه فشار ۸ درصد و برای $R/d=5$ حداکثر اختلاف در محاسبه سطح آزاد ۵ درصد و در محاسبه فشار ۴ درصد است.

۲- منحنی‌های طراحی موجود، نتیجه اندازه‌گیری‌های صحرایی بوده و تأثیر عدد فرود بر نتایج در نظر گرفته نشده است، منحنی‌های طراحی Corps of Engineering (1990) اختلاف ۳۰ تا ۵۰ درصد را نسبت به نتایج تحقیقات انجام شده توسط Heller et al. (2005) نشان می‌دهد. محدود بودن نتایج حاصل از نمونه، خطاهای بیشتر در اندازه‌گیری‌های صحرایی و شرایط خاص در طبیعت - مانند هواگیری سطحی - می‌تواند دلایل این اختلاف باشد.

۳- نتایج حاصل از مدل عددی برای توزیع فشار و محل وقوع بیشینه فشار، تطابق خوبی با روابط تجربی ارائه شده توسط Heller et al. (2005) دارد.

۴- تاکنون روشهای عددی در پیش‌بینی فشارهای دینامیک در جام پرتابی به کار گرفته نشده بود. تحقیقات حاضر نشان می‌دهد که این روشها، قابلیت بالایی در تحلیل جریانهای سطح آزاد داشته و می‌تواند در طراحی جام‌های پرتابی استفاده می‌شود.

۵- روابط تحلیلی که با فرض جریان پتانسیل و گرداب آزاد ارائه شده، خطای بالایی دارند و برای R/d کمتر از ۸ تا ۱۰ قابل استفاده نبوده و خطای محاسباتی آنها با کاهش R/d به شدت افزایش می‌یابند. خطا برای $R/d=5$ بیش از ۳۰ درصد محاسبه شده و برای $R/d=3$ خطا - با افزایش عدد فرود- تا ۸۰ درصد افزایش یافته است. برای $R/d=10$ خطای محاسبه شده، برای عدد فرود ۳، برابر ۴ درصد و برای عدد فرود ۵، برابر ۷/۸ درصد است.

۶- منابع

- Engrg. Monograph 25, Bureau of Reclamation, U.S. Department of the Interior, Denver.
- Pirzadeh B. and Shamloo H. Numerical investigation of velocity field in dividing open-channel flow source, Proceedings of the 12th WSEAS International Conference on Applied Mathematics, 2007, Cairo, Egypt.
- Rhone T.J. and Peterka A.J. (1959). "Improved tunnel spillway flip buckets", J. Hydr. Div., ASCE, 85(12), pp. 53-76.
- Rodi W. (1980). Turbulence Models and their Application in Hydraulics-A State of the Art Review, IAHR, Delft, The Netherlands.
- Schlichting H. (1979). Boundary-Layer Theory, McGraw-Hill, New Yourk.
- Shuguang L. and Zhengxiang L. (1988). "Gravity-affected potential flows past spillway flip bucket", J. Hydraulic Engineering 114(4), pp. 409-428.
- Turan C., Carrica P. M., Lyons T., Hay D. and Weber L. (2008). Study of the free surface flow on an ogee-crested fish bypass, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 134, pp. 1172.
- Versteeg H.K., Malalasekara W. (1995). An Introduction to Computational Fluid Dynamics, The Finite Volume Method, Longman.
- Vischer D. L. and Hager W. H. (1995). Energy Dissipators, IAHR Hydr. Struct. Design Manual 9, Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- Wood, I.R. (1991). Air entrainment in Free Surface Flow, International Association for Hydraulic Research, Hydraulic Structure Design Manual 4, A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherland.
- Youngs D. L. (1982). Time-dependent multimaterial flow with large fluid distortion. In K. Morton and M. Baines, Editors, Numerical Methods for Fluid Dynamics, pp. 273-285. Academic Press.
- Balloffet A. (1961). "Pressure on spillway flip buckets", J. Hydr. Div., ASCE, 87(5), pp. 87-98.
- Chen T.-C., and Yu Y.-S. (1965). "Pressure distribution on spillway flip buckets", J. Hydr. Div., ASCE, 91(2), pp. 51-63.
- Chow V.T. (1959). Open Channel Hydraulics, McGraw-Hill Book Co. Inc. New York.
- Corps of Engineering (1990). Hydraulic Design Criteria, US Army Waterways Experimental Station, Vicksburg, Mississippi, USA.
- Dargahi B. Experimental study and 3D numerical simulations for a free-overflow spillway, Journal of Hydraulic Engineering, 2006.
- Fluent Inc. (1993). FLUENT User's Guide, Fluent, New Hampshire.
- Heller V., Hager W.H. and Minor H. (2005). "Ski jump hydraulics", J. Hydr. Eng., ASCE, May, pp. 347-355.
- Indian Standard (1982). "Criteria for hydraulic design of bucket type dissipater".
- Juon R. and Hager W.H. (2000). "Flip bucket without and with deflectors", J. Hydr. Eng., ASCE, Nov., pp. 837-845.
- Lenau C. W. and Cassidy J. J. (1969). "Flow through spillway flip bucket", J. Hydr. Div., ASCE, 95(5), pp. 633-648.
- Park J., Desam P. and Ligrani P. Numerical predictions of flow structure above a dimpled surface in a channel, Numerical Heat Transfer Part A: Applications, January 2004, Vol. 45, No. 1(20), pp. 1-20.
- Patankar S.V. (1980). Numerical heat transfer and fluid flow, Hemisphere Publishing Corporation, Taylor & Francis Group, New York.
- Peterka A. J. (1983). Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators, 7th Ed.,