

تحلیل عددی میدان جریان در پرتاب کننده های جامی مرکب

امید امین الرعایایی یمینی^{۱*}، محمدرضا کاویانپور^۲

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران آب - هیدرولیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- دانشیار گروه مهندسی آب- هیدرولیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

O.aminoroaya@mail.kntu.ac.ir

ارسال: آبان ماه ۹۵ پذیرش: دی ماه ۹۵

خلاصه

پرتاب کننده های جامی اغلب در انتهای سرریزهای شوت به منظور استهلاك انرژی و هدایت جریان به حوضچه های استغراق و به ویژه در سدهای بلند مورد استفاده قرار می گیرند. جام های مرکب نیز طرح خاصی از این پرتاب کننده ها می باشند که دارای یک شیب عرضی در بستر جام هستند و با انحنايي در پلان جام ترکیب می شوند. در این مطالعه به منظور بررسی عددی میدان جریان بر روی پرتاب کننده های جامی مرکب از مدل عددی Flow-3D (ver.9/3) استفاده شده است. برای مدل سازی مدل هیدرولیکی سرریز آزاد در مدل عددی Flow-3D، کل بدنه صلب سرریز به صورت سه بعدی در نرم افزار SolidWorks 2011 ساخته شد و با فرمت *.stl به مدل عددی Flow-3D معرفی گردید. میدان جریان با دبی های مختلف سیلابی در محدوده ای اعداد فرود ۳/۵ تا ۷/۵ در مدل عددی Flow-3D با نتایج آزمایشگاهی مدل مشابه مورد بررسی قرار می گیرد. در مدل عددی مورد مطالعه پس از بررسی چند مدل، زمان مناسب برای استخراج نتایج از مدل معادل ۷۰ ثانیه مد نظر قرار گرفت. برای حصول بهترین پاسخ از مدل عددی Flow-3D و مقایسه گزینه های ممکن، شرایط مرزی و اولیه مناسب و نیز حساسیت سنجی مدل نسبت به پارامترهای گوناگون موثر در مدل سازی، آزمون های گوناگون صورت گرفت. حساسیت مدل های عددی به شبکه بندی و انفعال میدان حل همواره یکی از مسائل مهم در مدل های عددی بوده است. در این مطالعه شبکه بندی های مختلف به صورت تک بلوکی و دو بلوکی در آزمون های مختلف مورد بررسی قرار گرفت و بهترین شبکه بندی برای آزمون های بعدی انتخاب شده است. در مجموع با تحلیل و بررسی مدل های شبیه سازی شده توسط مدل عددی Flow-3D و مقایسه نتایج آنها با نتایج مدل آزمایشگاهی به ازای هر سه پارامتر هیدرولیکی توزیع فشار بر روی بستر، سرعت و عمق متوسط جریان و با توجه به مدت زمان شبیه سازی ها و دقت نتایج حاصل از آنها، می توان مناسب ترین و کالبره ترین مدل جهت شبیه سازی پرتاب کننده های جامی مرکب دانست. دستیابی به چنین مدل کالبره شده ای می تواند به منظور بررسی تغییرات پارامترهای هندسی جام های مرکب (انحنای جام، شیب عرضی بستر، ارتفاع لبه ی جام و...) در تحقیقات آتی مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: پرتاب کننده های جامی مرکب، میدان جریان، توزیع فشار، مدل عددی Flow-3D

۱. مقدمه

در سازه های تخلیه سیلاب سدهای بزرگ لزوم استفاده از سیستم های استهلاك انرژی جریان بیش از پیش مورد توجه قرار می گیرد. در سال های اخیر با افزایش روند روبه رشد احداث سدهای بلند و بالا رفتن استاندارد ایمنی سدها، علاقه عمومی مهندسين هیدرولیک نسبت به طراحی یک سیستم استهلاك انرژی اقتصادی و مطمئن، افزایش یافته است. مسائل مختلف ایجاد شده در طراحی مستهلك کننده های انرژی موجب شده تا یک طرح اقتصادی و نسبتاً مطمئن و سازگار با شرایط موجود مورد توجه قرار گیرد. پرتاب کننده های جامی مرکب از جمله پرتاب کننده های خاص بوده که دارای یک انحنای محوری در کنار انحنای طولی می باشند. این ویژگی، جریان

حاکم بر این سازه‌ها را از ویژگی خاص برخوردار نموده و جریان را به دلیل دارا بودن دو انحنای طولی و عرضی با پیچیدگی بیشتر همراه می‌سازد. کاربرد این سازه در شرایط و محدودیت‌های خاص توپوگرافی و لزوم دور نمودن جت برخوردی به پائین دست به یکی از جهات دور از تکیه گاه چپ یا راست، حائز اهمیت می‌سازد. به عنوان مثال در سد گنوند علیا، راستای قرارگیری سرریز روی سد با محدودیت خاص همراه بوده و لذا جت خروجی از پرتاب کننده جامی انتهائی با برخورد به تکیه گاه چپ ایمنی سازه سد را مختل می‌نمود. بنابراین لزوم انحراف جت با تعبیه قوس محوری متمایل به سمت راست سد بر روی پرتاب کننده اجتناب ناپذیر می‌باشد. این شرایط بر عملکرد هیدرولیکی جریان روی پرتاب کننده‌ها و لزوم توجه به آن تاکید نموده و شروعی بر این تحقیق بود که در ادامه، محدودیت اطلاعات و تحقیقات انجام گرفته بر روی این سازه‌ها با بررسی‌های کتابخانه‌ای مشخص گردید و تحقیق سامان یافته حاضر را شکل داد.

برای طراحی پرتاب کننده‌های جامی معیارهای هیدرولیکی وجود دارند که اهم آنها عبارتند از: فشار بر روی سطح جام و دیواره-های کناری، ویژگی‌های مسیر حرکت پرتابه، اثرات استغراق لبه جام در پایاب (جام‌های مستغرق) و فرسایش و آبرستگی بستر رودخانه (Khatsuria, 2005). تعیین فشار بر روی سطح جام و دیواره‌های کناری و همچنین ویژگی‌های مسیر حرکت جت پرتابی از مهم‌ترین پارامترهایی هستند که به منظور طراحی جام مد نظر قرار می‌گیرند. بعلاوه تعیین مشخصات مطلوب هندسی از لحاظ اقتصادی و بهینه بودن طرح و شکل جام نیز می‌تواند کمک کند. سایر مشخصات هیدرولیکی همانند اثرات استغراق لبه جام در پایاب و همچنین فرسایش و آبرستگی بستر رودخانه در این مطالعه مورد بررسی قرار نگرفته و برای مطالعه بیشتر به منابع موجود در این زمینه مراجعه گردد.

Parvishi et al. (2008) پژوهشی در مورد زاویه بهینه پرتابه روی پرتاب کننده‌های جامی شکل انتهای سرریز ارائه نمودند. تاثیر پایین این زاویه روی آبرستگی دست سرریز بوده که در نهایت زاویه ۴۵ درجه به عنوان زاویه بهینه گزارش شد. امیر ارضلانی و همکاران (۱۳۸۷) توسط مدل عددی Flow-3D الگوی جریان روی پرتاب کننده را مدل نموده و طرح خود را برای آبرستگی بعد از پرتاب کننده جامی مورد شبیه سازی عددی قرار دادند. در این طرح برای مدل کردن آشفتگی جریان از مدل $k-\epsilon$ استاندارد استفاده شد. اکبری و همکاران (۱۳۹۰) با استفاده از مدل عددی Flow-3D و مدل آشفتگی RNG جریان بر روی پرتاب کننده‌های جامی را مدل نمودند. نتایج آنها نشان داد که روش‌های عددی با دقت مناسبی می‌تواند جریان بر روی پرتاب کننده‌های جامی را شبیه سازی نماید به طوری که بیشترین خطا حدود ۱۵/۷٪ در سرعت و حدود ۶/۷٪ خطا برای فشار می‌باشد. بیشترین درصد خطای میانگین نیز برای فشار و سرعت در حدود ۷/۶٪ و ۴/۸۳٪ می‌باشد. میناتور و همکاران (۱۳۹۰) با استفاده از مدل عددی Fluent مطالعه عددی مستهلک کننده‌های پرش اسکی را با مدل‌های چند فازی مختلف از قبیل مدل VOF، Mixture و مدل آشفتگی استاندارد $k-\epsilon$ شبیه سازی نمودند. نتایج بدست آمده از روش VOF با نتایج آزمایشگاهی تطابق بهتری داشت. همچنین زمان اجرای روش VOF در مقایسه با مدل Mixture کمتر می‌باشد.

۲. شبیه سازی مدل عددی و معادلات حاکم بر جریان

مدل عددی FLOW-3D یک مدل مناسب برای مسائل پیچیده سیالات می‌باشد، که دارای بازه کاربرد وسیعی می‌باشد. این برنامه برای جریان‌های سه بعدی غیر ماندگار که دارای سطح آزاد و هندسه پیچیده هستند کاربرد دارد. در این نرم‌افزار از روش حجم محدود در شبکه‌بندی منظم مستطیلی استفاده می‌شود. به لحاظ استفاده از روش حجم محدود در یک شبکه منظم، شکل معادلات گسسته شده مورد استفاده نظیر معادلات گسسته شده در روش تفاضل محدود می‌باشند. بر این اساس FLOW-3D از روش‌های دقت مرتبه اول و دوم در حل معادلات بهره می‌برد. همچنین این مدل عددی از پنج مدل آشفتگی نظیر مدل‌های $k-\epsilon$ ، RNG و ... استفاده می‌کند. در مدل عددی FLOW-3D از دو تکنیک عددی برای شبیه‌سازی هندسی استفاده شده است: روش حجم سیال^۱ (VOF): این روش برای نشان دادن رفتار سیال در سطح آزاد مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش کسر مساحت - حجم مانع^۲ (FAVOR): برای شبیه‌سازی سطوح و احجام صلب مثل مرزهای هندسی کاربرد دارد. بنابراین معادلات اساسی مومتم (RANS) و پیوستگی برای یک سیال غیرقابل تراکم که شامل متغیرهای FAVOR نیز می‌باشد به صورت زیر بیان می‌شود:

¹ Volume of Fluid

² Fractional Area-Volume Obstacle Representation

معادله پیوستگی: معادله پیوستگی جریان از قانون بقای جرم و با نوشتن رابطه تعادل برای یک المان سیال به دست می آید. معادله عمومی پیوستگی به شکل زیر است:

$$V_f \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) = 0 \quad (1)$$

که در آن V_f کسر حجم باز به جریان، ρ چگالی سیال است. مولفه های سرعت (u, v, w) در جهات (x, y, z) می باشند. A_x کسر سطح باز در جهت x است، A_y و A_z به طور مشابه کسر سطح در جهات y و z می باشند.

معادلات اندازه حرکت: معادلات حرکت سیال با مولفه های سرعت (u, v, w) در سه جهت مختصات، یعنی معادلات ناویر-استوکس به شکل زیر هستند:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left(u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left(u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left(u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \end{aligned} \quad (2)$$

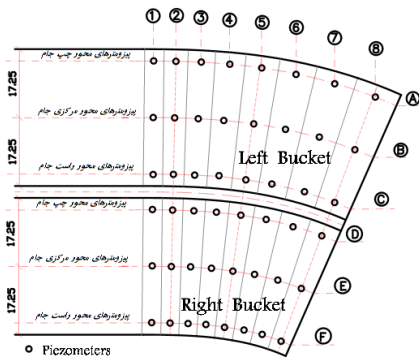
در این معادلات (G_x, G_y, G_z) شتاب های جرم، (f_x, f_y, f_z) شتاب های لزجت است. شتاب های لزجی به شکل معادلات زیر هستند:

$$\begin{aligned} \rho V_f f_x &= \omega_{sx} - \left\{ \frac{\partial}{\partial x}(A_x \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(A_y \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial z}(A_z \tau_{xz}) \right\} & \tau_{xx} &= -2\mu \left\{ \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} & \tau_{xy} &= -\mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial x} \right\} \\ \rho V_f f_y &= \omega_{sy} - \left\{ \frac{\partial}{\partial x}(A_x \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(A_y \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z}(A_z \tau_{yz}) \right\} & \tau_{yy} &= -2\mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} & \tau_{xz} &= -\mu \left\{ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right\} \\ \rho V_f f_z &= \omega_{sz} - \left\{ \frac{\partial}{\partial x}(A_x \tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y}(A_y \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z}(A_z \tau_{zz}) \right\} & \tau_{zz} &= -2\mu \left\{ \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} & \tau_{yz} &= -\mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

در معادلات فوق جملات ω_{sx} ، ω_{sy} و ω_{sz} بیانگر تنش های برشی دیواره ها بوده و μ لزجت دینامیکی می باشد. اگر این جملات حذف شوند، دیگر تنش برشی دیواره ای نخواهیم داشت زیرا جملات باقیمانده شامل کسر مساحت های جریان (A_x, A_y, A_z) می شوند که در آن ها دیواره ها در نظر گرفته نشده اند. تنش های روی دیواره ها به وسیله فرض سرعت مماسی صفر در قسمتی از سطح محدود به جریان شبیه سازی می شوند. شبکه و مرزهای موانع متحرک جزء موارد استثنا هستند زیرا در آن ها سرعت مماسی غیر صفر است.

۳. مشخصات مدل هیدرولیکی و مدل عددی

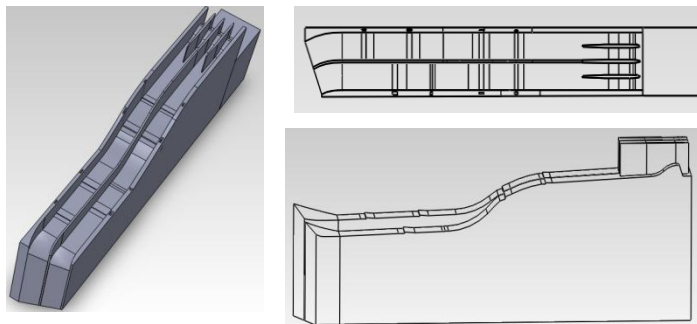
این مطالعه بر روی دو مدل هیدرولیکی مختلف از پرتاب کننده های جامی مرکب که در سرریز سد گتوند ساخته شده است انجام می گیرد. مدل هیدرولیکی سرریز سد گتوند در موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو طراحی و ساخته شده است که پرتاب کننده های جامی مرکب، در انتهای مجرای تندآب سرریز قرار دارند. کانال های ورودی منتهی به این پرتاب کننده ها دارای مقاطع مستطیلی شکل و تراز بستر مجرای سمت راست نسبت به تراز مجرای سمت چپ پایین تر می باشد. شیب کانال های ورودی به این پرتاب کننده ها حدود ۳/۵٪ و طول افقی این کانال تقریباً ۲ متر می باشد. شیب عرضی بستر جام در این پرتاب کننده ها در مقطع عرضی برای هر کدام از جام متفاوت است و هر دو جام دارای یک انحنای محوری در پلان می باشند که محور پرتاب کننده ها را تحت زاویه ۲۴° درجه به سمت راست تغییر می دهد. تندآب های منتهی به پرتاب کننده ها دارای دو مجرای به عرض خالص ۳۴/۵ سانتی متر می باشد که پس از یک تندآب با شیب زیاد قرار دارند. تندآب ها، کانال ورودی، پرتاب کننده های جامی مرکب و دیواره های جانبی از جنس ورق پلکسی گلاس شفاف ساخته و در مدل نصب گردیده اند. ارتفاع دیواره های جانبی پرتاب کننده ها و کانال ورودی به ارتفاع ۱۲ سانتی متر در نظر گرفته شده اند. شکل (۱) در سمت چپ مشخصات هندسی جام ها و در سمت راست نیز ساختار مدل هیدرولیکی پرتاب کننده های جامی مرکب را نمایش می دهد.



شکل ۱- مدل هیدرولیکی پرتاب کننده‌های جامی مرکب (شکل سمت راست) به همراه مشخصات هندسی آنها (شکل سمت چپ)

همانطور که در شکل (۱) نیز نمایان است شیب عرضی بستر جام‌ها در محورهای کنار جداره و در محور مرکزی، در هر کدام از جام‌ها متفاوت می‌باشد و هندسه جام‌های چپ و راست بایکدیگر متفاوت هستند. برداشت پارامترهای هیدرولیکی مورد نیاز در دبی‌های مختلف و قابل کنترل انجام گرفته است و لذا سرعت‌های میانگین و عمق جریان (h_0) در محدوده‌ای از اعداد فرود به صورت مستقل تغییر می‌یابد. محدوده‌ی تغییرات اعداد فرود به ازای دبی‌های ۲۰ تا ۱۷۰ (Lit/s) برابر ۳/۵ تا ۷/۵ می‌باشد که به ازای این اعداد فرود پارامترهای میدان جریان در بستر پرتاب کننده‌های جامی برداشت گردید. در بستر هر دو پرتاب کننده در دو موقعیت عرضی نزدیک دیواره‌های جانبی و در وسط جام به صورت راستای طولی قبل از ورود به جام تا لبه جام پیزومترهای برداشت فشار نصب گردیده‌اند.

برای مدل سازی مدل هیدرولیکی سرریز آزاد در مدل عددی Flow-3D، کل بدنه صلب سرریز به صورت سه بعدی (شامل بخشی از مخزن، سرریز، پایه‌های دریچه، تندآب، سیستم‌های هوادهی بر روی تندآب و نیز پرتاب کننده‌های جامی مرکب) در نرم افزار SolidWorks 2011 ساخته شد و با فرمت *.stl به مدل عددی Flow-3D معرفی گردید. دلیل استفاده از نرم افزار SolidWorks 2011 پیچیدگی هندسی پرتاب کننده‌های جامی مرکب می‌باشد. همانگونه که در بخش‌های قبلی نیز ذکر شد جام‌های مرکب دارای یک انحنا محوری می‌باشند که با یک شیب عرضی در بستر جام ترکیب می‌شوند از این-رو ساخت کل بدنه صلب جام‌های مرکب توسط نرم افزارهای ساده ترسیم اشکال سه بعدی به سادگی امکان پذیر نیست و مستلزم استفاده از یک نرم افزار پیشرفته ترسیم اشکال سه بعدی همانند نرم افزار SolidWorks 2011 می‌باشد. ابعاد مدل سه بعدی ساخته شده دقیقاً مطابق با مدل هیدرولیکی موجود در آزمایشگاه می‌باشد. شکل (۲) نماهای مختلفی از مدل هیدرولیکی را در محیط SolidWorks 2011 نمایش می‌دهد.



شکل ۲- نمایی از مدل هیدرولیکی شبیه سازی شده توسط SolidWorks 2011

در تمامی شبیه سازی‌های صورت گرفته در این تحقیق میدان جریان سه بعدی به وسیله مدل آشفتگی RNG حل شده است. دلیل استفاده از این مدل آشفتگی را می‌توان در ویژگی‌های و مزیت آن نسبت به مدل‌هایی چون k-ε دانست. این مدل به

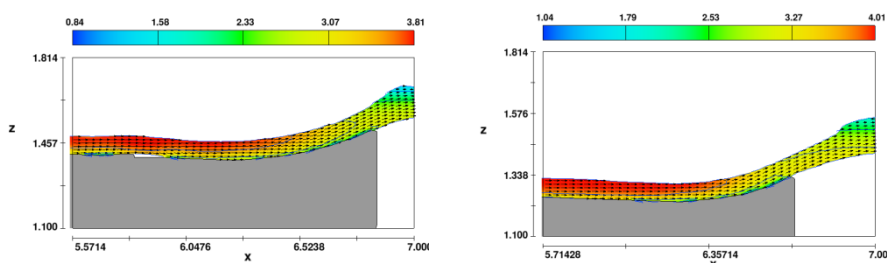
واسطه داشتن ترم اضافی در معادله ۸ برای تحلیل جریانات سریعاً کرنش یافته و جریانات بر روی سطوح با انحناهای زیاد بهبود یافته است و این مدل در شبیه سازی جریانات گذرا توان بالایی دارد (Yakhot et al., 1992). همچنین به استناد مقایسه‌ای که صباغ یزدی و همکاران (۱۳۸۷) بین مدل‌های آشفتگی با استفاده از مدل عددی Flow-3D انجام داده بود و مدل آشفتگی RNG نتایج دقیق‌تری نسبت به سایر مدل‌های آشفتگی داشتند، از مدل آشفتگی RNG استفاده گردید. سیال غیر لزج، تراکم ناپذیر و ورود هوا با چگالی $1/2 \text{ kg/m}^3$ و ضریب تنش برشی $0/073$ در نظر گرفته شد.

اولین گام در یک مدل عددی کالیبره کردن مدل می‌باشد. بدین معنی که تاثیرات عوامل خارجی را به حداقل رسانده و شرایط مدل را به شرایط واقعی نزدیک‌تر کرد. در این مدل عددی زمان مناسب برای استخراج نتایج ۷۰ ثانیه مد نظر قرار گرفت. شرایط مختلف مرزبندی به ازای مناسب‌ترین طول مخزن آب پشت سرریز به طول ۱ متر در آزمون‌های مختلف بررسی شد. در آزمون‌ها، شرایط مختلف مرزبندی شبکه سلول محاسباتی به صورت مرز ورودی با حالات Specified pressure و دبی- عمق جریان و.....، مرز خروجی Out flow و دیواره‌های جانبی شبکه سلول‌های محاسباتی در حالت wall و symmetry، کف و سقف شبکه سلول‌های محاسباتی به ترتیب، wall و symmetry در نظر گرفته شد.

برای بررسی خطای نتایج مدل شبیه سازی شده با داده‌های آزمایشگاهی ۸ آزمون متنوع به ازای سه دبی ۳۰، ۱۰۰ و ۱۷۰ (Lit/s) انجام گردید. در این آزمون‌ها از مدل کامل سرریز شامل بدنه، پایه‌های جدا کننده درپچه‌ها و دیواره‌های جانبی سرریز با داکت هوا رسان جهت شبیه‌سازی استفاده گردید تا اختلاف اجزای گوناگون مدل، نتایج پارامترهای هیدرولیکی مورد سنجش را تحت تاثیر قرار ندهد. به منظور استخراج دقیق پارامترهای مختلف مورد بررسی در محل‌های مورد نظر از نرم افزار Tecplot 360 2009 استفاده گردید. در آزمون نهایی به منظور افزایش دقت حل شبیه سازی عددی، شبکه بندی با دو بلوک معرفی گردید. بر این اساس بلوک اول که شامل ناحیه مخزن و تندآب سرریز می‌باشد دارای تعداد کل ۳۶۳۰۰۰ سلول محاسباتی و حداقل ابعاد سلول در این بلوک $2 \times 1/5 \times 4/5 \text{ cm}$ می‌باشد. بلوک دوم که شامل ناحیه پرتاب کننده‌های جامی مرکب می‌باشد نیز دارای تعداد کل ۸۶۰۰۰۰ سلول و حداقل ابعاد سلول در این بلوک $1/3 \times 1 \times 2 \text{ cm}$ می‌باشد. تعداد کل سلول‌های محاسباتی مدل شبیه سازی در این آزمون برابر ۱۲۲۳۰۰۰ سلول می‌باشد.

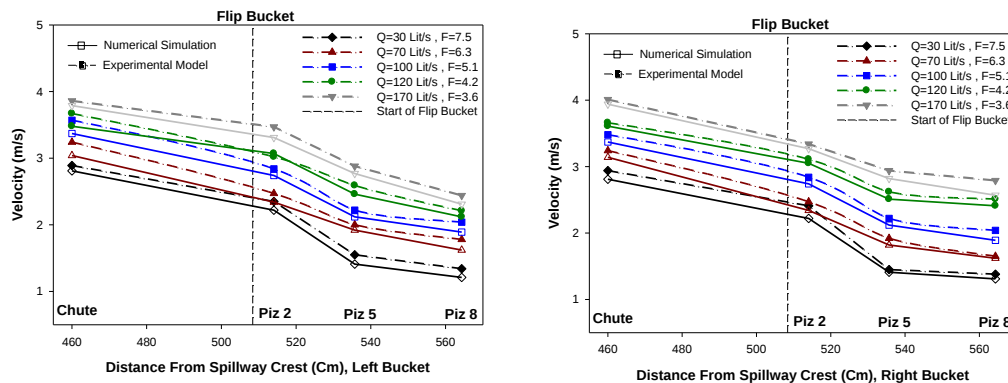
۴. بررسی نتایج شبیه سازی عددی

آزمون نهایی با شرایط مذکور بهترین نتایج ممکن را برای مدل‌سازی انجام شده، ارائه می‌دهد و بر همین اساس نتایج خروجی این آزمون در ادامه برای شرایط مختلف جریان ورودی مورد شرح و بررسی قرار می‌گیرد. نمایی طولی از تغییرات سرعت جریان (Velocity-X) در راستای محور تندآب را به همراه بردارهای سرعت در شکل (۳) نشان داده شده است. این تغییرات سرعت در راستای طولی پرتاب کننده‌ها برای هر دو جام چپ و راست برای دبی ۱۷۰ Lit/s استخراج شده است. در این شکل‌ها تغییرات طولی سرعت برای محورهای مرکزی جام‌های مرکب ارائه شده است.



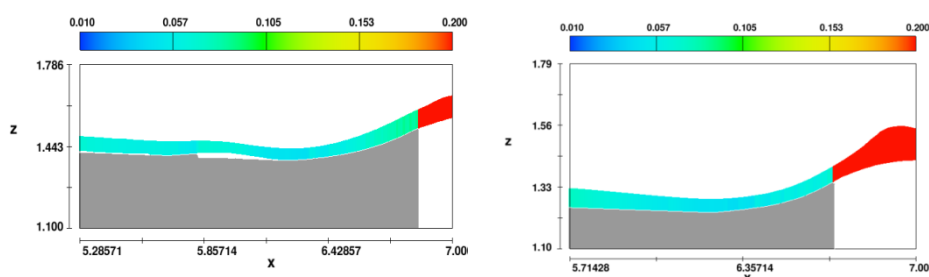
شکل ۳- پروفیل تغییرات طولی سرعت برای محور مرکزی جام‌های چپ (شکل سمت چپ) و راست (شکل سمت راست)

به منظور بررسی دقیق تغییرات سرعت، نتایج مدل سازی عددی جریان در دبی‌های مختلف و در مقاطع مشخص سرعت جریان استخراج گردید. سرعت جریان بر روی بستر کانال قبل از جام، در محل ورود به جام، قعر جام و در لبه جام در پیژومترهای مقطع ۲، ۵ و ۸ بر طبق شکل (۱) و در راستای طولی محور مرکزی بر روی دو جام با دبی‌های مختلف جام برداشت گردید. نمودارهای تغییرات سرعت جریان به ازای دبی‌های مختلف و در محل‌های مذکور مطابق شکل (۴) می‌باشند. نتایج آزمایشگاهی از تحقیقات انجام شده توسط امین الرعاييی یمنی و کاویانپور (۱۳۹۰) استخراج شده است. در این نمودارها محور X فاصله افقی نقاط اندازه گیری و محور قائم مقادیر سرعت جریان را نمایش می‌دهد.



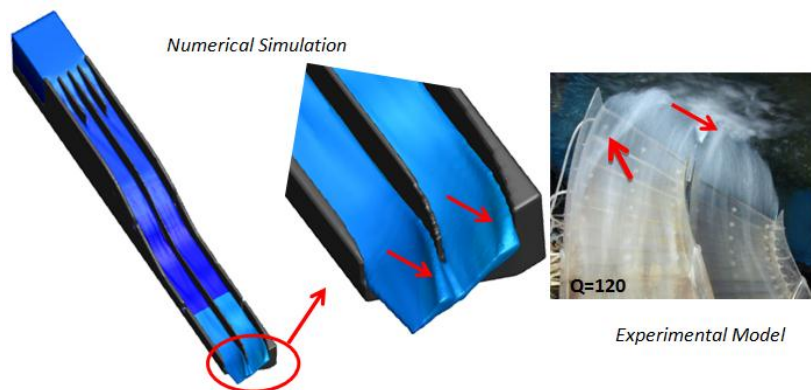
شکل ۴- تغییرات عددی و آزمایشگاهی سرعت در محور مرکزی جام‌های چپ و راست

با توجه به نتایج مدل‌های عددی و آزمایشگاهی ملاحظه می‌شود که سرعت جریان در محور چپ و مرکزی جام‌ها پس از ورود جریان به داخل جام‌ها (Piz 2) به شدت کاهش می‌یابد. ولی در محور راست جام‌ها با توجه به اینکه ارتفاع لبه جام‌ها در این محور کمتر می‌باشد شدت افت سرعت جریان کمتر می‌باشد. بر اساس نتایج مدل عددی مشاهده می‌شود که خطای شبیه سازی سرعت جریان در مقطع قبل از ورود جریان به داخل جام‌ها ناچیز حداکثر برابر ۰.۶٪ به ازای دبی ۳۰ Lit/s در محور سمت راست جام چپ می‌باشد. بر روی بستر جام‌ها نیز حداکثر خطای شبیه سازی به ازای دبی ۱۰۰ Lit/s در محور راست جام سمت راست (Piz 8) به میزان ۱.۱٪ می‌باشد. همچنین در محور چپ جام سمت چپ نیز به ازای دبی ۱۷۰ Lit/s در مقطع ورودی جریان به داخل جام (Piz 2) خطای حداکثر شبیه‌سازی سرعت حدود ۰.۸٪ می‌باشد. نمودارهای تغییرات عمق متوسط جریان بر روی محور مرکزی هر دو پرتاب کننده‌های جامی مرکب در راستای طولی به ازای دبی ۱۲۰ Lit/s در شکل (۵) نمایش داده شده است.



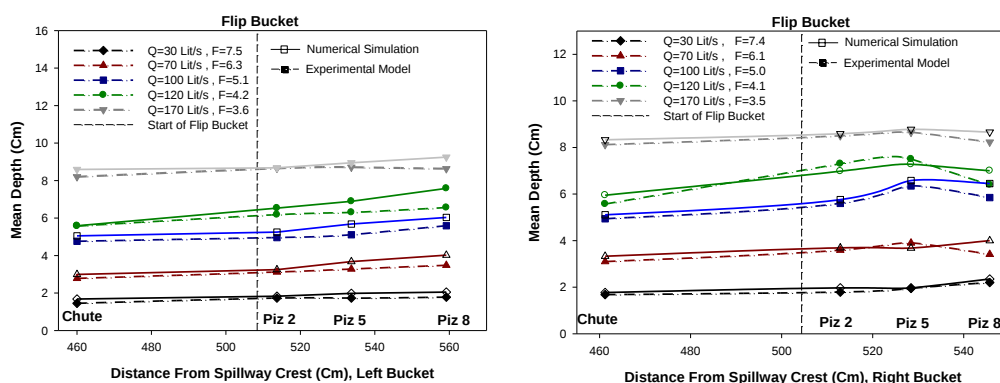
شکل ۵- پروفیل تغییرات طولی عمق جریان بر روی محور مرکزی جام‌های چپ (شکل سمت چپ) و راست (شکل سمت راست)

بر طبق نتایج شبیه سازی عمق جریان بر روی بستر پرتاب کننده‌های جامی برای محور چپ به علت بیشتر بودن ارتفاع لبه جام و شرایط هندسی خاص جام یک جریان برگشتی ایجاد می‌شود و عمق جریان در این محور از قعر جام به بعد افزایش می‌یابد. جریان برگشتی ایجاد شده به ازای دبی ۱۲۰ Lit/s در شکل (۶) برای مدل‌های آزمایشگاهی و عددی نمایش داده شده است.



شکل ۶- جریان برگشتی ایجاد شده در لبه جام‌های مرکب در مدل‌های آزمایشگاهی و عددی

نتایج حاصل از شبیه سازی عددی نشان می‌دهد که عمق جریان بر روی محور مرکزی پرتاب کننده‌های جامی تغییرات قابل ملاحظه ای ندارد و عمق جریان قبل از ورود به جام تا لبه جام تقریباً ثابت است. از طرف دیگر در محور راست پرتاب کننده‌های جامی مرکب و به خصوص در جام سمت راست عمق جریان در قعر جام اندکی افزایش می‌یابد. به منظور بررسی بیشتر تغییرات عمق جریان در دبی‌های مختلف، مقادیر عمق در مقاطع مشخص از مدل آزمایشگاهی با مدل سازی عددی مقایسه گردید. در همین راستا عمق جریان بر روی بستر کانال قبل از جام، در محل ورود به جام، قعر جام و در لبه جام در پیزومترهای مقطع ۲، ۵ و ۸ بر طبق شکل (۷) و در هر سه راستای طولی محور مرکزی بر روی دو جام با دبی‌های مختلف برداشت گردید. در این نمودارها محور X فاصله افقی نقاط اندازه گیری و محور قائم مقادیر عمق متوسط جریان را نمایش می‌دهد.

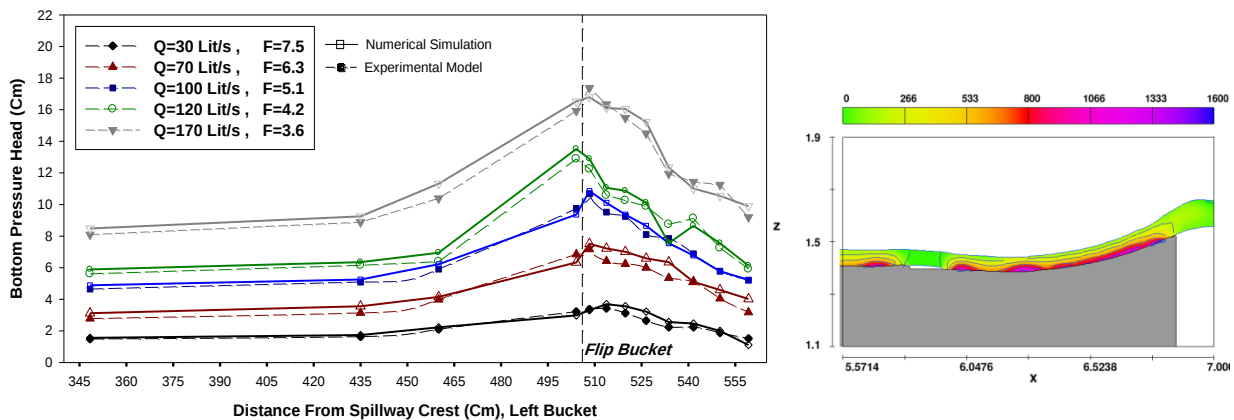


شکل ۷- تغییرات عددی و آزمایشگاهی عمق متوسط جریان در محور مرکزی جام‌های چپ و راست

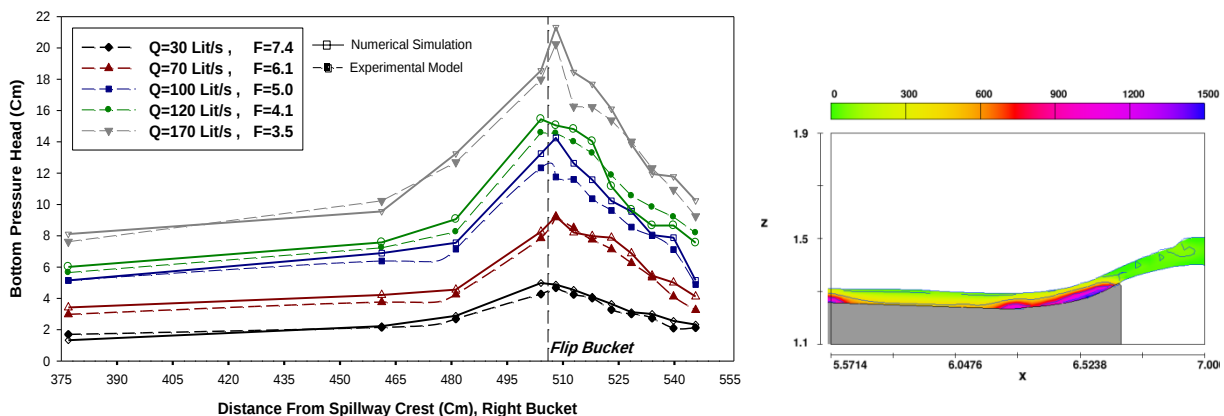
با توجه به آشفتگی شدید جریان به خصوص در دبی‌های بیشتر از ۱۰۰ Lit/s در محور چپ پرتاب کننده‌های جامی مرکب و به سبب جریان برگشتی ایجاد شده در محور چپ بیشترین خطای شبیه سازی جریان در این محور ایجاد می‌شود. تاثیر ورود هوا به درون آب در سرعت‌های بالا و افزایش عمق حاصل از این پدیده در این قسمت حائز اهمیت می‌باشد. با توجه به این نکته، بخشی از این اختلاف بر اثر دقت اندازه گیری پروفیل سطح آب در آزمایشگاه می‌باشد که به صورت چشمی و قاعدتاً با خطای بیشتر در مقایسه با سایر مناطق همراه می‌باشد. حداکثر خطا در محور چپ جام‌ها در مقطع ورودی جریان به داخل جام‌ها مربوط به دبی ۱۷۰ Lit/s در جام سمت راست برابر ۱۲٪ می‌باشد. در بستر جام‌ها نیز حداکثر خطای شبیه سازی عمق برای دبی ۱۷۰ Lit/s در قعر جام سمت چپ (Piz 5) برابر ۱۹٪ می‌باشد. همچنین در جام سمت راست برای دبی ۱۷۰ Lit/s خطای حداکثر برابر ۱۷٪ می‌باشد.

نمودارهای توزیع فشار بر روی بستر جام‌ها در محور مرکزی هر دو پرتاب کننده‌های جامی مرکب در راستای طولی به ازای دبی ۱۰۰ Lit/s در شکل‌های (۸) و (۹) (سمت راست) نشان داده شده است. در همه نتایج شبیه سازی تمرکز فشار در

محل ورود جریان به پرتاب کننده‌های جامی مرکب ($X=6.28\text{ m}$) مشاهده می‌شود، به طوریکه بیشترین مقدار فشار به ازای دبی ۱۰۰ Lit/s در محور چپ پرتاب کننده جامی مرکب سمت چپ برابر ۱۴/۳ cm (معادل ارتفاع ستون آب) می‌باشد. به منظور بررسی بیشتر شبیه‌سازی پارامتر فشار بر روی بستر جام‌ها به ازای دبی‌های مختلف، نمودارهای نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفتند (شکل (۸) و (۹)).



شکل ۸- مقایسه عددی و آزمایشگاهی توزیع هد فشار برای محور مرکزی بر روی بستر جام مرکب چپ



شکل ۹- مقایسه عددی و آزمایشگاهی توزیع هد فشار برای محور مرکزی بر روی بستر جام مرکب راست

به دلیل اینکه در محور مرکزی جام‌ها کمترین میزان تغییرات عمق و سرعت رخ می‌دهد مقادیر شبیه‌سازی توزیع فشار روی بستر جام‌ها توسط مدل عددی Flow-3D با بیشترین دقت و نزدیک‌ترین مقادیر به نتایج آزمایشگاهی حاصل شده است. در مقطع قبل از ورودی جریان به داخل جام‌ها حداکثر خطای شبیه‌سازی در دبی ۱۷۰ Lit/s برابر ۴٪ در جام سمت چپ می‌باشد. در مقاطع قبل از ورود جریان به جام‌ها نیز در جام سمت راست حداکثر خطا برای دبی ۱۲۰ Lit/s برابر ۸٪ می‌باشد. بر روی بستر جام‌ها نیز حداکثر خطا برای دبی ۱۲۰ Lit/s و ۱۷۰ Lit/s برابر ۱۲٪ می‌باشد.

حداکثر خطای شبیه‌سازی فشار در مقطع قبل از ورود جریان به داخل جام‌ها و در ناحیه‌ی توزیع فشار استاتیکی برای دبی ۱۷۰ Lit/s برای جام سمت چپ برابر ۱۳٪ می‌باشد. پس از آن در مقطع ورودی جریان به داخل جام‌ها خطای شبیه‌سازی فشار بسیار ناچیز و حداکثر در حدود ۲٪ می‌باشد. کمترین اختلاف نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی در دبی ۳۰ Lit/s مشاهده می‌شود که علت آن را می‌توان در آشفته‌گی کمتر جریان در دبی‌های کمتر جستجو نمود. از شبیه‌سازی قسمت فشارهای دینامیکی بر روی بستر جام‌ها نتیجه می‌شود که شبیه‌سازی فشار دینامیکی بر روی بستر جام‌ها در مدل عددی Flow-3D از دقت قابل قبولی برخوردار می‌باشد. در محور چپ و با شکل‌گیری جریان برگشتی و انتقال آن به داخل جریان میزان اختلاف

نتایج عددی و آزمایشگاهی افزایش می یابد که این تغییر در اعداد فرود بیشتر نیز افزایش یافته است. در این نمودارها حداکثر خطای شبیه سازی فشار بر روی بستر جام ها در محور چپ جام چپ مربوط به دبی 100 Lit/s که حدوداً برابر 19% می باشد. حداکثر خطای شبیه سازی جریان در لبه ی جام ها در محور سمت چپ برای جام سمت راست در دبی 170 Lit/s در حدود 12% می باشد.

اختلاف مقادیر فشار شبیه سازی شده با مقادیر آزمایشگاهی برای محور راست در جام ها قبل از ورود جریان به جام ها بسیار ناچیز و حداکثر در حدود 2% می باشد. ولی توزیع فشار با توجه به این که زاویه انحراف جام (7°) در این محور برای جام سمت راست بسیار کم و در حدود 5° درجه می باشد انحراف خطوط جریان به منظور ایجاد جت پرتابی شکل نمی گیرد و باعث افزایش آشفتگی در این محور جام می گردد. آشفتگی ایجاد شده، خطای حداکثری 14% شبیه سازی مقادیر فشار حاصل از مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی در دبی 170 Lit/s برای جام سمت چپ در مقطع ورودی جریان به جام ایجاد می کند. در جام سمت راست نیز به ازای دبی 120 Lit/s در قعر جام خطای حداکثری 16% ایجاد می شود.

۵. نتیجه گیری

در مجموع با تحلیل و بررسی مدل های شبیه سازی شده توسط مدل عددی Flow-3D و مقایسه نتایج آنها با نتایج مدل آزمایشگاهی به ازای هر سه پارامتر هیدرولیکی توزیع فشار بر روی بستر، سرعت و عمق متوسط جریان و با توجه به مدت زمان شبیه سازی ها و دقت نتایج حاصل از آنها، می توان نتایج ارائه شده را مناسب ترین و کالبره ترین مدل جهت شبیه سازی مدل هیدرولیکی سرریز سد گتوند دانست. دستیابی به چنین مدل کالبره شده ای می تواند به منظور بررسی تغییرات پارامترهای هندسی جام های مرکب (انحنای جام، شیب عرضی بستر، ارتفاع لبه ی جام و...) در تحقیقات آتی مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به این که مدل عددی Flow-3D به طور 100% نمی تواند ورود هوا را همانند مدل آزمایشگاهی شبیه سازی کند، بنابراین نمی توان انتظار شبیه سازی میدان جریان منطبق با مدل آزمایشگاهی را داشت. با توجه به این که زاویه انحراف جام (7°) در محور راست برای جام سمت راست بسیار کم و در حدود 5° درجه می باشد انحراف خطوط جریان به منظور ایجاد جت پرتابی شکل نمی گیرد و باعث افزایش خطای شبیه سازی در قعر جام های مرکب در این محور جام می گردد. از شبیه سازی قسمت فشارهای دینامیکی بر روی بستر جام ها نتیجه می شود که شبیه سازی فشار دینامیکی بر روی بستر جام ها در مدل عددی مدل عددی Flow-3D از دقت قابل قبولی برخوردار می باشد. به دلیل اینکه در محور مرکزی جام ها کمترین میزان تغییرات عمق و سرعت رخ می دهد مقادیر شبیه سازی توزیع فشار بر روی بستر جام ها با بیشترین دقت و با نزدیک ترین مقادیر به نتایج آزمایشگاهی توسط مدل عددی Flow-3D شبیه سازی شده است. البته بایستی دقت نتایج خروجی را با متوسط خطای 12% توزیع فشار بر روی بستر، 8% سرعت جریان و 11% برای عمق جریان در نظر گرفت.

۶. قدردانی

از گروه سازه های هیدرولیکی موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو به ویژه از جناب آقای مهندس روشن و مهندس خراسانی زاده و شرکت سهامی مدیریت منابع آب (دفتر پژوهش های کاربردی) به دلیل همکاری های علمی و عملی بسیار تشکر و قدردانی می کنم.

۷. مراجع

1- Khatsuria, R. M. (2005). "Hydraulics of spillway and energy dissipaters" Dekker, New York.

2- Parvishi, A., Shafae Bajestan, M., Musavi Jahromi, S.H. "Impact Of lip Angle Of Flip Bucket Energy Dissipater On Scour Hole", 3rd Iasme / Wseas Int. Conf. On Water Resources, Hydraulics & Hydrology (Whh '08), University Of Cambridge, UK, Feb. 23-25, (2008).

۳- امیراصلاتی، ش.، پیرستانی، م.ر.، صالحی نیشابوری، س.ع.ا.، (۱۳۸۷)، "بررسی عددی اثر زاویه اصطکاک داخلی رسوبات بر روی ابعاد چاله آبستگي ناشی از جت ریزشی آزاد"، دومین کنفرانس ملی نیروگاههای آبی کشور، تهران، ایران.

۴- اکبری، غ.، گیوه چی، م.، جمعه بیدختی، ا.، سلطانی، ا.، (۱۳۹۰)، "مدل سازی عددی جریان بر روی پرتاب کننده های جامی"، دهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

۵- میناتور، ی.، شکری، ی.، خزایی، ج.، دستورانی، م.، (۱۳۹۰)، "مطالعه عددی مستهلک کننده های پرش اسکی با استفاده از مدل های چند فازي مختلف"، دهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

6- Flow Science, Inc., FLOW-3D User Manual Version 9.3.

۷- گزارش نهایی مدل هیدرولیکی سیستم تخلیه سیلاب سد گتوند علیا، (۱۳۸۷). موسسه تحقیقات آب، گروه سازه های هیدرولیکی، ص ۱۲۰-۱۱۱.

8-Yakhot, V., Orszag, S.A., Thangam, S., Gatski, T.B., & Speziale, C.G., (1992), "Develpoment of Turbulence Model for Shear Flow by a Double Expansion Technique", Physics of Fluids A, Vol. 4, No. 7, pp1510-1520.

۹- صباغ یزدی، س.ر.، شاملو، ح.، رستمی، ف.، (۱۳۸۷)، "کاربری آموزشی نرم افزار Flow-3D در بررسی مدل آشفستگی شبیه سازی جریان سه بعدی در حوضچه پرش هیدرولیکی با موانع بتنی"، مجله فناوری و آموزش، سال دوم، جلد ۲ شماره ۴.

۱۰- امین الرعایایی یمینی، ا.، کاویانپور، م.ر.، (۱۳۹۰)، "تحلیل نتایج آزمایشگاهی توزیع فشار دینامیکی بر روی بستر پرتاب کننده های جامی مرکب"، دهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.