

Experimental and Numerical Investigation of the Trajectory of Outlet Jets through the Pressurized Discharge Gates of Reservoir Dams

A. Taheri Aghdam^{1*}, F. Salmasi², A. Hosseinzadeh Dalir², A. Abbaspour³

1,2 & 3- Ph.D. Student, Professor and Associate Professor, Department of Water Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran.

*(Corresponding Author Email: ali.taheri@tabrizu.ac.ir)

Received: 22-01-2023

Revised: 09-04-2023

Accepted: 26-04-2023

Available Online: 21-12-2023

بررسی عددی و آزمایشگاهی مسیر حرکت جت‌های خروجی از دریچه‌های تخلیه تحت فشار سدهای مخزنی

علی طاهری اقدم^{۱*}، فرزین سلماسی^۲، علی حسین زاده دلیر^۲، اکرم عباسپور^۳

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی دکتری، استاد و دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

*(نویسنده‌ی مسئول، E-Mail: ali.taheri@tabrizu.ac.ir)

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۱/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۹/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۰۶

Abstract

Accurate knowledge of where jets hit downstream of dams helps designers a lot in locating plunging pools. The purpose of this study is to investigate experimentally and numerically the trajectory of pressurized jets through the gates and to determine their location downstream of the dam. Ansys - Fluent software was used for numerical simulation. The results showed that there is a significant difference between the experimental values and the values extracted from the jet projectile equations for predicting the path of the pressurized jets, and this discrepancy may be due to the effect of air resistance on flow. The existing jet trajectory equations don't consider air resistance. To minimize this difference, the projectile equation was modified. Also, the effect of changing the diameter of the dam gate and the discharge on the point of impact of the pressurized jet on the ground surface was examined. By increasing the diameter of the dam outlet at a constant discharge, the location of impact of the impinging jet to the ground from the dam toe decreases, and with increasing discharge at a constant diameter of outlet, the place of impact of the pressurized jet to the ground from the toe of the dam increases. In addition, the numerical simulation results showed that the dynamic pressure as well as the velocity at the point of impingement of the jets on the river bed have the maximum value that should be considered in designs. The dynamic pressure as well as the velocity of the jet coming out of the gate hit the ground with an average increase of 145% and 242% relative to the end edge of the gate, respectively. In addition, the breaking length of the pressurized jet was investigated in this study, and it was found that the breaking length of the pressurized jet increases with the increase in the initial velocity of the water jet.

Keywords: Pressurized Jet, Plunging Pool, Gate, Dynamic Pressure, Projectile Equation.

چکیده

آگاهی دقیق از محل برخورد جت‌ها در پایاب سدها به طراحان در جاگذاری دقیق و مطمئن حوضچه‌های استغراق کمک شایانی می‌کند. هدف از این پژوهش بررسی دقیق مسیر حرکت جت‌های خروجی از دریچه‌ها و تعیین محل برخورد آن‌ها به پای سد به صورت عددی و آزمایشگاهی می‌باشد. برای شبیه‌سازی عددی از نرم‌افزار انسیس-فلونت استفاده شد. نتایج نشان داد بین مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر استخراج شده از روابط پرتابه جت برای پیش‌بینی مسیر حرکت جت‌های تحت فشار، اختلاف قابل توجهی وجود دارد که این اختلاف می‌تواند ناشی از تاثیر مقاومت هوا در داده‌های استخراجی از کار آزمایشگاهی باشد. برای به حداقل رساندن این اختلاف، معادله پرتابه اصلاح شد. همچنین تاثیر تغییر قطر دریچه سد و دبی جریان بر محل برخورد جت ریزشی تحت فشار به زمین بررسی شد. نتایج نشان داد با افزایش قطر در یک دبی ثابت، محل برخورد جت تحت فشار به زمین از پای سازه کمتر و با افزایش دبی در یک قطر ثابت محل برخورد جت به زمین از پای سازه بیشتر می‌شود. علاوه بر این، نتایج شبیه‌سازی عددی نشان داد فشار دینامیکی و همچنین سرعت جت خروجی از دریچه به طور متوسط و به ترتیب با افزایش ۱۴۵ و ۲۴۲ درصدی نسبت به لبه انتهایی دریچه به زمین برخورد می‌کند که باید در طراحی‌ها مورد توجه قرار داده شود. همچنین طول شکست جت ریزشی تحت فشار در تحقیق حاضر بررسی شد و مشخص شد با افزایش سرعت اولیه جت آب، طول شکست جت ریزشی تحت فشار افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: جت تحت فشار، حوضچه استغراق، دریچه، فشار دینامیکی، معادله پرتابه.

بنابراین معادلات حرکت x و y با انتگرال‌گیری از روابط (۱) و (۲) و همچنین وارد کردن تاثیر ترم شتاب در رابطه (۲) به شکل روابط زیر به دست می‌آید.

$$x = V_0 \cos(\theta) \times t \quad (۳)$$

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + V_0 \sin(\theta) \times t \quad (۴)$$

با حذف t (زمان) از روابط (۳) و (۴)، معادله مسیر حرکت به

$$y = x \tan \theta_0 - \frac{gx^2}{2V_0^2 \cos^2 \theta_0} \quad (۵)$$

فرم کلی رابطه (۵) نشان می‌دهد پرتابه در طول حرکت خود تحت تاثیر مقاومت هوا قرار نگرفته و یک مسیر سهمی را طی می‌کند. به بیان دیگر رابطه (۵) در شرایط خلا اثبات شده است و از اثر مقاومت هوا صرف نظر شده است. در واقع مقدار واقعی طول افقی پرتابه کوتاه‌تر از مقدار به دست آمده از این رابطه به دلیل مقاومت هوا خواهد بود. طراحان برای راحتی محاسبه مسیر جت جریان ترجیح می‌دهند معادله براساس هد بالادست باشد. در مورد جریانی که از یک دریچه عبور می‌کند، هد جریان به راحتی قابل محاسبه است. سرعت اولیه صرف نظر از تلفات موجود در خروجی به صورت $v_0 = \sqrt{2gH}$ تعریف می‌شود که در آن ارتفاع آب مخزن سد از مرکز دریچه است. با وارد کردن رابطه سرعت اولیه خروجی در معادله پرتابه و همچنین در شرایطی که زاویه اولیه پرتابه با افق برابر صفر باشد، می‌توان نوشت:

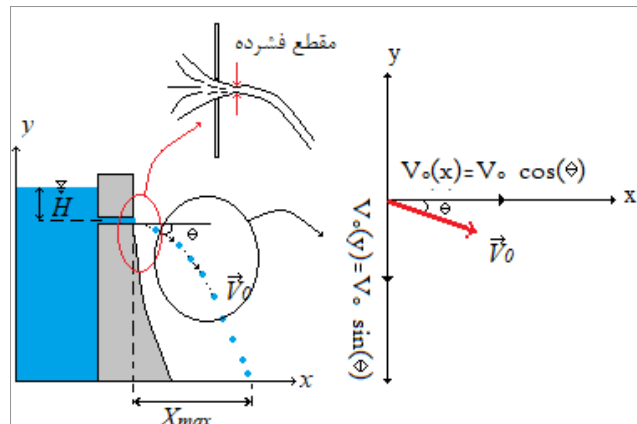
$$y = -\frac{x^2}{4H} \quad (۶)$$

رابطه (۶) برای محاسبه مسیر جت‌های تحت فشار خروجی از سیستم‌های تخلیه کننده سیلاب در شرایطی که زاویه اولیه پرتابه از افق برابر صفر می‌باشد، ارائه شده است (USBR، ۱۹۶۰؛ ۱۹۷۶؛ ۱۹۷۷).

از جمله پژوهشگرانی که به ارائه رابطه‌ای تئوری برای پیدا کردن طول شکست جت‌ها اقدام کرده‌اند می‌توان به Falavey و Ervine (۱۹۸۷) اشاره نمود. آن‌ها نشان دادند مهمترین پارامتر در مقدار طول شکست جت، ضریب شکست آشفتگی است. آنان نتایج آزمایشگاهی را در مقایسه با مقادیر به دست آمده طول شکست جت از رابطه قرار داده و دریافتند که رابطه به دست آمده دقت قابل قبولی دارد. Eggers (۱۹۹۷) مروری بر پدیده گسستگی جت آب پرتابی انجام داده است. او یک جت افقی را با تحریک سینوسی سرعت آن بررسی کرد. قطر نازل خروجی جت آب در تحقیق ایشان بین ۱/۱ تا ۲ میلی‌متر متغیر بود. در محفظه پشت نازل خروجی جت، یک مبدل نوسانات فشار ایجاد می‌کند که به اغتشاشات سینوسی سرعت جت در خروجی نازل تبدیل می‌شود. نتایج او نشان داد با افزایش اغتشاشات در سرعت جت، گسستگی زودتر اتفاق می‌افتد.

تاثیر خصوصیات هیدرولیکی جت بر ژئومتری منحنی پایین افتادگی در جت‌های دایره‌ای مستغرق با استفاده از تحلیل‌های آزمایشگاهی

سیستم‌های تخلیه کننده سیلاب، به عنوان یکی از سازه‌های هیدرولیکی سد برای کنترل آبیگری مخزن، تخلیه مخزن در مواقع ضروری و تخلیه رسوبات ورودی به مخزن استفاده می‌شوند. این سیستم‌ها نیازمند طراحی دقیق و شناسایی عوامل آسیب رسان هستند (Salazar و همکاران، ۲۰۱۶). جت‌های آبی خروجی از سیستم‌های تخلیه کننده سیلاب‌ها یکی از موضوعات بسیار مهم در سدها هستند. غالباً این جت‌ها به حوضچه‌های استغراق وارد شده و انرژی خود را به تدریج از دست می‌دهند. حوضچه استغراق، حوضچه‌ای با عمق مشخص است که پدیده پخش و استهلاك جت داخل آن اتفاق می‌افتد (Tanaka و Kamoi، ۱۹۷۲). در صورت پیش‌بینی ضعیف و یا نادرست مسیر حرکت جت‌های آبی خروجی از سدها و به خصوص محل برخورد جت تحت فشار در پایین دست سدها، ممکن است سازه‌های موجود در پایین دست سدها، حوضچه استغراق و کانال پایین دست دچار تخریب شوند (Abraham و Salmasi، ۲۰۲۲). شکل (۱) مسیر حرکت بردار پرتابه از خروجی یک سد را نشان می‌دهد.



شکل ۱- مسیر حرکت بردار پرتابه روی صفحه مختصات دو بعدی

در شکل (۱)، x و y مختصات مسیر حرکت پرتابه، V_0 سرعت اولیه پرتابه، H ارتفاع آب مخزن سد از مرکز دریچه، X_{max} بیشترین طول افقی جت ریزشی تحت فشار و θ زاویه اولیه پرتابه از خط افق است. باتوجه به شکل (۱)، مولفه‌های سرعت اولیه بردار پرتابه در راستای محور x و y برابر با روابط زیر خواهند بود.

$$V_0(x) = V_0 \cos(\theta) \quad (۱)$$

$$V_0(y) = V_0 \sin(\theta) \quad (۲)$$

در روابط (۱) و (۲)، $V_0(x)$ و $V_0(y)$ به ترتیب سرعت در راستای محور x و y می‌باشند. باتوجه به روابط فوق و همچنین شکل (۱) می‌توان گفت شتاب در راستای محور x برابر با صفر بوده و در راستای محور y برابر با $-g$ (شتاب ناشی از گرانش) می‌باشد.

توسط Musavi Jahromi و Ahadiyan (۲۰۰۹) بررسی شد. یافته‌ها نشان داد میزان تغییر طول منحنی پایین افتادگی به قطر نازل وابسته است. همچنین Zhang و Zhu (۲۰۱۴) با تزریق مخلوط آب و هوا از طریق یک نازل منحنی پایین افتادگی جت جوشان^۲ (جریان جت دارای حباب هوا) در جریان‌های متقاطع را بررسی کردند. سپس با تحلیل خط مرکزی منحنی پایین افتادگی برای هر دو فاز آب و هوا در جت جوشان به این نتیجه رسیدند بعد از جدایی سیال از تخلیه کننده، خط مرکزی آب و هوا می‌تواند به صورت مستقیم حرکت کند و جریان جت بعد از طی کردن مسیر افقی و مستقیم، منحنی پایین افتادگی را ایجاد و به پایین سقوط می‌کند.

پراکنش حدی جریان جت خروجی در محیط هم‌فاز و غیرهم‌فاز توسط سلمان‌زاده و احدیان (۱۳۹۵) بررسی شد. لازم به توضیح است که منظور از پراکنش حدی جریان جت خروجی در محیط هم‌فاز و غیر هم‌فاز این است که جریان جت خروجی در محیط هم‌فاز، وارد آب و در محیط غیر هم‌فاز، وارد هوا می‌شود. در آن پژوهش، مطابق با کلیه برداشت‌های انجام شده، معادله حاکم بر نحوه توزیع حرکتی جت خروجی به دست آمد (رابطه ۷). نکته مهم در رابطه (۷)، در نظر گرفته نشدن نیروی اصطکاکی هوا می‌باشد. در پژوهش سلمان‌زاده و احدیان (۱۳۹۵) رابطه زیر برای محاسبه مسیر جت ریزشی در حالت تحت فشار ارائه شده است:

$$\frac{y}{h_0} = -0.162\left(\frac{x}{h_0}\right)^2 - 0.415\left(\frac{x}{h_0}\right) + 6.68 \quad (7)$$

در رابطه (۷) h_0 بار سرعت اولیه پرتابه و x و y مختصات مسیر حرکت پرتابه هستند. وجود عدد ثابت در رابطه ارائه شده توسط سلمان‌زاده و احدیان (۱۳۹۵) باعث ایجاد خطای زیادی در پیش‌بینی مسیر حرکت جت ریزشی تحت فشار می‌شود که این خطا باید در مطالعات آینده بررسی شود و از بین برود.

در پژوهش‌های صورت گرفته بر روی مدل‌های فیزیکی، مطالعات قابل توجه در مورد مسیر حرکت جت‌های خروجی از دریچه‌ها صورت نگرفته است ولی روند تغییرات ضریب آبگذری در بازشدگی‌های مختلف از دریچه‌های تخلیه کننده تحتانی سد البرز (مرکز تحقیقات آب، ۱۳۸۱) و سد گاوشان (مرکز تحقیقات آب، ۱۳۸۲) در داخل کشور و همچنین سدهای ایسلند و سد فالسیم توسط USACE (۱۹۸۰) در خارج از کشور مورد بررسی و ارزیابی آزمایشگاهی قرار گرفته است.

نرم‌افزار انسیس فلوئنت یکی از کاملترین، قویترین و کاربردی‌ترین نرم‌افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) بوده و برای مدل کردن جریان سیال و انتقال حرارت در هندسه‌های پیچیده به کار می‌رود. این نرم‌افزار امکان تغییر شبکه، به صورت کامل و تحلیل جریان با شبکه‌های غیرساخت یافته (بی‌سازمان) برای هندسه‌های پیچیده را فراهم می‌سازد. لازم به توضیح است که در مش (شبکه) سازمان یافته، هر المان را می‌توان با شماره سطر و ستون آدرس‌دهی

کرد. زیرا در شبکه‌بندی سازمان یافته شبکه به صورت کاملاً منظم تولید می‌شود. در صورتی که در شبکه بی‌سازمان، عملاً این کار به دلیل عدم نظم در ایجاد شبکه امکان‌پذیر نیست (Ansys Fluent, ۲۰۱۵). از جمله پژوهش‌های کار شده بانرم‌افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی می‌توان به بررسی عددی آثار ارتفاع تاج روزنه جانبی مستطیلی بر الگو و مشخصات جریان در اطراف روزنه (غفاری و همکاران، ۱۳۹۵)، بررسی آزمایشگاهی رابطه دبی-اشل برای سرریز کلید پیاپایی دریچه‌دار (Akbari و همکاران، ۲۰۱۹)، مطالعه عددی و آزمایشگاهی ترکیب سرریز کنگره‌ای با روزنه و تأثیر آن بر ضریب دبی جریان (بهره بر و همکاران، ۱۴۰۰)، بررسی رابطه دبی-اشل و ضریب دبی جریان در سرریزهای لبه تیز پلان مثلثی (سلماسی و همکاران، ۱۴۰۰)، بررسی ضریب دبی سرریزهای لبه پهن با وجه شیب‌دار در بالادست و پایین دست (Nourani و همکاران، ۲۰۲۱) و Malekzadeh و همکاران، (۲۰۲۲) اشاره کرد. با مروری کلی بر منابع و تحقیقات محققین مختلف می‌توان گفت که تحقیق قابل توجهی با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت بر مسیر حرکت جت‌های خروجی از دریچه‌ها (جت‌های تحت فشار) انجام نگرفته است.

در تحقیق حاضر مسیر حرکت جت‌های خروجی از دریچه‌های تخلیه تحت فشار سدهای مخزنی به صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی شد. با توجه به این نکته که مطالعات انجام شده در برآورد مسیر حرکت جت‌های تحت فشار از مقاومت هوا صرف نظر کرده‌اند، لذا در تحقیق حاضر تأثیر مقاومت هوا در برآورد مسیر حرکت جت‌های تحت فشار بررسی شد. همچنین توانایی مدل عددی استفاده شده در این تحقیق (نرم‌افزار انسیس فلوئنت) در برآورد مسیر حرکت جت‌های تحت فشار بررسی و نمودارهای توزیع فشار و سرعت در پایاب سدها رسم شد. علاوه بر آن تأثیر قطر دریچه خروج جریان و ارتفاع آب مخزن سد از مرکز دریچه بر طول افقی جت تحت فشار بررسی شد. همچنین در تحقیق حاضر طول شکست جت‌های ریزشی تحت فشار مورد بحث قرار داده شد. در نهایت برای اصلاح مسیر حرکت جت تحت فشار، با استفاده از اعمال ضریب اصلاح و برازش یک رابطه (با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی) اقدام شد.

مواد و روش‌ها

• آنالیز ابعادی

جریان خروجی از جت ریزشی تحت فشار تابعی از خصوصیات سیال، مشخصات هندسی سازه و شرایط هیدرولیکی جریان می‌باشد. لذا می‌توان نوشت:

$$f(x, y, \sigma, g, \rho, \mu, \theta_0, V_0, P, d, H) = 0 \quad (8)$$

در رابطه (۸)، H ارتفاع آب مخزن سد از مرکز دریچه، d قطر روزنه خروجی تحت فشار، P ارتفاع دریچه از سطح زمین، V_0

در شکل (۲) x و y مختصات لبه پایین جت تحت فشار، H ارتفاع آب مخزن سد از مرکز دریچه، d قطر دریچه و X_{max} بیشترین طول افقی جت ریزشی تحت فشار می‌باشد.

بعد از ساخت مدل آزمایشگاهی، آزمایشات در طی شش مرحله انجام شد. در مرحله اول جریان آب به وسیله پمپ موجود در آزمایشگاه به داخل برج آب انتقال داده شد. در مرحله دوم جریان آب به مخزن مکعبی شکل انتقال داده شد. در مرحله سوم بعد از ثابت شدن ارتفاع آب در داخل مخزن در یک تراز مشخص، میزان دبی خروجی از روزنه اندازه‌گیری شد (لازم به توضیح است که زمان ثابت شدن ارتفاع آب در داخل مخزن مکعبی شکل در هر سری آزمایش حدوداً ۲۰ دقیقه به طول می‌انجامید). در مرحله چهارم عکس‌برداری از مسیر حرکت جت ریزشی تحت فشار انجام شد. در مرحله پنجم با تغییر بازشدگی شیرفلکه، میزان دبی را تغییر داده و مرحله دوم تا چهارم تکرار شد. در مرحله ششم با تغییر قطر دریچه، مراحل اول تا چهارم تکرار شد. در نهایت حدود ۳۵۰ مختصات مسیر حرکت جت ریزشی تحت فشار از روی عکس‌ها برداشته شد. با تغییر پارامترهای موثر در مسیر جت پرتابی (پارامترهای جدول ۱) آزمایشات انجام شدند.

برای برداشت داده‌های مسیر سقوط جت تحت فشار از یک دوربین استفاده شد. به این ترتیب بعد از برقراری جریان جت از دریچه سد (دریچه دایره‌ای نصب شده بر روی مخزن)، عکس‌هایی از مسیر حرکت جت‌ها گرفته می‌شدند. سپس داده‌های مسیر حرکت جت‌های تحت فشار موجود در این عکس‌ها با استفاده از نرم‌افزار Plot Digitizer برداشت می‌شدند. لازم به ذکر است در نرم‌افزار Plot Digitizer ابتدا چهار نقطه مشخص روی عکس که مقادیر x و y آن‌ها معلوم باشد به نرم‌افزار وارد می‌شود. سپس با کلیک بر روی هر نقطه از عکس، مختصات آن نقطه وارد می‌شود. با انتخاب مسیر حرکت جت‌های ریزشی تحت فشار در این نرم‌افزار، مختصات مسیر حرکت جت به دست می‌آید (در استخراج داده‌های مسیر حرکت جت تحت فشار، هسته مرکزی جت به عنوان مسیر حرکت جت تحت فشار در نظر گرفته شد و همچنین سطح آب داخل مخزن در هر آزمایش در یک تراز ثابت، قرار گرفت و سپس عکس‌برداری و اندازه‌گیری دبی صورت گرفت). لازم به توضیح است دبی جریان جت به صورت حجمی در کل آزمایشات اندازه‌گیری شد. در اندازه‌گیری دبی به صورت حجمی از یک مخزن کوچک مکعبی شکل به ابعاد $0.16 \times 0.16 \times 0.15$ متر استفاده شد و همچنین زمانی که برای ریخته شدن جریان داخل مکعب در هر آزمایش در نظر گرفته می‌شد بالای ۴۰ ثانیه در کل آزمایشات بود. علاوه بر آن، سطح آب در فلوم پایین دست در طول آزمایشات ثابت و در حدود ۱۵ سانتی‌متر بود که تأثیری بر مسیر حرکت جت ریزشی تحت فشار نداشت.

در این پژوهش، ابتدا جریان جت ریزشی تحت فشار به صورت

سرعت اولیه جت پرتابی، θ_0 زاویه اولیه جت از افق، ρ جرم مخصوص سیال، μ لزجت دینامیکی، x و y مختصات لبه پایین جت ریزشی، g شتاب ثقل و σ کشش سطحی می‌باشند. با انتخاب پارامترهای ρ و d به عنوان پارامترهای تکرارشونده، پارامترهای بدون بعد برای جت ریزشی تحت فشار به صورت رابطه (۹) به دست می‌آید.

$$f' \left(\frac{\mu}{\rho V_0 d}, \frac{\sigma}{\rho V_0^2 d}, \frac{dg}{V_0^2}, \frac{x}{d}, \frac{y}{d}, \frac{P}{d}, \frac{H}{d}, \theta_0 \right) = 0 \quad (9)$$

$$\frac{y}{d} = f' \left(\frac{\mu}{\rho V_0 d}, \frac{\sigma}{\rho V_0^2 d}, \frac{dg}{V_0^2}, \frac{x}{d}, \frac{P}{d}, \frac{H}{d}, \theta_0 \right) \quad (10)$$

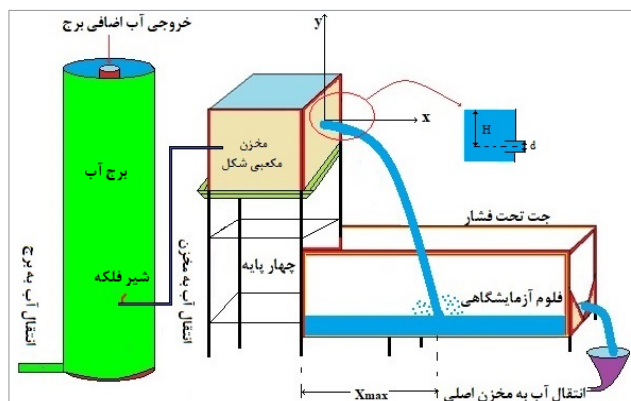
از آنجایی که پارامتر بدون بعد θ_0 (زاویه اولیه جت از افق) در تحقیق حاضر ثابت گرفته شده است، با توجه به عوامل متغیر در این تحقیق، معادله نهایی به فرم روابط (۱۱) و (۱۲) ارائه می‌شود.

$$\frac{y}{d} = f' \left(\frac{\mu}{\rho V_0 d}, \frac{\sigma}{\rho V_0^2 d}, \frac{dg}{V_0^2}, \frac{x}{d}, \frac{P}{d}, \frac{H}{d} \right) \quad (11)$$

$$\frac{y}{d} = f' \left(\frac{1}{Re}, \frac{1}{We}, \frac{1}{Fr^2}, \frac{x}{d}, \frac{P}{d}, \frac{H}{d} \right) \quad (12)$$

• مشخصات هندسی مدل آزمایشگاهی

آزمایشات این پژوهش در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز در یک مخزن مکعبی به طول ۲، عرض ۱/۲ و ارتفاع ۱/۵ متر انجام گرفت. بر روی این مخزن یک دریچه دایره‌ای شکل برای عبور آب نصب شد. همچنین در پایین دست آن یک فلوم شیشه‌ای فلزی برای انتقال آب به مخزن اصلی و در بالادست آن یک برج آب برای تامین آب مورد نیاز برای شبیه‌سازی هد بالادست جت ریزشی تحت فشار تعبیه شد. لازم به ذکر است برای تامین ارتفاع مورد نیاز برای سقوط جت ریزشی تحت فشار، مخزن آب روی یک چهارپایه به ارتفاع ۲ متر قرار داده شد. در شکل (۲)، شماتیک تجهیزات آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری‌های مسیر حرکت جت تحت فشار نشان داده شده است.



شکل ۲- شماتیک فلوم آزمایشگاهی تحقیق حاضر در حالت ریزش تحت فشار

آزمایشگاهی بررسی شد و سپس با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، نرم‌افزار مورد استفاده در تحقیق حاضر کالیبره شد و شبیه‌سازی عددی نیز برای مدل‌های مورد نظر انجام گرفت. در جدول (۱) محدوده تغییر پارامترها در تحقیق حاضر نشان داده شده است.

جدول ۱- محدوده تغییرات پارامترهای موثر بر جت ریزشی تحت فشار

	x/d	y/d	P/d	H/d
Min	۰	۲۷۰/۳۹۹	۱۰۰	۱/۱۶
Max	۹۴/۴۹	۰	۴۲۵	۱۳/۷۵
Mean	۳۰/۶۳	۵۹/۸۱	۱۷۰/۲۳	۶/۲۳
Std Dev	۲۱/۲۳	۴۸/۰۵۸	۱۰۵/۷۳۵	۴/۰۲

H ارتفاع آب مخزن سد از مرکز دریچه، P ارتفاع دریچه از سطح زمین، d قطر دریچه و x و y مختصات لبه پایین جت ریزشی

• شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار فلوئنت

- معادلات حاکم بر جریان:

پایه و اساس تمام روش‌های عددی در رشته مهندسی هیدرولیک حل معادلات حاکم بر جریان شامل معادلات پیوستگی و اندازه حرکت است که اصطلاحاً به معادلات ناویر- استوکس معروف می‌باشند. برای یک جریان تراکم ناپذیر با ویسکوزیته ثابت، معادلات مذکور به ترتیب به فرم رابطه (۱۳) و (۱۴) نوشته می‌شوند (Ansys Fluent، ۲۰۱۵).

$$\frac{\partial}{\partial X_j}(\overline{U_i}) = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial X_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial X_j} (-P \delta_{ij} - \overline{\rho U_i U_j}) \quad (14)$$

که در رابطه فوق U_i و U_j مولفه‌های بردار سرعت در راستای فضایی i و j ، فشار، P چگالی سیال و δ_{ij} دلتای کرونکر است (در صورتی که $i=j$ باشد، مقدار آن یک و در غیر این صورت مقدار آن صفر است). عبارت اول در سمت چپ رابطه (۱۴) عبارت غیرماندگاری و عبارت دوم انتقال^۲ است. عبارت اول سمت راست رابطه (۱۴) عبارت فشار و عبارت دوم تنش رینولدزی است. برای حل معادله حاکم بر جریان می‌توان از یکی از نرم‌افزارهای CFD بهره برد. در تحقیق حاضر از نرم‌افزار Ansys-Fluent که به روش حجم محدود به شبیه‌سازی عددی جریان می‌پردازد، استفاده شد.

- مدل عددی:

در شبیه‌سازی جریان عبوری از دریچه به روش حجم محدود، برای حل معادلات آشفتگی از مدل اغتشاش (RNG) $k-\epsilon$ ، برای حل معادلات سطح آزاد جریان از روش حجم سیال (VOF^۳)، برای گسسته‌سازی عبارت فشار از روش (PISO^۴) و برای

گسسته‌سازی عبارت اندازه حرکت از روش مرتبه دوم بالادست (SOU^۵) استفاده شد.

از انواع مدل‌های آشفتگی موجود در نرم‌افزار انسیس فلوئنت می‌توان به مدل Spalart-Allmaras، مدل‌های $k-\epsilon$ ، مدل $k-\omega$ ، مدل‌های تنش رینولدز^۶، مدل شبیه‌سازی گرداب منفصل^۷ و مدل شبیه‌سازی گرداب بزرگ^۸ اشاره نمود. متأسفانه تاکنون مدل آشفتگی واحدی به‌عنوان مدل آشفتگی عمومی برای حل همه مسائل پذیرفته نشده است. انتخاب مدل آشفتگی به شرایط موجود مانند فیزیک در برگیرنده جریان، میزان دقت مورد نیاز، منابع محاسباتی موجود و زمان در نظر گرفته شده جهت شبیه‌سازی بستگی دارد. مدل $k-\epsilon$ در واقع مشتق شده از مدل RSM می‌باشد، که خود بر سه نوع RNG، Standard و Realizable تقسیم می‌شود (Ansys Fluent، ۲۰۱۵).

در تحقیق حاضر برای یک شرایط هیدرولیکی و هندسی ثابت از هر سه نوع مدل $k-\epsilon$ فوق و همچنین (Standard) $k-\omega$ و (SST) $k-\omega$ استفاده شد ولی تفاوت چشمگیری در پیش‌بینی مسیر حرکت جت ریزشی تحت فشار وجود نداشت و به همین خاطر در تمامی مدل‌ها از مدل (RNG) $k-\epsilon$ استفاده شد.

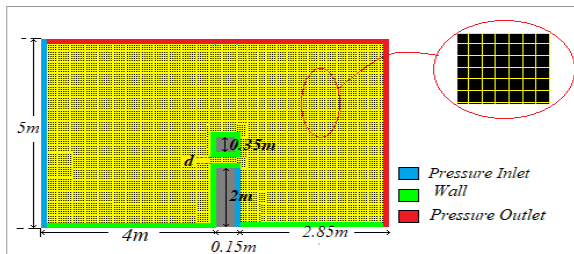
شبیه‌سازی عددی جریان عبوری از دریچه در یک کانال روباز، یک جریان دو فازی و متلاطم می‌باشد. همانطور که اشاره شد در تحقیق حاضر از روش VOF که توسط Hirt و Nichols (۱۹۸۱) ارائه شده است استفاده شد. که رابطه انتقالی کسر سیال در آن با رابطه (۱۵) بیان می‌شود.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial U_i F}{\partial X_i} = 0 \quad (15)$$

این روش بر این اساس استوار است که دو یا چند سیال با هم ترکیب نمی‌شوند. پس مختصات و مقادیر هر سلول به طور خاص نشان دهنده یکی از فازها است که بسته به مقادیر نسبی حجمی بین صفر و یک متغیر است. در شبیه‌سازی جریان دو فازی شامل آب‌وهوا، در صورتی که سلولی پر از هوا باشد، مقدار نسبت حجمی صفر ($F=0$)، در صورتی که کاملاً پر از آب باشد، مقدار یک ($F=1$) و در صورتی که سلول هر دو سیال را داشته باشد، مقدار عددی بین صفر و یک ($0 < F < 1$) را به خود اختصاص می‌دهد که تحت این شرایط امان سطح سیال آزاد دارد (Ansys Fluent، ۲۰۱۵).

- شبکه‌بندی و شرایط مرزی:

از آنجایی که در مدل‌سازی باروش‌های عددی، شبکه‌بندی محاسباتی می‌تواند روی نتایج مدل تأثیر بگذارد، در این قسمت تأثیر شبکه‌بندی بر نتایج مدل‌سازی بررسی شد. برای ایجاد شبکه قابل فراخوانی در نرم‌افزار انسیس فلوئنت، ابتدا در نرم‌افزار GAMBIT هندسه دو بعدی مدل طراحی و سپس از قسمت Meshing محدودده مسئله شبکه‌بندی شد. برای این منظور در تحقیق حاضر



شکل ۴- شماتیک شبکه بندی و اعمال شرایط مرزی در شبیه سازی عددی

نتایج و بحث

بعد از برقراری جریان در مدل ساخته شده در آزمایشگاه هیدرولیک، حدود ۳۵۰ سری مختصات x و y از روی مسیرهای حرکتی جت های ریزشی تحت فشار (جت های خروجی از دریچه دایره ای شکل) که تحت تاثیر مقاومت هوا قرار گرفته اند استخراج شد. زمانی که جت های ریزشی تحت فشار به صورت افقی خارج می شوند معادله حرکت رابطه (۶) به صورت رابطه (۱۶) ساده می شود.

$$y = -\frac{x^2}{4H} \rightarrow x = 2\sqrt{(-y)H} \quad (16)$$

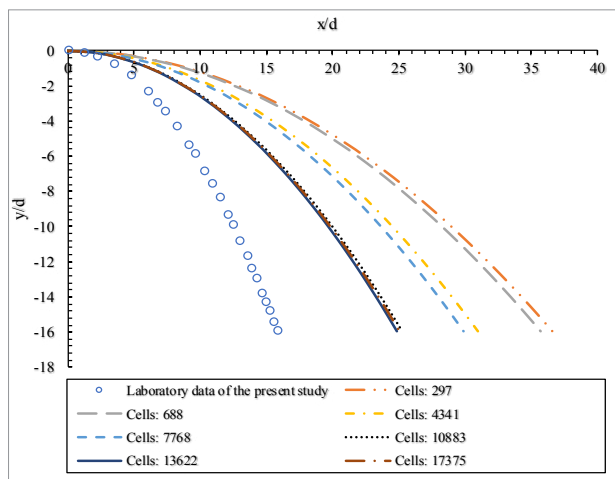
معادله (۱۶) حرکت یک جت خروجی تحت فشار که تحت تاثیر مقاومت هوا قرار نگرفته است را توصیف می کند. در واقع طول افقی جت تحت فشار محاسبه شده با استفاده از این رابطه بیشتر از مقدار واقعی آن به خاطر اثر مقاومت هوا می باشد. با استفاده از داده های آزمایشگاهی تحقیق حاضر نسبت به تعدیل و اصلاح رابطه (۱۶) به فرم روابط (۱۷) و (۱۸) اقدام شد. لازم به توضیح است در تحقیق حاضر به دو روش نسبت به اصلاح رابطه (۱۶) اقدام شد که در روش اول با استفاده از ضریب تعدیل، رابطه (۱۶) به فرم رابطه (۱۷) اصلاح و در روش دوم با برازش یک رابطه برای اختلاف بین مقادیر استخراجی از معادله پرتابه و نتایج آزمایشگاهی اقدام شد و در رابطه (۱۶) به فرم رابطه (۱۸) اعمال شد.

$$x = 2\sqrt{\lambda(-y)H} \quad (17)$$

$$x = 2\sqrt{(-y)H} - \Delta \quad (18)$$

در رابطه (۱۷)، λ ضریبی برای اصلاح مسیر حرکت جت تحت فشار می باشد که تاثیر مقاومت هوا را در معادله پرتابه وارد می کند. همچنین در رابطه (۱۸)، Δ رابطه ای برای اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی متاثر از مقاومت هوا و مقادیر متناظر استخراج شده آن ها با استفاده از معادله پرتابه می باشد. در تحقیق حاضر با استفاده از ۷۵ درصد داده ها نسبت به استخراج ضریب اصلاح به روش سعی و خطا اقدام شد و با استفاده از ۲۵ درصد داده ها ضریب به دست آمده مورد آزمون قرار گرفت. نتایج نشان داد ضریب اصلاح ۰/۶۵ می تواند بهترین مسیر جت را ارائه دهد. همچنین با استفاده از ۷۵ درصد داده های آزمایشگاهی تحقیق حاضر نسبت به برازش یک رابطه برای اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی متاثر از مقاومت هوا و

از المان های مربعی شکل استفاده شده است. در تحقیق حاضر برای جلوگیری از تاثیر اندازه شبکه ها در حل معادلات حاکم، آزمون مستقل از شبکه صورت گرفت و تعداد شبکه مناسب انتخاب شد. آنالیز حساسیت برای شبکه بندی نشان داد که با افزایش تعداد شبکه ها از ۲۹۷ به ۱۷۳۷۵ اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و عددی کمتر می شود. به طوری که از تعداد شبکه ۱۰۸۸۳ به بالا، اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و عددی تقریباً ثابت می ماند. این نشان می دهد که کوچکتر کردن ابعاد شبکه به بیش از مقدار بیان شده، تاثیری در دقت نتایج ندارد. به همین خاطر در این شبیه سازی، تعداد شبکه مناسب در حدود ۱۰۸۸۳ انتخاب شد. لازم به ذکر است تعداد گره ها در این حالت ۱۱۱۸۲ به دست می آید. در شکل (۳) آزمون مستقل از شبکه برای یک مشخصات هیدرولیکی و هندسی ثابت از جت ریزشی نشان داده شده است.

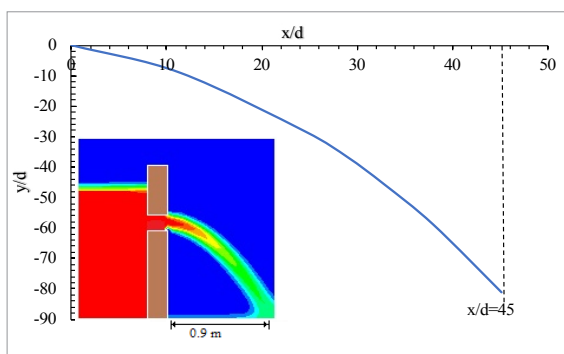


شکل ۳- آزمون مستقل از شبکه در تحقیق حاضر

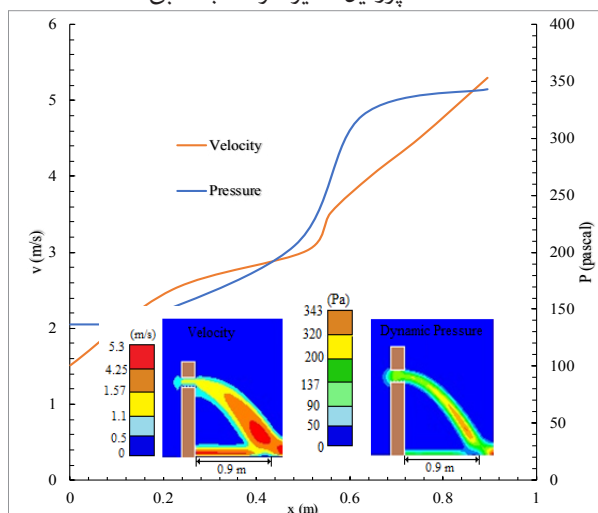
یکی از مهمترین مسائل در شبیه سازی عددی، تعریف مناسب شرایط مرزی^{۱۱} است که در تحقیق حاضر شرایط مرزی برای جریان ورودی به صورت فشار جریان آب^{۱۲}، برای جریان خروجی به صورت فشار خروجی صفر^{۱۳}، برای وجه پایین دست سازه (برای هوادهی وجه پایین دست سازه و جلوگیری از چسبیدن جت آب به بدنه سازه) از شرط مرزی فشار جریان آب، برای کف و خود سازه داخل کانال شرط مرزی دیواره^{۱۴} با زبری ۰/۰۰۰۱ و برای بالای کانال شرط مرزی فشار خروجی صفر معرفی شد. همچنین لازم به توضیح است در شرط مرزی فشار آب، پارامترهای عمق، سرعت جریان، شعاع هیدرولیکی و شدت آشفتگی^{۱۵} در بالادست کانال به نرم افزار وارد شده و روباز بودن کانال بالادست مشخص می شود. شبکه بندی تحقیق حاضر و شرایط مرزی در شکل (۴) نشان داده شده است. شبیه سازی عددی جریان در تحقیق حاضر به صورت غیردائمی و با گام زمانی ۰/۱۶۰۰۱ ثانیه انجام شد و تا رسیدن به حالت دائمی (مستقل از زمان) ادامه یافت.

این خطا به طور متوسط حدود ۷۰ درصد کمتر می‌شود. به بیان دیگر، متوسط خطای رابطه (۱۹) با ضریب اصلاح ۰/۶۵ به حدود ۸ درصد می‌رسد که نشانگر دقت بالای معادله در محاسبه مسیر حرکت جت ریزشی تحت فشار است. همچنین رابطه (۲۰) نیز مسیر حرکت جت ریزشی را با خطای ۹ درصدی محاسبه می‌کند که خطای معادله پرتابه را حدود ۶۶ درصد کاهش می‌دهد. با استفاده از رابطه (۱۹) و (۲۰)، و با در دست داشتن قطر دریچه و ارتفاع آب مخزن سد از مرکز دریچه می‌توان مسیر حرکت جت ریزشی تحت فشار را با خطای خیلی کمتری محاسبه نمود. همچنین این معادلات می‌توانند محل برخورد جت تحت فشار به زمین را دقیقتر از معادله پرتابه ارائه دهند که در طراحی حوضچه‌های آرامش و محل جامایی سازه‌های پایاب سدها اهمیت دارد.

در شکل (۶ الف، ب) به ترتیب نمودار مسیر حرکت جت، نمودار تغییرات سرعت جریان عبوری از دریچه به همراه تغییرات فشار بعد از شبیه‌سازی عددی به روش حجم محدود با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت در شرایطی که قطر دریچه ۲ سانتی‌متر، ارتفاع آب مخزن سد از مرکز دریچه برابر ۱۴/۵ سانتی‌متر و سرعت در محل خروج جریان از دریچه برابر ۱/۶۵ متر بر ثانیه باشد، نشان داده شده است.



الف- پروفیل مسیر حرکت جت آبی



ب- تغییرات سرعت و فشار دینامیکی جریان

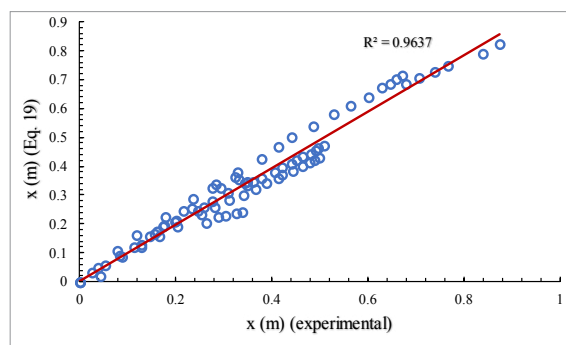
شکل ۶- نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی جریان عبوری از دریچه

مقادیر استخراج شده آن‌ها با استفاده از معادله پرتابه اقدام شد. روابط (۱۹) و (۲۰) به ترتیب ضریب اصلاح اعمال شده در رابطه (۱۷) و معادله برازش داده شده برای رابطه (۱۸) را نشان می‌دهند.

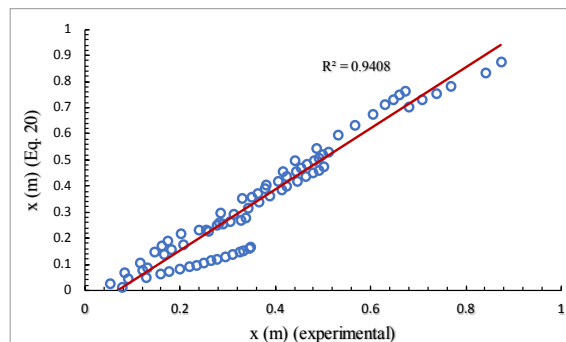
$$x = 2\sqrt{-0.65 \times H \times y} \quad (19)$$

$$x = 2\sqrt{-y \times H} - (0.517d + 0.827H) \quad (20)$$

در روابط فوق، x و y مختصات خط مرکزی (هسته) جت تحت فشار، H ارتفاع آب مخزن سد از مرکز دریچه و d قطر دریچه دایره‌ای شکل می‌باشند. در شکل (۵ الف و ب) نمودار پراکندگی داده‌ها برای ۲۵ در صد داده‌ها برای روابط (۱۹) و (۲۰) نشان داده شده است.



الف- پراکندگی داده‌های رابطه (۱۹) با استفاده از داده‌های آزمون (۲۵٪ داده‌ها)

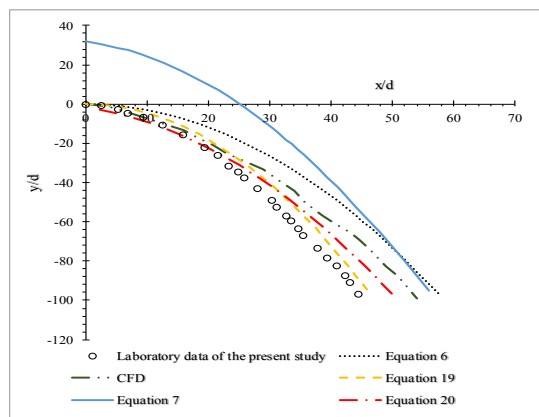


ب- پراکندگی داده‌های رابطه (۲۰) با استفاده از داده‌های آزمون (۲۵٪ داده‌ها)

شکل ۵- نمودار پراکندگی نقاط برای داده‌های آزمون

باتوجه به شکل (۵ الف و ب) مشاهده می‌شود اکثر داده‌ها در نزدیکی نیمساز ناحیه اول واقع شده‌اند که نشانگر دقت بالای روابط ارائه شده برای محاسبه مسیر حرکت جت تحت فشار می‌باشند. همچنین مقدار بالای ضریب همبستگی این نمودارها دقت بالای این روابط را در پیش‌بینی مسیر حرکت جت ریزشی تحت فشار نشان می‌دهد. با تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی و مقایسه آن با نتایج حاصل از روابط پرتابه، مشخص شد مسیر حرکت جت ریزشی تحت فشار مستخرج از روابط، در مقایسه با مقدار واقعی آن (داده‌های آزمایشگاهی) به طور متوسط حدود ۲۶ درصد خطا دارد. با گنجاندن ضریب اصلاح ۰/۶۵ در معادله پرتابه

می‌دهد. این خطای زیاد در ابتدای حرکت جت ریزشی تحت فشار، ناشی از وجود عدد ثابت در رابطه ارائه شده توسط سلمان زاده و احدیان (۱۳۹۵) است، همچنین چون ارتفاع ریزش در کار تحقیقاتی آن‌ها کم است مقاومت هوا نتوانسته است تاثیر خودش را بر مسیر حرکت جت ریزشی بگذارد. باتوجه به شکل (۷) اگر داده‌های آزمایشگاهی به عنوان مبنا در نظر گرفته شوند، بیشترین خطا مربوط به معادله پرتابه (رابطه ۶) و کمترین خطا مربوط به معادلات ارائه شده در تحقیق حاضر (معادله پرتابه که با ضریب $0/65$ اصلاح شده است و همچنین رابطه (۲۰)) می‌باشد. همچنین مسیر شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار انسیس فلونت بهتر از معادله پرتابه نسبت به ارائه مسیر حرکت جت ریزشی تحت فشار اقدام می‌کند. به بیان دیگر مسیر حرکت جت تحت فشار استخراج شده از روابط (۶)، (۷)، (۱۹)، (۲۰) و مسیر حرکت استخراج شده از نرم‌افزار انسیس فلونت نسبت به داده‌های آزمایشگاهی به طور متوسط و به ترتیب خطای ۲۶، ۲۵، ۸، ۹ و ۲۳ درصدی دارد که رابطه ارائه شده در این تحقیق دقت بیشتری دارد (قابل ذکر است این خطاها متوسط بوده و در بعضی شرایط ممکن است بیشتر و در بعضی شرایط کمتر از این اعداد باشند). در حالت کلی می‌توان بیان کرد مقاومت هوا تاثیر زیادی بر مسیر حرکت جت ریزشی عبوری از دریچه داشته که به وسیله ضریبی در رابطه پرتابه می‌توان آن را اصلاح نمود و ضروری می‌باشد که مقاومت هوا در طراحی‌ها مورد توجه قرار گیرد.



شکل ۷- مقایسه معادله مسیر روابط مختلف با نتایج آزمایشگاهی

تاثیر قطر دریچه و ارتفاع آب مخزن سد از مرکز دریچه بر طول افقی جت ریزشی:
در تحقیق حاضر به بررسی آزمایشگاهی تاثیر قطر دریچه و ارتفاع آب مخزن سد از مرکز دریچه بر طول افقی جت ریزشی تحت فشار پرداخته شد. در شکل (۸ الف و ب) تاثیر این دو پارامتر بر طول افقی جت ریزشی تحت فشار نشان داده شده است.

باتوجه به شکل (۶ الف) مشاهده می‌شود جت تحت فشار بعد از به حالت پایدار رسیدن در $x/d=45$ به زمین برخورد می‌کند که با در نظر گرفتن قطر دریچه (قطر دریچه برابر ۲ سانتیمتر)، مشخص می‌شود که جت ریزشی در فاصله $0/9$ متری از بدنه سازه به زمین برخورد می‌کند. باتوجه به شکل (۶ ب) و مقایسه آن‌ها، می‌توان بیان کرد بیشترین فشار دینامیکی در محل برخورد جت ریزشی به زمین اتفاق می‌افتد که در این نقطه سرعت جریان نیز بیشینه است. به بیان دیگر، در این مدل، مقدار فشار دینامیکی در محل برخورد جت ریزشی به زمین به 343 پاسگال می‌رسد که نسبت به لبه دریچه ۱۵۰ درصد افزایش می‌یابد. همچنین میزان سرعت در محل برخورد جت ریزشی تحت فشار به زمین به مقدار $5/3$ متر بر ثانیه می‌رسد که با افزایش ۲۵۰ درصدی نسبت به لبه دریچه، به زمین برخورد می‌کند. به طور کلی باتوجه به شکل (۶) و مقایسه قسمت‌های الف و ب در این شکل مشاهده می‌شود بعد از به حالت تعادل رسیدن حل عددی در نرم‌افزار انسیس فلونت، در طول مسیر حرکت جت ریزشی سرعت و فشار افزایش می‌یابد و در محل برخورد به زمین به بیشترین مقدار خود می‌رسند. لازم به توضیح است نمودارهای شکل (۶) برای نمونه ارائه شده است. روند تغییر سرعت و فشار دینامیکی در مدل‌های مختلف مشابه شکل (۶ ب) بوده ولی مقادیر متفاوتی دارند. به طور کلی نتایج شبیه‌سازی‌های عددی در نرم‌افزار انسیس فلونت و در محدوده شبیه‌سازی تحقیق حاضر، نشان داد به طور متوسط سرعت جریان با افزایش ۲۴۲ درصدی و همچنین فشار دینامیکی با افزایش ۱۴۵ درصدی نسبت به لبه دریچه به زمین برخورد می‌کند. این نتایج نشان می‌دهد در طراحی حوضچه‌های آرامش در پایاب سدها باید توجه ویژه‌ای به مقدار سرعت و فشار ناشی از آن در محل برخورد جت ریزشی تحت فشار به زمین شود. در صورت عدم توجه به این موضوع و همچنین در صورت پیش‌بینی اشتباه محل برخورد جت ریزشی تحت فشار به زمین، حوضچه آرامش و همچنین پایاب سدها می‌تواند دستخوش تغییرات زیاد و فرسایش شود.

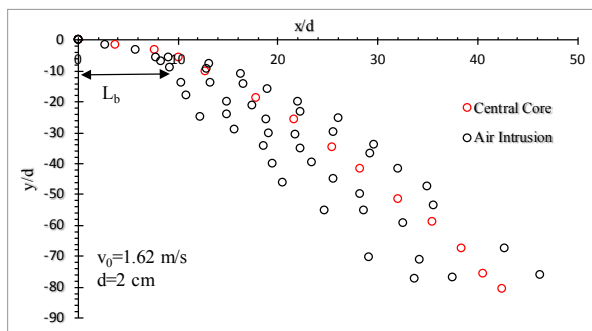
- مقایسه معادله مسیر:

در این قسمت از تحقیق به بررسی و مقایسه مسیر حرکت جت ریزشی تحت فشار با استفاده از نتایج حاصل از کار آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی و همچنین معادلات پرتابه ارائه شده توسط سایر محققین انجام می‌شود. در شکل (۷) مقایسه‌ای بین مسیر حرکت جت ریزشی تحت فشار با استفاده از روابط مختلف ارائه شده است.

باتوجه به شکل (۷) ملاحظه می‌شود رابطه (۷) (رابطه ارائه شده توسط سلمان زاده و احدیان، ۱۳۹۵) در ابتدا خطای زیادی دارد، این رابطه نسبت به نتایج آزمایشگاهی ۲۵ درصد خطا نشان

گسستگی جت ریزشی تحت فشار:

یکی از مهمترین پارامترهای جت‌های ریزشی، طول شکست آن‌ها (L_b) می‌باشد که این طول از هنگام خروج جت از نازل آغاز شده و تا لحظه کاملاً توسعه یافتگی جت به صورت یک هسته متراکم از آب که در مقابل ورود هوا به درون خود مقاومت می‌کند ادامه می‌یابد. در شکل (۹) هسته مرکزی و نقطه گسستگی جت ریزشی تحت فشار با شرایط سرعت اولیه جت برابر $1/62$ متر بر ثانیه و قطر خروجی جت برابر 2 سانتی‌متر ارائه شده است.



الف- طول شکست جت ریزشی

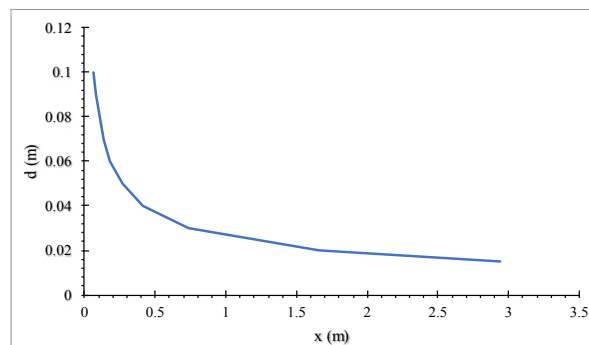


ب- تشخیص نقطه ورود هوا توسط عکس‌برداری در آزمایشگاه گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز

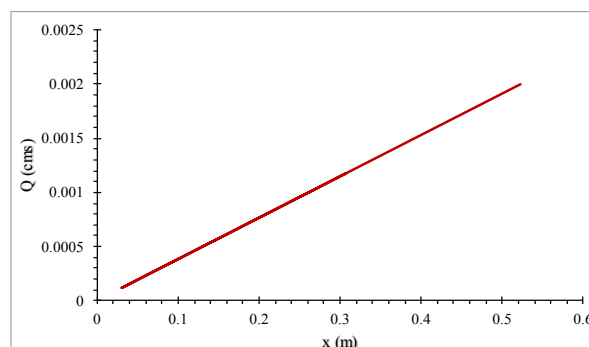
شکل ۹- نقطه ورود هوا به جت ریزشی تحت فشار و طول شکست آن

باتوجه به شکل (۹) مشاهده می‌شود در شرایط یاد شده در روی نمودار، نقطه ورود هوا در جت ریزشی تحت فشار در حدود 18 سانتی‌متری در امتداد افق اتفاق می‌افتد. لذا در این شرایط، طول شکست جت ریزشی برابر 18 سانتی‌متر است ($x/d=9$ و $d=2$ cm).

لازم به توضیح است شکل (۹) با استفاده از تصویر دوربین عکاسی مستقر در آزمایشگاه و استفاده از نرم‌افزار Plot Digitizer در دو حالت رسم شده است. در حالت اول مسیر حرکت هسته مرکزی جت ریزشی تحت فشار از روی عکس‌ها استخراج شده و در حالت دوم قطرات سقوط جت ریزشی گسسته شده انتخاب و مختصات نقاط آن‌ها استخراج شد و در نهایت شکل (۹) رسم شد.



الف- تاثیر قطر دریچه بر طول افقی جت ریزشی تحت فشار (برای دبی ثابت یک لیتر بر ثانیه)



ب- تاثیر ارتفاع آب مخزن سد از مرکز دریچه بر طول افقی جت ریزشی تحت فشار (برای قطر ثابت 5 سانتی‌متر)

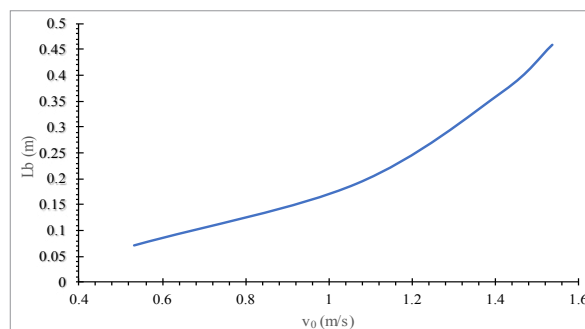
شکل ۸- تاثیر قطر دریچه و ارتفاع آب مخزن سد از مرکز دریچه بر طول افقی جت ریزشی تحت فشار

شکل (۸-الف) نشان می‌دهد برای یک قطر ثابت (قطر دریچه برابر 5 سانتی‌متر با افزایش دبی جریان (افزایش ارتفاع آب مخزن سد از مرکز دریچه) و به دنبال آن با افزایش سرعت جریان خروجی از دریچه، طول افقی جت ریزشی بیشتر می‌شود. همچنین باتوجه به شکل (۸-ب) با افزایش قطر دریچه در یک دبی ثابت، طول افقی جت ریزشی کمتر می‌شود. به عبارت دیگر، با افزایش قطر دریچه عبور جریان در یک دبی ثابت بالادست و باتوجه به معادله پیوستگی و معادله پرتابه، جریان بیشتری از دریچه خارج می‌شود و سرعت جریان خروجی از دریچه کمتر می‌شود و به دنبال آن، طول افقی جت ریزشی تحت فشار کمتر می‌شود. همچنین باتوجه به معادله پرتابه و مشاهدات آزمایشگاهی می‌توان اظهار کرد با افزایش بار آبی و به دنبال آن با افزایش دبی جریان عبوری از دریچه، زاویه بردار سرعت اولیه از افق کمتر و مسیر طی شده توسط جت تحت فشار بیشتر می‌شود. لازم به توضیح است شکل (۸) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی رسم شده است.

نتیجه گیری

با پیشرفت تکنولوژی سدسازی ارتفاع سدها در سالهای اخیر افزایش یافته است، افزایش ارتفاع سد علاوه بر مزایا، سبب بروز مشکلاتی می شود که می توان به افزایش سرعت جریان آب در سازه های هیدرولیکی چون تخلیه کننده های تحت فشار اشاره کرد. با افزایش سرعت جریان در مقطع خروجی جت های ریزشی تحت فشار، جت آبی می تواند خسارات جبران ناپذیری به سازه های پایین دست سدها وارد نماید. در مورد جت های پرتابی مطالعات اندکی صورت گرفته است. در تحقیق حاضر به بررسی عددی و آزمایشگاهی مسیر حرکت جت های تحت فشار پرداخته شد. ارتفاع جت پرتابی از دریچه سد در مدل آزمایشگاهی برابر ۲ متر بود. نتایج نشان داد مسیر حرکت این جت ها متأثر از مقاومت هوا بوده و فاصله محل برخورد جت ریزشی به زمین از پای سازه (طول افقی جت ریزشی) در کار آزمایشگاهی کمتر از مقدار محاسبه شده آن با استفاده از روابط پرتابه می باشد. به عبارت دیگر رابطه پرتابه حدود ۲۶ درصد خطا دارد که در تحقیق حاضر نسبت به اصلاح و تعدیل آن اقدام شد. همچنین تاثیر ارتفاع آب مخزن سد از مرکز دریچه و قطر مقطع خروجی جریان بر طول افقی جت تحت فشار بررسی شد و نتایج نشان داد با افزایش ارتفاع آب مخزن سد از مرکز دریچه (زمانی که قطر مقطع خروجی ثابت است) و همچنین با کاهش قطر دریچه (زمانی که دبی ثابت است)، برد جت ریزشی بیشتر می شود. همچنین رابطه (۶) که در چندین منابع مختلف برای پیش بینی مسیر حرکت جت ریزشی ارائه شده است نباید برای تعیین مسیر جت های تحت فشار استفاده شود. علاوه بر این، نتایج شبیه سازی عددی نشان داد سرعت و فشار در محل برخورد جت ریزشی به زمین در پای سازه بیشترین مقدار خود را دارد که در یک نمونه خاص فشار دینامیکی با افزایش ۱۵۰ درصدی و سرعت با افزایش ۲۵۰ درصدی نسبت به لبه دریچه به زمین می رسند که باید در طراحی ها مد نظر قرار داده شود. همچنین طول شکست جت ریزشی تحت فشار در تحقیق حاضر مورد بحث و بررسی قرار گرفت و مشخص شد با افزایش سرعت، ورود هوا به جت ریزشی در فاصله دورتری نسبت به افق صورت می گیرد و طول شکست جت ریزشی بیشتر می شود. به طور کلی در صورت پیش بینی ضعیف و یا نادرست مسیر حرکت جت های آبی خروجی از سدها و به خصوص محل برخورد جت تحت فشار در پایین دست سدها، ممکن است سازه های موجود در پایین دست سدها، حوضچه استخراتی و کانال پایین دست دچار تخریب شوند. نتایج تحقیق حاضر می تواند در جامایی دقیق حوضچه های آرامش در پایاب سدها موثر واقع شوند. با در دست داشتن قطر دریچه و ارتفاع آب مخزن سد از مرکز دریچه می توان مسیر حرکت جت ریزشی تحت فشار را با خطای خیلی کمتری محاسبه نمود.

پس از خروج آب از دهانه نازل، قطرات منحصر به فرد آب، تحت تاثیر وزن ذره، به تدریج سرعتشان به سرعت حد می رسد. در نتیجه، ورود هوا به درون جت هنگامی رخ می دهد که نیروی مقاوم (دراگ) ناشی از هوا دقیقاً برابر با وزن همان قطره منحصر به فرد شود. سرعت نسبتاً زیاد جت مایع باعث ایجاد ناپایداری هایی روی سطح آن می شود که خود را به صورت امواج سطحی نشان می دهند. حال هرگاه جت پر سرعتی از مایع در هوا رها شود، این امواج سطحی رشد کرده و سطحی موجدار برای جت ایجاد می کند، ولی کشش سطحی نمی خواهد که سطح آزاد مایع این چنین دستخوش تغییرات شود. جدال بین امواج سطحی و کشش سطحی در نهایت منجر به پیروزی کشش سطحی می شود. کشش سطحی برای نشان دادن حاکمیت خود به مساحت بیشتری نیاز دارد. این موضوع باعث از هم گسیختگی و تکه تکه شدن جت مایع شده و قطرات مایع ایجاد می شوند. بنابراین، نخست گسستگی جت مایع رخ می دهد و سپس قطرات بزرگ ایجاد شده به قطرات ریز تقسیم می شوند. طول شکست جت های ریزشی به عوامل مختلفی از جمله سرعت اولیه جت، قطر جت، جرم مخصوص سیال، لزجت دینامیکی، کشش سطحی، شتاب ثقل و... بستگی دارد. در شکل (۱۰) روند تغییر طول شکست نسبت به سرعت نشان داده شده است.



شکل ۱۰- روند تغییر طول شکست نسبت به سرعت

باتوجه به شکل (۱۰) مشاهده می شود با افزایش سرعت اولیه جت ریزشی تحت فشار، طول شکست جت در راستای افق بیشتر می شود. دو عدد خیلی مهم نیز در پدیده گسستگی کاربرد دارند که یکی عدد رینولدز و دیگری عدد وبر است. بزرگ بودن عدد رینولدز نشان دهنده قدرتمند بودن اغتشاشات درون جریان و کوچک بودن عدد وبر به معنی قدرتمند بودن نیروهای کشش سطحی است. با افزایش سرعت، مقدار عددی عدد وبر بیشتر شده ولی نیروهای کشش سطحی کمتر می شوند. با کمتر شدن نیروهای کشش سطحی، طول شکست بیشتر می شود. به عبارت دیگر، در این شرایط، نیروهای کشش سطحی به مسافت بیشتری برای غلبه به نیروهای امواج سطحی نیاز دارند و لذا طول شکست بیشتر می شود.

- Ahadiyan, J., & Musavi Jahromi, S.H. (2009). Effects of jet hydraulic properties on geometry of trajectory in circular buoyant jets in the static ambient flow. *Journal of Applied Sciences*, 9(21), 3843-3849. DOI: [10.3923/jas.2009.3843.3849](https://doi.org/10.3923/jas.2009.3843.3849)
- Ansyes Fluent. (2015). *Ansyes Fluent Tutorial Guide*, South pointe, 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317, USA.
- Akbari, M., Salmasi, F., Arvanaghi, H., Karbasi, M., & Farsadizadeh, D. (2019). Application of Gaussian Process Regression Model to Predict Discharge Coefficient of Gated Piano Key Weir. *Water Resources Management*, 33(11), 3929-3947. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02343-3>
- Ervine, D.A., & Falavey, H.T. (1987). Behavior of Turbulent Jets in Atmosphere and in Plunge Pools. *Proceeding of The Institution of the Civil Engineering*, Part 2, 83(1), 295-314. DOI: [10.1680/iicep.1987.353](https://doi.org/10.1680/iicep.1987.353)
- Eggers, J. (1997). Nonlinear Dynamics and Breakup of Free Surface Flows. *Reviews of Modern Physics*, 69(3), 865-929. DOI: [10.1103/REVMODPHYS.69.865](https://doi.org/10.1103/REVMODPHYS.69.865)
- Hirt, W., & Nichols, B.D. (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, *Journal of Computational Physics*, 39, 201-225. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(81\)90145-5](https://doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5)
- Kamoi, A., & Tanaka, H. (1972). Measurements of wall share stress, wall pressure and fluctuations in the stagnation region produced by oblique jet impingement, *Fluid dynamic measurements conference*. University of Leicester, United Kingdom.
- Malekzadeh, F., Salmasi, F., Abraham, J., & Arvanaghi, H. (2022). Numerical investigation of the effect of geometric parameters on discharge coefficients for broad-crested weirs with sloped upstream and downstream faces. *Applied Water Science*, 12, 1-15, <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01631-5>
- Nourani, B., Arvanaghi, H., & Salmasi, F. (2021). Effects of different configurations of sloping crests and upstream and downstream ramps on the discharge coefficient for broad-crested weirs. *Journal of Hydrology*, 603(B), 126940. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126940>

- 1-Plunging pool
- 2-Air-Water Bubbly Jets
- 3-Computational fluid dynamics
- 4-Convective
- 5-Volume of Fluid (VOF) Model
- 6-Pressure-Implicit with Splitting of Operator
- 7-Second Order Upwards
- 8-Reynolds Stress Model
- 9-Detached Eddy Simulation
- 10-Large Eddy Simulation
- 11-Boundary Conditions
- 12-Pressure Inlet
- 13-Pressure Outlet (Zero Pressure)
- 14-Wall
- 15-Turbulent Intensity
- 16-Time step

منابع

- بهره بر، امیررضا، حیدرنژاد، محمد، مسجدی، علی رضا، و بردبار، امین. (۱۴۰۰). مطالعه عددی و آزمایشگاهی ترکیب سرریز کنگره‌ای با روزنه و تأثیر آن بر ضریب دبی جریان. *مجله علوم آب و خاک*، ۲۵(۲)، ۹۱-۱۰۵. DOI: [10.47176/jwss.25.2.38095](https://doi.org/10.47176/jwss.25.2.38095)
- سلمانزاده، سمیرا، و احدیان، جواد. (۱۳۹۵). پراکنش حدی جریان جت خروجی در محیط هم فاز و غیر هم فاز، *فصلنامه علوم و مهندسی آبیاری*، ۳۹(۱)، ۹۳-۱۰۷. DOI: [10.22055/JISE.2016.12015](https://doi.org/10.22055/JISE.2016.12015)
- سلماسی، فرزین، نورانی، بهرام، نوروزی، رضا، و رضایی، فائزه. (۱۴۰۰). بررسی رابطه دبی-اشل و ضریب دبی جریان در سرریزهای لبه تیز پلان مثلثی. *نشریه مهندسی عمران امیرکبیر*، ۵۳(۵)، ۱۶۸۹-۱۷۰۴. DOI: [10.22060/ceej.2019.16931.6399](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16931.6399)
- غفاری، سعید، اقبالزاده، افشین، و جوان، میترا. (۱۳۹۵). بررسی عددی اثرات ارتفاع تاج روزنه‌ی جانبی مستطیلی لبه تیز بر الگو و مشخصات جریان در اطراف روزنه جانبی. *مهندسی عمران مدرس*; ۱۶(۲۰)، ۱۲۹-۱۳۹. URL: <http://mcej.moc.ac.ir/article-16-1034-fa.html>
- مرکز تحقیقات آب. (۱۳۸۱). مدل هیدرولیکی تخلیه کننده تحتانی سد البرز. گزارش نهایی. وزارت نیرو. تهران، ایران.
- مرکز تحقیقات آب. (۱۳۸۲). مدل هیدرولیکی تخلیه کننده تحتانی سد گاوشان. گزارش نهایی. وزارت نیرو. تهران، ایران.

- Salmasi, F., & Abraham, J. 2022. Multivariate Nonlinear Regression for Predicting Free Falling Jet Scouring: An Experimental Study. *Iranian Journal of Science and Technology. Transactions of Civil Engineering*, 46, 3859–3870. <https://doi.org/10.1007/s40996-022-00817-w>
- Salazar, F., San-Mauro, J., Celigueta, M., & Onate, E. (2016). Air demand estimation in bottom outlets with the particle finite element method. *Journal of Computational Particle Mechanics*, 4(3), 345-356. DOI: [10.1007/s40571-016-0117-4](https://doi.org/10.1007/s40571-016-0117-4)
- USBR, US Bureau of Reclamation. (1960). Design of small dams. United States Department of the Interior. United States Government Printing Office, Denver, USA. pp: 282–291.
- USBR, US Bureau of Reclamation. (1976). Design of gravity dams. United States Department of the Interior. United States Government Printing Office. Denver, USA. pp: 198–199.
- USBR, US Bureau of Reclamation. (1977). Design of arch dams. United States Department of the Interior. United States Government Printing Office. Denver, USA. pp: 312–313.
- USACE, U.S. Army Corps of Engineers. (1980). Hydraulic design criteria. Coastal and Hydraulics Laboratory. Engineer Research and Development Center. Waterways Experiment Station. Vicksburg, USA. pp: 8-12.
- Zhang, W., & Zhu, D. (2014). Trajectories of air-water bubbly jets in cross flows. *Journal of Hydraulic Engineering. American Society of Civil Engineers* 140(7), 06014011. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.000088](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.000088)