

# بررسی احتمال کاویتاسیون و آبشستگی حوضچه آرامش در سرریز سد خاکی سهند با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D

سجاد پیربوداچی\* استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی خوی، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران،  
 s.pirboudaghi@uut.ac.ir

## چکیده

سرریزها یکی از سازه‌های هیدرولیکی مهم یک سد می‌باشند که در زمان سیلاب در جهت حفظ سلامت سد اعمال وظیفه می‌کند. در این تحقیق سرریز اوجی شکل آزاد سد سهند، با نرم‌افزار Flow-3D مدل‌سازی و تاثیر پارامترهای هیدرولیکی موثر در عملکرد این سازه، وقوع کاویتاسیون و آبشستگی حوضچه آرامش مورد بررسی قرار می‌گیرد و با مدل آزمایشگاهی صحت‌سنجی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد در سه ناحیه از طول سرریز سرویس سد سهند کاویتاسیون ایجاد می‌شود. قسمت تاج سرریز، قسمت تغییر شیب میانه شوت و پرتاب‌کننده جامی شکل، قسمت‌هایی هستند که دارای مشکل کاویتاسیون می‌باشند. برای قسمت تاج سرریز، باید منحنی لبه آبریز (اوجی) اصلاح شده و قسمت مستعد کاویتاسیون بلندتر شود تا خلا به وجود آمده و امکان کاویتاسیون از بین برود. اگر با این کار نتیجه‌ای حاصل نشد، هوادهی جریان باید انجام شود. در قسمت میانه شوت باید از هوادهی از طریق ایجاد شکاف در کف استفاده کرد. همچنین لبه انتهایی پرتاب‌کننده جامی نباید صاف اجرا شده و به صورت منحنی‌وار باشد. عمق آبشستگی برای پرتاب‌کننده جامی شکل سرریز سد سهند حدود ۷/۶ متر بدست می‌آید که برای مقابله با آن نیاز به ساماندهی پایین‌دست سرریز با استفاده از استخر حفر شده، حفاظت و سنگ‌چینی می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** کاویتاسیون، مدل عددی، سرریز لبه آبریز، آبشستگی، سد خاکی، Flow-3D.

## Investigating the possibility of cavitation and scouring of the stilling basin in the spillway of the Sahand earth dam using Flow-3D software

S. Pirboudaghi

Engineering faculty of Khoy, Urmia university of technology, Urmia, Iran

### Abstract

Spillways are one of the important hydraulic structures of a dam, which perform their duties during floods in order to maintain the health of the dam. In this research, the free ogee spillway of Sahand dam is analyzed with Flow-3D modeling software and the effective hydraulic parameters on the performance of this structure including the occurrence of cavitation and scouring of the stilling basin have studied and verified with lab model. The results show that cavitation occurs in three areas along the service spillway of Sahand Dam. The ogee crest part of the spillway, the part that slope changes in the middle of the chute and the flip bucket are the parts that have the problem of cavitation. For the ogee crest part, the tip curve should be modified and the cavitation-prone part should be made longer to create a vacuum and eliminate the possibility of cavitation. If this doesn't work, aeration should be done. In the middle of the chute, aeration should be used by creating a gap in the floor. Also, the end edge of the flip bucket should not be smooth and reshaped as a curved surface. The scouring depth for the flip bucket of the Sahand dam spillway is about 7.6 meters, and to deal with it, it is necessary to organize the downstream of the spillway using an excavated pool, protection and a stone riprap.

**Keywords:** Cavitation, Numerical Model, Free Ogee Spillway, Scouring, Earth dam, Flow-3D.

### ۱- مقدمه

منطقه جدادشدگی کاهش یافته و ممکن است که به فشار بخار سیال برسد. در این صورت بلافاصله مایعی که در آن قسمت از مایع در جریان است به حالت جوشش درآمده و سیال به بخار تبدیل شده و حباب‌هایی از بخار بوجود می‌آید. این حباب‌ها پس از طی مسیر کوتاهی به منطقه‌ای با فشار بیشتر رسیده و متفجر می‌شود و تولید سر و صدا می‌کند و امواج ضربه‌ای ایجاد می‌کند. از آنجایی که سطوح تماس این حباب‌ها با بستر سرریز بسیار کوچک می‌باشند فشار فوق‌العاده زیادی در اثر این انفجارها وارد می‌شود. این عمل در یک مدت کوتاه و با تکرار زیاد انجام می‌شود که باعث خوردگی بستر سرریز می‌شود و به تدریج این خوردگی‌ها تبدیل به حفره‌های بزرگ می‌شوند [۲].

در سدها برای عبور آب‌های اضافی از سراب به پایاب از سرریز استفاده می‌شود. بیشتر شکست سدها در اثر عبور آب از روی تاج آن‌ها به وقوع می‌پیوندد که مهمترین عامل آن کافی نبودن ظرفیت سرریز است. بزرگترین مشکلی که این سرریزها را تهدید می‌کند، احتمال وقوع کاویتاسیون در سرریزهای بلند و در ناحیه‌هایی است که در آن‌ها جریان آب دارای سرعت زیاد می‌باشد. این پدیده معمولاً در پایه‌های دریچه‌ها بر روی سرریزها، در قسمت زیر دریچه های کشویی و انتهای شوت‌ها و قسمت لبه آبریز (اوجی)<sup>۱</sup> ممکن است رخ دهد. بطور مثال سطح آبروی سرریز که ۴۰ تا ۵۰ متر پایین‌تر از سطح تراز آب مخزن می‌باشد بطور حاد در معرض خطر کاویتاسیون قرار دارد [۱].

در طول سرریز در نواحی مستعد کاویتاسیون، فشار موضعی در

<sup>۱</sup> Ogee

صرفه جویی در وقت و هزینه توصیه می‌گردد ولی مشکلات خاص خود را دارد. از جمله صحت‌سنجی نتایج، شبیه‌سازی متناسب الگوی جریان، حل معادلات حاکم و خطاهای ناشی از دقت کامپیوتر و ... اشاره کرد.

اهم تحقیقات و مطالعات انجام پذیرفته در مورد کاویتاسیون را می‌توان در مطالعه و بررسی مدل‌های هیدرولیکی در ابتدا به های [۳] و کسیدی [۴] و همچنین فالوی [۲] روی سرریزها و شوت‌ها اشاره کرد. وانگ و خی [۵] به تاثیر جریان با سرعت زیاد بر روی رفتار نمونه‌های بتنی هیدرولیکی در معرض کاویتاسیون پرداختند. نی [۶] تاثیر زبری سطح، اثر زبری و ناهواری های بستر و نیز سایر خصوصیات جریان و بستر جامد در شکل گیری و شدت در کاویتاسیون سرریز در مقیاس آزمایشگاهی را بررسی کرد. این موضوع (زبری سطح) روی سرریز لبه آبریز هم بررسی شده و دارای نتایج مشابهی می‌باشد [۷]. یوسف و میکویچ [۸] با مدل کردن یک سد در مقیاس واقعی تاثیر کاویتاسیون و راهکار کاهش خسارت آن را نشان دادند.

بررسی عددی اثر همگرایی دیواره‌های سرریز روی مشخصات هیدرولیکی جریان در سرریز سد و احتمال وقوع پدیده ی کاویتاسیون توسط محققین صورت گرفته است [۹، ۱۰]. پدیده کاویتاسیون در پمپ‌ها هم شایع بوده که مورد بررسی محققین بوده است [۱۱].

تاثیر هوادهی برای کاهش خسارت کاویتاسیون و راهکار مقابله با آن توسط محققین زیادی از جمله چانسون [۱۲] بررسی شده که به صورت مروری توسط پوری و همکاران ارائه شده است [۱۳]. هوادهی در سد بلند بتن غلطکی به ارتفاع ۱۰۰ متر توسط آیدین و همکاران نشان می‌دهد تقاضای هوا در مدل واقعی بسیار بیشتر از مدل آزمایشگاهی یا عددی می‌باشد. مشخصات هوادهی را روی عملکرد شوت‌های پله‌ای [۱۴] یا بر روی سرریز سیفونی هم می‌توان بررسی کرد [۱۵]. سلماسی و آبراهام نشان دادند که سرریز پله‌ای با کاهش طول لایه مرزی و هوادهی سریعتر جریان عملکرد بهتری در مقابل کاویتاسیون نسبت به سرریز با سطح صاف برای سرریز سد زبردان دارد [۱۶].

برای بررسی کاویتاسیون روی سرریز سد می‌توان از روش‌های عددی استفاده کرد [۱۷]. شبیه‌سازی جریان روی این گونه سرریزها با استفاده از مدل‌های آشفتگی RNG به نتایج دقیق‌تری منجر می‌شود [۱۸، ۱۹]. شرایط هیدرولیکی و شکل پرتاب‌کننده جامی شکل در وقوع پدیده کاویتاسیون توسط وطن‌دوست و همکاران صورت گرفته است [۲۰]. مقایسه مدل عددی و آزمایشگاهی جریان با سرعت زیاد بر روی سرریز اوجی نشان می‌دهد که مدل عددی تطابق بسیار خوبی با مدل آزمایشگاهی داشته و می‌تواند به عنوان ابزاری برای شناسایی مناطق مستعد کاویتاسیون استفاده شود که باعث کاهش هزینه و دید بهتری می‌شود [۲۱]. از روش‌های هوش مصنوعی و داده کاوی هم می‌توان برای پهنه‌بندی خطر کاویتاسیون و پیدا کردن محل دقیق مناطق مستعد کاویتاسیون بهره برد [۲۲].

مطالعات زیادی با استفاده از نرم افزار Flow-3D یا مدل‌های آزمایشگاهی برای بررسی آبشستگی حوضچه آرامش انجام شده است که نشان می‌دهد نیاز به بررسی و طراحی مناسب همیشه وجود دارد [۲۳، ۲۴].

تحقیق حاضر در پی کاهش هزینه‌های جاری است که از طریق فرسایش سطح رخ داده و نیز افزایش بهره‌وری با کاهش کاویتاسیون و

آبشستگی می‌باشد. لذا مدلی ساده، به روز و کاربردی برای ارزیابی احتمال وقوع کاویتاسیون و همچنین آبشستگی در حوضچه آرامش سد خاکی سهند هشترود با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D مورد توجه قرار گرفت.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر حرکت یک سیال تراکم‌ناپذیر لزج در حالت آشفته، توسط معادلات ناویر استوکس متوسط‌گیری شده، موسوم به رینولدز<sup>۱</sup> بیان می‌شوند [۱].

معادله پیوستگی:

معادله پیوستگی جریان از قانون بقای جرم و با نوشتن معادله‌ی تعادل جرم برای یک المان سیال بدست می‌آید. بصورت کلی این معادله به شکل زیر نوشته می‌شود [۱]:

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

در آن،  $(V_F)$  نسبت حجم سیال عبوری از یک المان به حجم کل المان و  $(\rho)$  چگالی سیال است. مولفه‌های سرعت  $(u, v, w)$  در جهات  $(x, y, z)$  هستند.  $(A_x)$  نسبت مساحت سیال عبوری از یک المان به مساحت کل المان در جهت  $(x)$  است،  $(A_y)$  و  $(A_z)$  به طور مشابه نسبت سطوح جریان در جهات  $(y)$  و  $(z)$  هستند.  $(R)$  و  $(\xi)$  مربوط به نوع سیستم مختصات بوده در مختصات دکارتی  $R=1$  و  $\xi=1$  می‌باشد. معادله مومنتم:

معادله مومنتم در جهت  $x$  به صورت رابطه ذیل گسسته می‌شود بدیهی است برای سایر جهات قابل تأمیر می‌باشد.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + g_i + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij}) \quad (2)$$

در معادلات فوق:

$u_i$  مولفه سرعت در جهت  $x_i$  فشار  $P$  چگالی سیال،  $g_i$  شتاب ثقل در جهت  $x_i$  و  $\tau_{ij}$  تانسور تنش بوده که در حالت جریان آشفته به صورت معادله زیر بیان می‌شود:

$$\tau_{ij} = \left[ \rho(v + v_i) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \rho(k + v_i) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \quad (3)$$

جریان‌های آشفته، تنش برشی شامل دو جمله بوده و علاوه بر تنش برشی ناشی از مولفه متوسط جریان، تنش برشی دیگری ناشی از مولفه‌های نوسانی سرعت ایجاد می‌شود که به تنش‌های رینولدز معروف بوده و به صورت معادله زیر نشان داده می‌شود:

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u_i' u_j'} = \rho v_i \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (4)$$

در معادلات فوق  $v_i$  لزجت گردابه‌ای یا لزجت آشفتگی است که بر خلاف لزجت مولکولی از نوع خاصیت سیال نمی‌باشد بلکه تابع خصوصیات جریان و آشفتگی آن است و مقدار آن از سیالی به سیال دیگر و از نقطه‌ای به نقطه دیگر متفاوت است.  $\delta_{ij}$  (دلتای کرونکر) برای

<sup>1</sup> RANS

کاویتاسیون نرم افزار عدد مورد نظر وارد شده و زمان مشخصه برای از بین رفتن حباب های بخار آب در حد میکروثانیه در نظر گرفته شده است.

### ۳- سد سهپند هشتترو

سد سهپند یکی از بزرگترین سدهای خاکی کشور است که با وسعت عظیمش (به طول مخزن دوازده کیلومتر) بیشتر به یک دریاچه مانند است. حداکثر و حداقل ارتفاع آب مخزن سد ذخیره به ترتیب ۱۶۰۰ و ۱۵۶۰ متر از سطح دریا می باشد. نوع سد خاکی با هسته ناتراوای میانی با ارتفاع سد ۴۷ متر از روی بستر و ۵۹ متر از پی می باشد. حداکثر سیلاب محتمل عبارت از حداکثر سیلابی است که احتمال دارد در یک حوضه آبریز جاری شود. لذا نوع سرریز اوجی آزاد و ظرفیت تخلیه سرریز ۱۵۱۰ مترمکعب بر ثانیه در نظر گرفته شده است. نمایی از بدنه سد و دریاچه و ساختمان های بهره برداری در شکل ۱ آورده شده است [۲۷]. همچنین پلان و پروفیل سرریز سد سهپند در شکل های ۲ و ۳ آورده شده است.



شکل ۱- نمایی از بدنه سد و دریاچه و ساختمان های بهره برداری [۲۷]

با استفاده از نرم افزار Flow-3D می توان احجام ساده مثل مکعب، دایره و .. را ایجاد کرد. با توجه هندسه پیچیده پروفیل سرریز سد سهپند و ناتوانی نرم افزار Flow-3D برای مدلسازی این هندسه، کل سرریز به طور کامل توسط نرم افزار Autocad به نرم افزار Solidworks معرفی و مدل شده است. سپس خروجی نرم افزار Solidworks با فرمت STL. به نرم افزار Flow-3D معرفی شده است. با توجه به تقارن سرریز و صرفه جویی در وقت و هزینه، نیمه سمت راست سرریز به مقدار ۷/۵ متر در عرض مدل شده که پروفیل آن در شکل ۳ آورده شده است. در شکل ۴ نمایی از هندسه ساخته شده و شرایط مرزی حجم کنترل آن ملاحظه می شود.

کاربردی کردن مدل لزجت گردابه ای<sup>۱</sup> است. انرژی جنبشی آشفتگی در واحد جرم ( $k$ ) به صورت زیر بیان می شود:

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u_i'^2} + \overline{u_j'^2} + \overline{u_k'^2}) \quad (5)$$

$$\begin{cases} \delta_{ij} = 0 & i \neq j \\ \delta_{ij} = 1 & i = j \end{cases}$$

به منظور حل میدان جریان آشفته براساس معادلات پیوستگی و رینولدز، نیاز است تا تنش های رینولدز در معادلات به روش خاصی مدل شوند. در این صورت در حالت جریان ۳ بعدی با وجود ۴ معادله (۱ پیوستگی و ۳ مومنتم)، ۴ مجهول میدان جریان (یعنی سرعت ها در ۳ امتداد x، y و z و به علاوه فشار) معین می شوند.

جهت بیان تنش های رینولدز و یا به عبارت بهتر، بستن سیستم معادلات فوق از مدل های آشفتگی استفاده می شود. در مدل های مزبور، جمله لزجت گردابه ای با استفاده از نظریه های مختلف (نظیر نظریه اختلاط) بیان شده و ارتباط بین تنش های رینولدز و مولفه های متوسط سرعت برقرار می شود. واضح است که حل معادلات فوق نیازمند استفاده از روش های عددی است. مدل های ریاضی که از روش های عددی جهت حل میدان های سیال استفاده می شود به دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۲</sup> معروف هستند. دینامیک سیالات محاسباتی، ابزاری بر اساس روش های عددی است که جهت شبیه سازی رفتار سیستم هایی شامل جریان سیال، انتقال گرما و دیگر فرآیندهای وابسته به کار می رود.

نرم افزار Flow-3D معادلات حاکم بر حرکت سیال را با استفاده از تقریب های تفاضل و حجم محدود حل می کند. محیط جریان به شبکه ای با سلول های مستطیلی ثابت تقسیم بندی می شود که برای هر سلول، مقادیر میانگین کمیت های وابسته وجود دارد، یعنی همه متغیرها در مرکز سلول محاسبه می شوند به جز سرعت که در مرکز وجوه سلول حساب می شود [۲۵]. در این تحقیق نرم افزار به کار گرفته شده Flow-3D V10.1.1.05 است. با توجه به قابلیت نرم افزار مش بندی و شرایط مرزی جهت شبیه سازی عددی و روند حساسیت سنجی نسبت به پارامترهای یاد شده در خود نرم افزار Flow-3D انجام می شود. سایر تغییرات جهت بررسی تاثیر پارامترهای هیدرولیکی موثر در مدل صحت سنجی و کالیبره شده و شبیه سازی می شود. سیال به صورت تراکم ناپذیر و با سطح آزاد معرفی شده است. زمان کل شبیه سازی هم ۳۰ ثانیه در نظر گرفته شده که از طریق پایدار شدن نیمرخ سطح آزاد جریان بدست می آید. مدلسازی در سیستم SI بوده و اثرات وزن سیال، تلاطم جریان روی سرریز و پدیده کاویتاسیون فعال شده است. برای وزن سیال مقدار شتاب گرانش در جهت منفی محور yها به صورت ۹/۸۱ معرفی شده است. لذا سیال مورد استفاده در مدل، آب در دمای ۱۵ درجه سلسیوس با لزجت نیوتنی و مدل آشفتگی، RNG $\epsilon$  در نظر گرفته شده است که قابلیت خوبی برای مدلسازی جریان روی سرریز دارد [۲۶]. با توجه به اینکه فشار بخار سیال برای آب ۱۵ درجه برابر ۱۷۰۵ پاسکال (فشار اتمسفر برابر ۱۰۰ کیلو پاسکال) است، در مدل

<sup>1</sup> Eddy Viscosity Models

<sup>2</sup> Computational Fluid Dynamics (CFD)

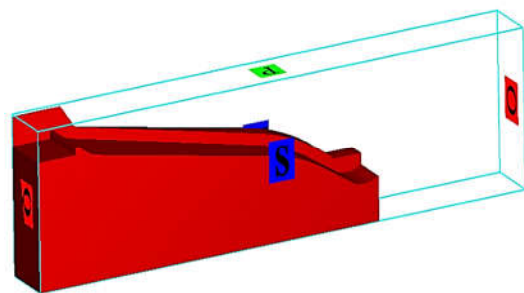
<sup>3</sup> Renormalized Group

طول کل هندسه مدل در شکل ۴ برابر ۲۶۰ متر است که مرز ورودی آن متعلق به شرایط ورودی قبل از تاج است. مرز خروجی حجم کنترل منطبق با انتهای پرتاب‌کننده جامی و حداقلی برای مطالعه آبستستگی است به نحوی که اجازه خروج آب از این مرز تعریف می‌شود. ارتفاع حجم کنترل برابر ۵۳ متر می‌باشد.

از جمله موارد مهم تاثیرگذار در تعریف و مدل‌سازی عددی، ایجاد شرایط مرزی متناسب با واقعیت در مرزهای قطع شده می‌باشد. برای مدل‌سازی عددی سرریز سد سهند، با توجه به اینکه به خاطر تقارن نصف عرض سرریز مدل شده، باید شرایط مرزی مناسب در مرزهای قطع شده به خصوص ورودی و خروجی تعریف شود. این مرزها در شکل ۴ نشان داده شده است.

شرط تقارن در وسط مدل مناسب می‌باشد چرا که در صفحه تقارن به خاطر مدل‌سازی نصف سرریز این شرط صحیح است. در بیرون دیواره حائل کناری و پایین مدل نیز شرط دیوار<sup>۱</sup> مناسب است. البته نرم‌افزار تقارن در این مرزها را نیز دقیقاً به همین مفهوم در نظر می‌گیرد و تغییری در نتایج ایجاد نمی‌شود. نرم‌افزار این شرایط را به صورتی در نظر می‌گیرد که تاثیری بر روی جریان نداشته و صلب باشد. شرایط مرزی متقارن و دیوار در اطراف حجم کنترل مناسب است اما در مرز ورودی و خروجی باید این شرایط مرزی را تغییر داد.

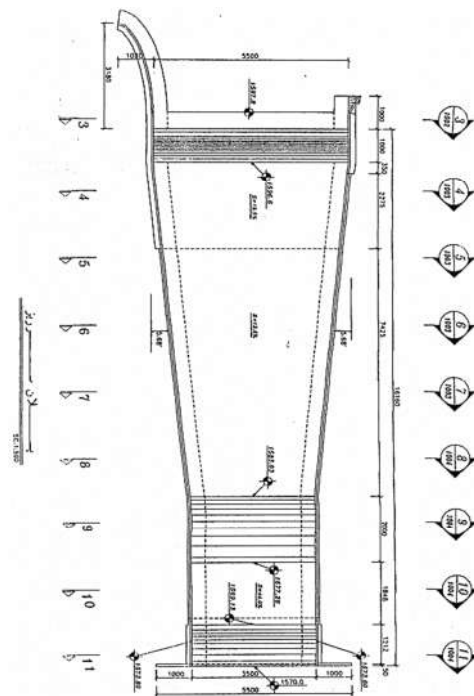
در مرز ورودی شرایط دبی ورودی برای نرم‌افزار تعریف شده است. با توجه به اینکه دبی تخلیه ۱۵۱۰ مترمکعب بر ثانیه است، نصف آن ۷۵۵ به مدل معرفی شده است. بقیه پارامترها پیش‌فرض هستند. در مرز خروجی یا انتهای مدل شرایط خروج جریان به صورت خروجی<sup>۲</sup> تعریف شده است. در این مرز به سیال اجازه خروج از مرز داده شده است. در صورتی که سیال اجازه خروج از این مرز را نداشته باشد، آب در قسمت انتهایی انباشته شده و پروفیل سطح آب را تحت تاثیر قرار خواهد داد. همچنین در سطح آزاد بالایی فشار ثابت<sup>۳</sup> مساوی صفر تعریف شده است.



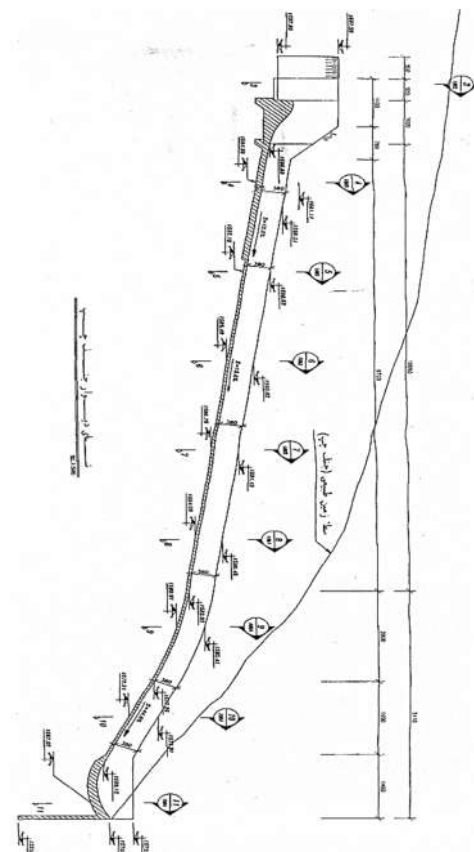
شکل ۴- نمایی از شرایط مرزی حجم کنترل

بطور کلی روش حل بطریق حجم محدود روی شبکه‌های بی سازمان بر اساس محاسبه شار عبوری در هر سه جهت مختصات است. در انتگرالگیری از معادلات حاکم از روش‌های مبتنی بر مرکز سلول جهت حل استفاده شده است. برای حل گام زمانی در معادلات جریان دو دیدگاه ضمنی و صریح وجود دارد. اهمیت هر یک از این روش‌ها در

<sup>1</sup> Wall  
<sup>2</sup> Outflow  
<sup>3</sup> Specified pressure

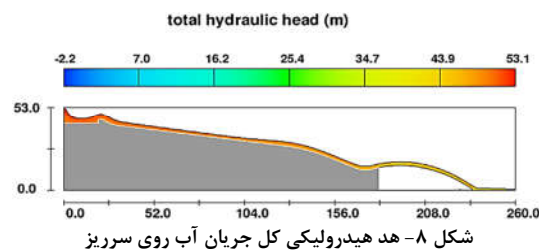
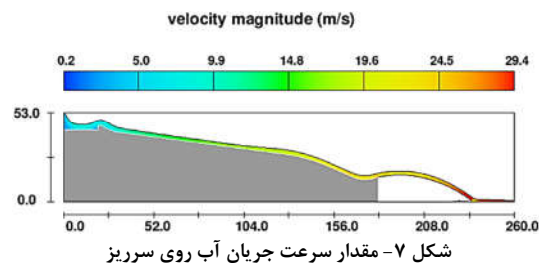


شکل ۲- پلان سرریز آزاد سد سهند [۲۸]



شکل ۳- پروفیل سرریز آزاد سد سهند [۲۸]

سیلاب جریان پس از عبور از روی بخش لبه آبریز (اوجی) سرریز به بخش شوت می‌رسد که ضمن عبور از کانال تنداب، در طول حدود ۱۴۰ متر با توجه به اینکه کف سرریز انحنا دارد مقداری به عمق آب افزوده شده و بعد از آن خود را به انتهای شوت رسانده و از آنجا از طریق پرتاب کننده جامی به سوی حوضچه آرامش پرتاب می‌شود تا انرژی جریان مستهلک شده، به کف رسیده و سپس از محدوده سرریز خارج می‌شود. با مشاهده نوسانات ارتفاع سطح آب و مقایسه آن با ارتفاع دیواره در شکل ۵ مشخص می‌شود که در حالت حداکثر سیلاب طراحی سرریز، سرریز ظرفیت انتقال دبی اوج سیلاب ۱۵۱۰ مترمکعب بر ثانیه را داشته و تمامی سیلاب را به استخر تصادمی انتقال می‌دهد. در شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب مقدار سرعت جریان و هد کل بر روی سرریز نشان داده شده است.



سرعت با توجه به شیب سرریز و تنگ‌شدگی شوت، رفته رفته پس از نزدیک شدن به اوجی سرریز زیاد شده به طوری که بعد از انحنای میانی روند افزایشی بیشتری می‌گیرد تا به پرتاب‌کننده جامی برسد. در ادامه پس از جامی مقداری از آن کاسته شده و سپس افزایش می‌یابد. کمترین سرعت در نزدیکی تاج سرریز و بیشترین سرعت در پرتاب‌کننده جامی است که با توجه به ارتفاع زیاد سرریز و دبی زیاد ورودی قابل انتظار است که از طریق پرتاب به هوا مستهلک می‌شود. به طور مشخص جریان در روی سرریز فوق بحرانی و سیلابی است.

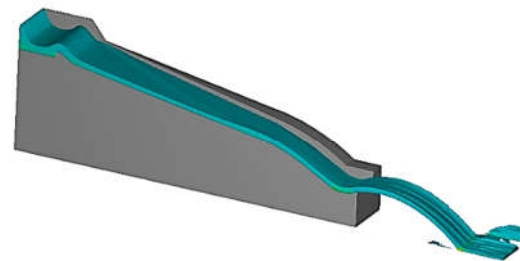
#### ۴-۱- صحت سنجی نتایج

مدل آزمایشگاهی سرریز سد سهند با مقیاس ۱:۴۰ طراحی و در مرکز تحقیقات آب ساخته شده است. مقطع شماره ۱ در تاج سد واقع شده و بقیه مقاطع بر حسب فاصله از آن می‌باشد. در این مدل، از مقطع ۵ تا ۱۹ شیب طولی ۱۳/۵ درصد و از مقطع ۱۹ تا ۳۲ به مقدار ۴۴ درصد افزایش می‌یابد. کانال تندآب دچار تنگ‌شدگی به مقدار ۲۰ متر می‌باشد (۵۵ متر طول تاج سرریز و ۳۵ متر عرض در انتهای شوت) که در مدل آزمایشگاهی مقدار تنگ‌شدگی ۶ متر گزارش شده است.

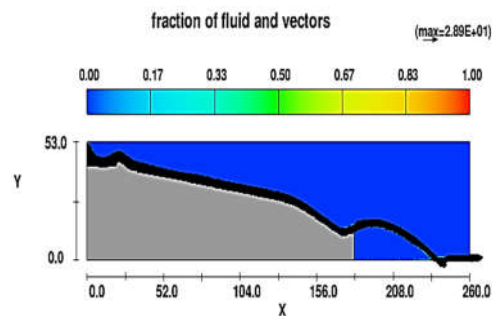
انتخاب گام زمانی است که به صورت اولیه برابر ۰/۰۰۱ ثانیه تعریف شده و روش حل به صورت پیش فرض در نرم‌افزار، ضمنی برای فشار است که بدون شرط پایدار است. بطوریکه در روش‌های صریح، شرط‌هایی برای پایدار ماندن روش حل وجود دارد و این در حالی است که در روش‌های ضمنی هیچ شرطی برای قدم زمانی وجود ندارد.

#### ۴- نتایج شبیه‌سازی

پس از اتمام مدلسازی باید مدل به صورت عددی شبیه‌سازی شود. با در نظر گرفتن شرایط اولیه مدل در شکل ۴، نرم‌افزار FLOW-3D با توجه به زمان تعریف شده به عنوان مثال ۳۰ ثانیه، گام‌های زمانی حداقل در نظر می‌گیرد تا به حالت نهایی برسد. همچنین ابعاد مش‌بندی بعد از سعی و خطا ۵/۰ متر و یکنواخت در نظر گرفته شده است بطوریکه سطح آزاد آب و پارامترهای جریان در مدل بعد از ریز کردن مش تغییر محسوس نمی‌کند. همچنین نتایج با مدل آزمایشگاهی تطابق داشته باشد. به منظور شبیه‌سازی ابتدا مدل پیش شبیه‌سازی<sup>۱</sup> شده است. با ملاحظه خطاها ایرادات برطرف شده‌اند. در نهایت مدل شبیه‌سازی<sup>۲</sup> می‌شود. بازه زمانی به مقدار لازم تعریف شده است به صورتی که نهایتاً پروفیل سطح آب در سربرگ آنالیز<sup>۳</sup> تثبیت شده و جریان پایا<sup>۴</sup> باشد. نتایج شبیه‌سازی پس از ۳۰ ثانیه به صورت سه بعدی در شکل ۵ و به صورت دوبعدی (نمای جانبی) در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۵- نمایی از شبیه سازی سه بعدی جریان آب روی سرریز



FLOW-3D t=30.002106 z=1.425E+01 lks=2 to 521 j=2 to 107  
14:06:57 01/23/2015 max hydrot. version 10.1.1.05 win64 2013  
Title

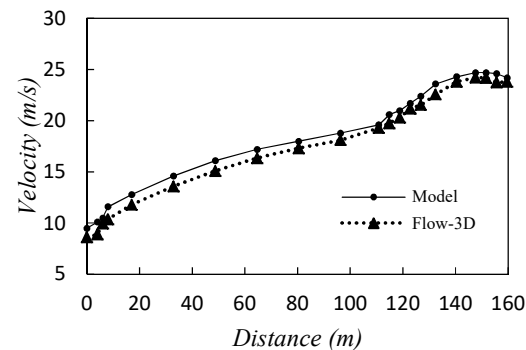
11

1 Preprocess Simulation  
2 Simulate  
3 Analyze  
4 Steady state

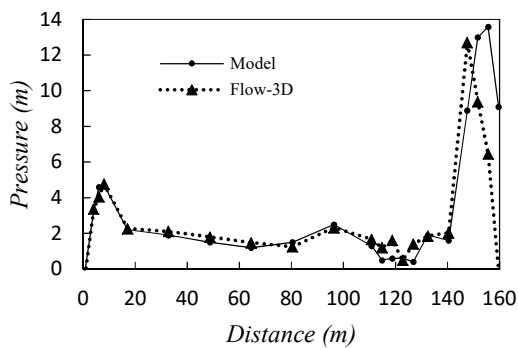
نتایج برای سرعت و فشار و شاخص کاویتاسیون به ازای دبی سیلاب ۱۵۱۰ مترمکعب بر ثانیه در جدول ۱ ارائه شده است [۲۹].

جدول ۱- نتایج مدل آزمایشگاهی سرریز سد سهند [۲۹]

شماره مقطع	فاصله بر حسب متر	سرعت (متر بر ثانیه)	فشار (متر)	شاخص کاویتاسیون
۱	۰	۹/۵	-۰/۸	۲/۰۱
۳	۴	۱۰/۱	۳/۳	۲/۵۸
۴	۶	۱۰/۵	۴/۶	۲/۳۶
۵	۸	۱۱/۶	۴/۷	۲/۱۷
۶	۱۷	۱۲/۸	۲/۲	۱/۴۷
۸	۳۲/۸	۱۴/۶	۱/۹	۱/۱۲
۱۰	۴۸/۷	۱۶/۱	۱/۵	۰/۸۹
۱۲	۶۴/۶	۱۷/۲	۱/۲	۰/۷۶
۱۴	۸۰/۴	۱۸	۱/۵	۰/۷۲
۱۶	۹۶/۳	۱۸/۸	۲/۵	۰/۷۰
۱۸	۱۱۰/۸	۱۹/۶	۱/۳	۰/۵۹
۲۰	۱۱۴/۸	۲۰/۶	۰/۵	۰/۴۸
۲۲	۱۱۸/۸	۲۱	۰/۶	۰/۴۸
۲۴	۱۲۲/۸	۲۱/۷	۰/۶	۰/۴۵
۲۶	۱۲۶/۸	۲۲/۴	۰/۴	۰/۴۱
۲۸	۱۳۲/۴	۲۳/۶	۱/۹	۰/۴۴
۲۹	۱۴۰/۴	۲۴/۳	۱/۶	۰/۳۹
۳۱	۱۴۷/۶	۲۴/۷	۸/۹	۰/۶۲
۳۳	۱۵۱/۶	۲۴/۷	۱/۳	۰/۷۵
۳۵	۱۵۵/۶	۲۴/۶	۱۳/۶	۰/۷۸
۳۷	۱۵۹/۶	۲۴/۲	۹/۱	۰/۶۵

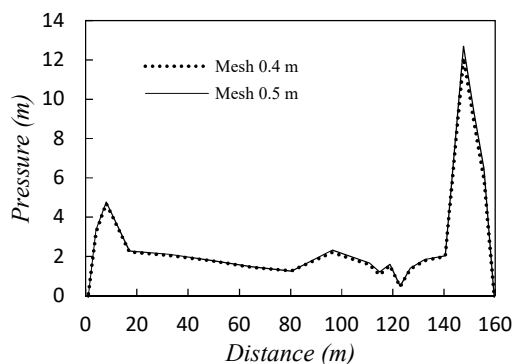


شکل ۹- سرعت جریان در مدل آزمایشگاهی و عددی



شکل ۱۰- فشار در مدل آزمایشگاهی و عددی

برای بررسی استقلال مش و عدم وابستگی مدل عددی به ابعاد شبکه حل، در شکل ۱۱ مقایسه بین فشار با مش ۰/۵ متری و ۰/۴ متری متری نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که نتایج با مش ریزتر تفاوت محسوسی نمی‌کند و ابعاد در نظر گرفته شده به صورت ۰/۵ متری کافی می‌باشد.

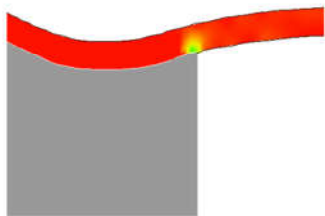
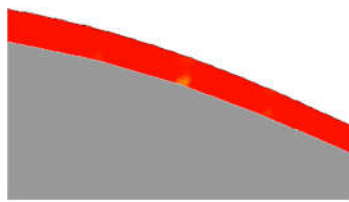
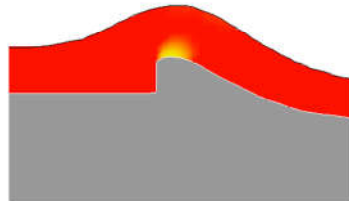
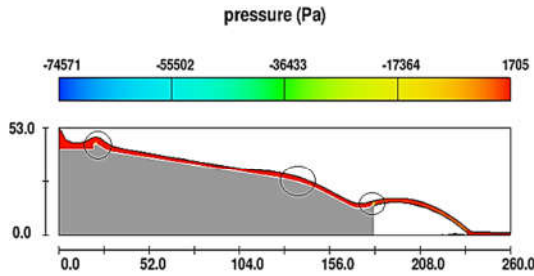


شکل ۱۱- فشار با مش ۰/۵ و ۰/۴ متری

#### ۵- بررسی رخداد پدیده کاویتاسیون

در سرریز بلندی مثل سرریز سرویس سد سهند چون سرعت سیال زیاد می‌باشد، در نتیجه ناصافی‌های حتی در حد چند میلیمتر هم

با توجه به اینکه سرریز دارای تندآب و شیب طولی می‌باشد لذا سرعت در طول مسیر افزایش می‌یابد و همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود در مقاطع ۳۱ تا ۳۷ به بیشترین مقدار خود می‌رسد. فشار از مقطع ۳۱ به بعد افزایش چشم‌گیری یافته است. علت این امر بخاطر افزایش اندک عمق آب، انحنای مسیر جریان و شتاب جانب مرکز ناشی از پرتابه جامی شکل است که از مقطع ۳۱ شروع می‌شود و در آنجا فشار به علت وجود این سازه نسبت به سایر ایستگاه‌ها افزایش یافته است [۳۰]. در اشکال ۹ و ۱۰ به ترتیب مقایسه بین سرعت و فشار در مدل آزمایشگاهی و مدل نرم‌افزار Flow-3D ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که نتایج تطابق بسیار خوبی باهم داشته و لذا مدل عددی صحت‌سنجی شده و قابل اطمینان می‌باشد. لازم به ذکر است در مدل عددی، فشار در ورود به پرتابه ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. تفاوت نتایج در عین همخوانی فشار در روی پرتاب‌کننده جامی شکل ناشی از لبه انتهایی است که در مدل عددی به صورت لبه

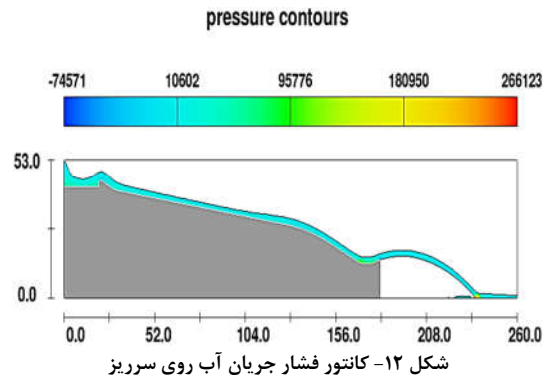


شکل ۱۳- نواحی وقوع کاویتاسیون روی سرریز سرویس سد سهند

با توجه به پلان سرریز مشاهده می‌گردد که کانال تند آب دچار تنگ‌شدگی می‌باشد لذا انتظار می‌رفت که با کاهش عرض کانال، عمق آب افزایش یافته و در نتیجه فشار افزایش و با تاثیر از آن سرعت کاهش یابد و در نتیجه مقدار شاخص کاویتاسیون بیشتر گردد ولی در مدل آزمایشگاهی شاخص کاویتاسیون رفته رفته کاهش یافته تا به سازه جامی شکل رسیده و بعد از آن افزایش یافته است. دلیل این امر تغییر شیب کانال تند آب از ۱۳/۵ درصد به ۴۴ درصد است که باعث افزایش سرعت و کاهش فشار شده و در نتیجه باعث کاهش شاخص کاویتاسیون شده است.

در طی تجربه و بررسی عملکرد سرریزها (شامل مدل و آزمایش بر روی پروتوتیپ) این طور نتیجه‌گیری شده که کاویتاسیون در اثر عملکرد مجموعه ای از عوامل و شرایط است. معمولاً یک عامل به تنهایی برای ایجاد مسئله کاویتاسیون کافی نیست ولی ترکیبی از عوامل هندسی و هیدرودینامیکی و فاکتورهای وابسته دیگر ممکن است منجر به خسارت کاویتاسیون گردد. اگر در مناطقی وقوع کاویتاسیون تخمین زده شود، می‌توان با اصلاح هندسه مورد نظر یا هوادهی جریان خسارت ناشی از آن را کنترل کرد. همچنین بایستی ناهمواری سطح در صورت وجود اصلاح شود.

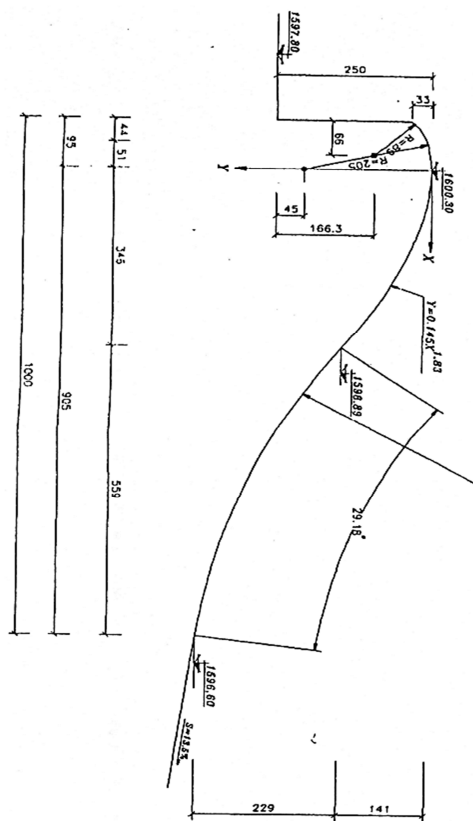
می‌تواند باعث ایجاد جداشدگی جریان شود. هر نوع روزه با برآمدگی تعویض ناگهانی سطح مقطع هم می‌تواند باعث جدایی خطوط جریان شود. این پدیده معمولاً در پایه‌های دریچه‌ها بر روی سرریزها، در قسمت زیر دریچه‌های کشویی و انتهای شوت‌ها رخ می‌دهد. بنابراین سطح آبروی (کلیه مقاطع) سرریز سرویس سد سهند که تا ۵۰ متر پایین‌تر از سطح تراز اوجی می‌باشد بطور حاد در معرض خطر کاویتاسیون قرار دارد. برای بررسی خطر کاویتاسیون در شکل ۱۲ کانتور فشار جریان آب روی سرریز سرویس سد سهند در قسمت‌های مختلف نشان داده شده است.



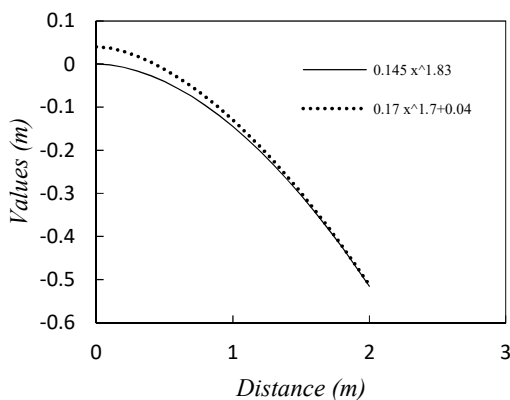
ملاحظه می‌شود که فشار آب بیشینه در محدوده کف پرتاب‌کننده جامی و برخورد به زمین تا کمینه منفی در نقاط مختلف سرریز متغیر است. بنابراین در این محدوده تغییرات حتماً کاویتاسیون ظاهر شده و در ناحیه‌ای از سیال که فشار به کمتر از فشار بخار سیال برسد کاویتاسیون اتفاق می‌افتد. قبلاً در تعریف مدل کاویتاسیون اشاره شد که برای آب ۱۵ درجه فشار بخار برابر ۱۷۰۵ پاسکال می‌باشد. بنابراین با استفاده از امکانات نرم‌افزار Flow-3D، مقدار حداکثر کانتور فشار به ۱۷۰۵ پاسکال محدود شده و در نواحی که فشار کمتر از آن باشد، آب شروع به جوشیدن کرده و کاویتاسیون اتفاق می‌افتد. در شکل ۱۳، پدیده کاویتاسیون به راحتی قابل تشخیص است. همانطور که از شکل ۱۳ ملاحظه می‌شود در ۳ ناحیه از طول سرریز کاویتاسیون احتمال رخداد پدیده کاویتاسیون وجود دارد. تاج سرریز، قسمت انحنادار میانه شوت سرریز و لبه انتهایی پرتاب‌کننده جامی شکل، قسمت‌هایی هستند که به نظر می‌رسد دارای مشکل کاویتاسیون می‌باشند و باید با استفاده از راهکارهایی از وقوع آن جلوگیری کرد.

برای جلوگیری از ایجاد کاویتاسیون شاخص کاویتاسیون که از رابطه (۶) محاسبه می‌شود نمی‌بایست کمتر از ۰/۲ باشد اما برخی دیگر از مراجع عدد ۰/۲۵ را به عنوان مقدار بحرانی پیشنهاد می‌کنند. در رابطه (۶) صورت کسر اختلاف ارتفاع فشار در نقطه مورد نظر و فشار بخار آب و مخرج ارتفاع نظیر سرعت جریان آب می‌باشد. شاخص کاویتاسیون برای مدل آزمایشگاهی در جدول ۱ ملاحظه می‌شود.

$$\sigma = \frac{h_0 - h_v}{v^2 / 2g} \quad (6)$$



شکل ۱۴- معادله و منحنی اوجی سرریز سد سهند [۲۸]



شکل ۱۵- پروفیل اولیه و اصلاحی سرریز سد سهند

## ۶- بررسی آبشستگی حوضچه آرامش

همانطور که در شکل ۱۶ نشان داده شده، در سرریز سد سهند، آب پس از پرتاب‌کننده جامی با سرعت زیادی به کف برخورد می‌کند بطوریکه طول پرتابه بیش از ۵۵ متر است.

با مقایسه نتایج مدل عددی در شکل ۱۳ و شاخص کاویتاسیون در جدول ۱ برای مدل آزمایشگاهی، بنظر می‌رسد که خطر کاویتاسیون در قسمت میانه شوت سرریز و لبه انتهایی پرتاب‌کننده قابل صرفنظر کردن باشد اگرچه شاخص در مدل آزمایشگاهی هم در این نواحی اعداد کمی بوده و نزدیک به مقدار بحرانی ۰/۲۵ هستند. ولی برای اطمینان بیشتر می‌توان توصیه‌هایی برای این نواحی در نظر گرفت [۳۲].

برای مقابله با پدیده کاویتاسیون در قسمت میانی تندآب می‌توان شیب قسمت پایین‌تر را اصلاح و کم کرده و با طول بیشتر اجرا کرد که باید شرایط توپوگرافی فراهم بوده ولی هزینه اجرای بیشتری در پی خواهد داشت. لذا به عنوان راهکار عملی‌تر، بایستی شیار هوادهی پیش‌بینی شود که از دیواره‌های اطراف به لوله‌های هواده متصل است. هندسه شیار هوادهی به صورتی است که ابتدا قبل از شیار، برآمدگی در کف ایجاد می‌شود تا باعث جدایش جریان از بستر شده و هوادهی در طول شیار به راحتی از طریق لوله‌های هوادهی انجام شود. در واقع با افت فشار و ایجاد خلا در ناحیه جدا شده روی شیار، از طریق لوله‌های هواده کناری مکش صورت گرفته و کمبود فشار جریان می‌شود تا امکان ظهور پدیده کاویتاسیون از بین رود.

لبه انتهایی پرتاب‌کننده جامی نباید صاف اجرا شده و به صورت منحنی‌وار باشد که احتمالاً در مدل آزمایشگاهی هم به همین صورت ساخته شده که خطر کاویتاسیون وجود ندارد. باید توجه شود کاویتاسیون به خودی خود خطری برای هیچ سازه‌ای ندارد. اگر کاویتاسیون در نزدیکی جدار روی دهد، ممکن است خسارت‌هایی را در پی داشته باشد و سازه در معرض خسارت جدی قرار گیرد. بطوریکه حباب بخار آب با انتقال به منطقه پرفشار جریان آب در اثر تصعید شدن باعث ایجاد موج انفجاری و تخریب بستر می‌شود، در حالی که حباب هوای مخلوط در آب باعث ابری شدن جریان آب شده، امکان انفجار نداشته و تخریبی به همراه ندارد. جریان پس از عبور از روی پرتاب‌کننده جامی شکل، دارای پتانسیل و فشار کمتر از فشار بخار آب بوده و به رنگ شیری به صورت ابری که مخلوطی از حباب هوا و آب است در می‌آید.

مطابق مدل عددی امکان پدیده کاویتاسیون در قسمت تاج سرریز وجود دارد که قابل صرفنظر کردن نیست ولی در مدل آزمایشگاهی این امکان وجود ندارد و شاخص کاویتاسیون کمتر از ۰/۲۵ است.

برای قسمت تاج سرریز، همانطور که در شکل ۱۴ نشان داده شده باید شعاع‌های قسمت ورودی لبه آبریز افزایش یابد و کمی تاج بلندتر شود تا منحنی لبه آبریز اصلاح شده و امکان کاویتاسیون از بین برود. لذا می‌توان رابطه ریاضی جدیدی پیشنهاد کرد. به عنوان مثال می‌توان در رابطه اولیه  $y=0.145x^{1.83}$  سرریز، توان را اندکی کاهش داده تا شیب منحنی کاهش یابد و عرض از مبدا به رابطه اضافه کرد تا قسمت اوجی سرریز بالاتر بیاید. در شکل ۱۵ مقایسه بین رابطه پیشنهادی اصلاحی  $y=0.17x^{1.7}+0.04$  و پروفیل اولیه نشان داده شده است. بدین صورت با حذف فاصله بین کف بتنی و آب امکان خللازیی کمتر شود. یعنی کف جریان آب مماس بر کف بتنی باشد و بلند نشود. اگر با این کار نتیجه‌ای حاصل نشود، هوادهی جریان باید انجام شود.

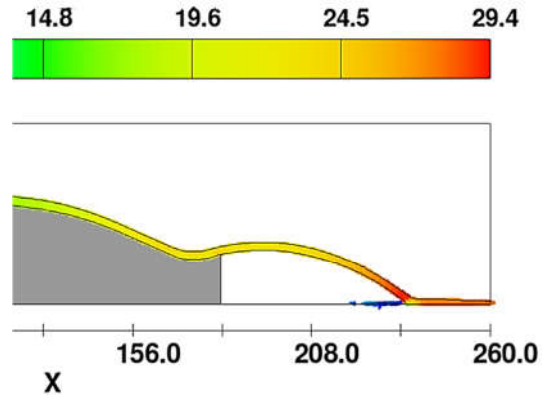


متر و  $Fr$  عدد فرود پایاب برابر  $13/77$  است. با استفاده از رابطه (۹)، عمق آبشستگی حدود  $7/6$  متر بدست می‌آید که واقعی‌تر است. کارایی حوضچه پرتابی، اساساً به کیفیت ناحیه‌ای که جریان با آن برخورد می‌کند بستگی دارد. برای مقابله با آبشستگی نیاز به ساماندهی پایین دست سرریز با استفاده از استخر حفر شده، حفاظت و سنگ‌چینی آن به نحوی که جت برخوردی انرژی خود را در این محدوده گودشدگی با استهلاک انرژی از دست بدهد و در ادامه آب به سمت امتداد رودخانه هدایت شود. دقت شود که باید جلوی گودی بیش از حد گرفته شود نه گود معمولی که برای استهلاک انرژی مورد نیاز است. این در حالی است که با توجه به شکل ۱، اقدام خاصی صورت نگرفته است و عمق عملی آبشستگی با توجه به عدم سرریز آب مخزن قابل محاسبه نیست. اغلب مشاهده شده است که پیش‌بینی‌های زمین‌شناسی شرایط مناسبی را نشان می‌دهد اما آبشستگی بسیار بیشتر از مقدار پیش‌بینی شده آن بوده است [۳۳، ۳۵].

## ۷- نتیجه‌گیری

اهم نتایج حاصل از این تحقیق را می‌توان به شرح زیر بیان کرد:

۱. با مشاهده نوسانات ارتفاع سطح آب و مقایسه آن با ارتفاع دیواره مشخص می‌شود که در حالت حداکثر سیلاب طراحی سرریز، سرریز ظرفیت انتقال دبی اوج سیلاب  $1510$  مترمکعب بر ثانیه را داشته و تمامی سیلاب را به استخر تصادمی انتقال می‌دهد.
۲. طبق مدل عددی نرم افزار Flow-3D در ۳ ناحیه از طول سرریز سرویس سد سهند، تاج لبه آبریز، قسمت انحنا دار میانه شوت سرریز و لبه انتهایی پرتاب‌کننده جامی شکل احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون وجود دارد.
۳. با مقایسه نتایج مدل عددی با مدل آزمایشگاهی، در قسمت میانه شوت سرریز و انتهای پرتاب‌کننده جامی شکل احتمال رخداد پدیده کاویتاسیون قابل صرف نظر کردن است ولی در جهت اطمینان می‌توان توصیه‌هایی ارائه کرد.
۴. برای قسمت تاج سرریز سرویس سد سهند، باید منحنی لبه آبریز اصلاح شده و قسمت مستعد کاویتاسیون بلندتر شود تا منحنی اصلاح شده و امکان کاویتاسیون از بین برود. یعنی کف جریان آب مماس بر کف بتنی باشد و بلند نشود. لذا می‌توان رابطه ریاضی جدیدی پیشنهاد کرد و شعاع قسمت ورودی را بیشتر کرد. اگر با این کار نتیجه‌ای حاصل نشد، هوادهی جریان باید انجام شود. در قسمت میانه شوت باید از هوادهی از طریق ایجاد شکاف در کف استفاده کرد. همچنین لبه انتهایی پرتاب‌کننده جامی نباید صاف اجرا شده و به صورت منحنی وار باشد.
۵. عمق آبشستگی برای پرتاب‌کننده جامی شکل سرریز سد سهند حدود  $20$  متر با فرمول قدیمی میسن و  $7/6$  متر با فرمول به روز سلماسی و آبراهام بدست می‌آید که برای مقابله با آبشستگی نیاز به ساماندهی پایین دست سرریز با استفاده از استخر حفر شده، حفاظت و سنگ‌چینی می‌باشد.
۶. استفاده از مدل عددی نرم افزار Flow-3D به جای مدل‌های آزمایشگاهی باعث صرفه‌جویی در هزینه و زمان شده و همخوانی خوبی



شکل ۱۶- طول و سرعت جریان در پرتاب کننده جامی

توسعه آبشستگی برای هر حوضچه پرتابی باید در مدل فیزیکی آن مطالعه شود. عمق آبشستگی در شرایط مختلفی در مدل و آزمایشگاه بدست آمده است. معمولاً در مدل حداکثر آبشستگی مطالعه می‌شود. مدل میسن اثر هوادهی جت ورودی را بر آبشستگی سرریز پرتابی مشاهده کرد [۳۳]. نسبت هوادهی، یعنی نسبت دبی ویژه هوا به دبی ویژه آب  $\beta_a$  که از رابطه (۷) بدست می‌آید:

$$\beta_a = 0.13 \left[ 1 - \frac{V_e}{V_i} \right] \left[ \frac{H_o}{t_i} \right]^{0.45} \quad (7)$$

که در آن  $V_e$  سرعت هوای ورودی به جریان ( $V_e \sim 1.1$  m/s)،  $V_i$  سرعت جریان برخوردی به بستر،  $H_o$  ارتفاع ریزش و  $t_i$  ضخامت جت در محل برخورد است. با استفاده از شکل ۱۴، سرعت جریان برخوردی به بستر برابر  $28/5$  متر بر ثانیه، ارتفاع ریزش برابر با ارتفاع پرتاب کننده  $14/6$  متر و ضخامت جت در محل برخورد برابر  $2$  متر است. بنابراین با استفاده از رابطه،  $\beta_a$  برابر  $0/31$  بدست می‌آید. نسبت حداکثر عمق آبشستگی  $Z_{esc}$  به عمق پایاب  $d_u$ ، اساساً به عدد فرود جریان در پایاب و نسبت هوادهی  $\beta_a$  بستگی دارد. با استفاده از شکل ۱۶، عمق پایاب حاصل از شبیه‌سازی نرم‌افزار برابر یک متر است.  $q$  برابر  $43/14$  و عدد فرود پایاب برابر  $13/77$  بدست می‌آید. اگر  $\beta_a < 2$  باشد می‌توان نشان داد که [۳۳]:

$$\frac{Z_{esc}}{h_u} = 1 + 3.4 F_u^{0.6} (1 + \beta_a)^{0.3} \left[ \frac{h_u}{d_m} \right]^{0.06} \quad (8)$$

بنابراین عدد فرود جریان در پایاب اثر زیادی بر آبشستگی دارد و با افزایش عمق پایاب از عمق آبشستگی می‌توان کاست. قطر مصالح بستر در مقایسه با پارامترهای دیگر اثر کمتری دارد. معمولاً قطر  $0/25$  متر را به عنوان قطر معرف و میانگین مصالح بستر می‌توان در نظر گرفت چراکه بستر سنگی نیست. با استفاده از رابطه، عمق آبشستگی برای پرتاب‌کننده جامی شکل سرریز سد سهند حدود  $20$  متر بدست می‌آید که مقدار بسیار زیادی است. بنابراین برای کنترل بیشتر از رابطه سلماسی و آبراهام [۳۴] که جدیدتر است استفاده شده است:

$$\frac{D}{H-h} = \frac{0.03 \left( \frac{H-h}{h} \right)^{-1.604} + 0.101 (Fr)^{0.224}}{0.171 \left( \frac{H-h}{h} \right)^{0.275} + 0.03 (Fr)^{-1.709}} \quad (9)$$

که در آن  $D$  عمق آبشستگی،  $H$  ارتفاع ریزش به علاوه عمق آب روی پرتاب‌کننده جامی شکل برابر  $16/1$  متر،  $h$  عمق پایاب برابر یک

با نتایج آن دارد که می‌توان جهت بررسی جریان بر سازه سرریز و تحلیل و طراحی آن و کنترل آسیب کاویتاسیون و آبشستگی بهره برد.

## ۸- مراجع

- [1] Khatsuria R., Hydraulics of spillways and energy dissipators 1st edn, 2005.
- [2] Falvey H.T., Cavitation in chutes and spillways, US Department of the Interior, Bureau of Reclamation Denver, CO, USA, 1990.
- [3] Hay D., Model-prototype correlation: *Hydraulic structures*, in, ASCE, 1988.
- [4] Cassidy J.J., Fluid mechanics and design of hydraulic structures, *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(8) 961-977, 1990.
- [5] Wang X., Xie T.-Q., Cavitation erosion behavior of hydraulic concrete under high-speed flow, *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 69(1) 81-93, 2022.
- [6] Nie M.-X., Cavitation prevention with roughened surface, *Journal of Hydraulic engineering*, 127(10) 878-880, 2001.
- [7] Shabani A., Khozaymehzad H., Mohsen Pourreza Bilondi M., Ramezani Y., Experimental Investigation of Roughness Effect on the Cavitation Index in Ogee-Spillway, *Journal of Hydraulics*, 16(2) 107-121, 2021.
- [8] Yusuf F., Micovic Z., Prototype-scale investigation of spillway cavitation damage and numerical modeling of mitigation options, *Journal of Hydraulic Engineering*, 146(2) 04019057, 2020.
- [9] ابراهیم نژادیان ح. مناف پور م. بابازاده و. بررسی عددی اثر همگرایی دیواره‌های سرریز روی مشخصات هیدرولیکی جریان در سرریز سد و احتمال وقوع پدیده ی کاویتاسیون، *مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۵(۵) ۱۰۹-۱۲۷، ۲۰۱۸.
- [10] Foroudi A., Barati R., Experimental study of cavitation index in an ogee spillway by considering convergence angle of sidewalls, *Water Supply*, 22(6) 5729-5738, 2022.
- [11] احقاقی م. عصری زمانی خ. تحلیل سیالاتی پدیده کاویتاسیون پمپ OH1 150-500 و طراحی عددی پیشران و بررسی نتایج تست تجربی، *مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، ۴۱(۴) ۴۹-۴۱، ۲۰۲۲.
- [12] Chanson H., Aeration and deaeration at bottom aeration devices on spillways, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 21(3) 404-409, 1994.
- [13] Puri D., Sihag P., Thakur M., A review: Aeration efficiency of hydraulic structures in diffusing DO in water, *MethodsX*, 102092, 2023.
- [14] Xu W., Luo S., Zheng Q., Luo J., Experimental study on pressure and aeration characteristics in stepped chute flows, *Science China Technological Sciences*, 58(4) 720-726, 2015.
- [15] Aydin M.C., Ulu A.E., Aeration performance of high-head siphon-shaft spillways by CFD models, *Applied Water Science*, 11(10) 1-12, 2021.
- [16] Salmasi F., Abraham J., Hydraulic characteristics of flow over stepped and chute spillways (case study: Zirdan Dam), *Water Supply*, 23(2) 851-866, 2023.
- [17] Fadaei-Kermani E., Barani G., Ghaeini-Hessaroeyeh M., Numerical Detection of Cavitation Damage on Dam Spillway, *Civil Engineering Journal*, 2(9) 484-490, 2016.
- [18] Ghazi B., Daneshfaraz R., Jeihouni E., Numerical investigation of hydraulic characteristics and prediction of cavitation number in Shahid Madani Dam's Spillway, *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 7(4) 323-332, 2019.
- [19] Noury Hasanabady H., Kavianpour M., Khosrojerdi A., Babazadeh H., Numerical Study of the Rough Bed Impact on Energy Dissipation and Cavitation on Chute Spillways, *JWSS-Isfahan University of Technology*, 26(3) 177-191, 2022.
- [20] Vatandoust H., Yarmohammadi H., Aliyari T., Investigation of Hydraulic conditions and shape of flip bucket spillways on Cavitation phenomenon by considering dynamic pressures, *Journal of Energy Resources Technology*, 145(4) 043102, 2023.
- [21] Wan W., Liu B., Raza A., Numerical prediction and risk analysis of hydraulic cavitation damage in a High-Speed-Flow spillway, *Shock and Vibration*, 2018.
- [۲۲] اسدیان ا. امامزاده س.ش. پهنه‌بندی خطر کاویتاسیون در تنداب سرریز سد سورک با الگوریتم طبقه‌بندی نزدیک‌ترین همسایه، *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۳(۱۰) ۲۴۴۵-۲۴۶۲، ۲۰۲۲.
- [23] Zaffar M.W., Hassan I., Hydraulic investigation of stilling basins of the barrage before and after remodelling using FLOW-3D, *Water Supply*, 23(2) 796-820, 2023.
- [24] Aydogdu M., Gul E., Dursun O.F., Experimentally verified numerical investigation of the sill hydraulics for abruptly expanding stilling basin, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48(4) 4563-4581, 2023.
- [25] FLOW-3D® Version 10.0 User's Manual FLOW-3D [Computer software]. Santa Fe, NM: Flow Science, Inc. <https://www.flow3d.com>, 2008.
- [26] Gorman J., Bhattacharyya S., Cheng L., Abraham J., Turbulence models commonly used in CFD, in: *Computational Fluid Dynamics*, IntechOpen, 2021.
- [۲۷] وبسایت سد سهند هشترود، شرکت آب منطقه ای آذربایجان شرقی ، <http://www.azarwater.ir/SC.php?type=static&id=55>.
- [۲۸] مجموعه نقشه های طراحی و اجرایی سد سهند هشترود، سازه‌های هیدرولیکی، مهندسین مشاور بند آب، شرکت آب منطقه ای آذربایجان شرقی و اردبیل، ۱۳۷۵.
- [۲۹] گزارش نهایی مدل هیدرولیکی سرریز سد سهند، مرکز تحقیقات آب وابسته به وزارت نیرو بخش سازه های هیدرولیکی، سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی و اردبیل، ۱۳۸۳.
- [30] Gerhart P.M., Gerhart A.L., Hochstein J.I., Munson, Young and Okiishi's, Fundamentals of Fluid Mechanics, *John Wiley & Sons*, 2016.
- [۳۱] منصورى ر.، معافى ف.، بهشتى راد م.، کاربخش ع.، بررسی خصوصیات هیدرولیکی در پرتابه جامی شکل با استفاده از مدل عددی، *نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران*، ۱۰(۲) ۱۱-۱۲، ۲۰۱۹.
- [32] US Bearou of Reclamation, Design of small dams, *Water Resources Technical Publication*, 860p, 1987.
- [33] Mason P.J., Effects of air entrainment on plunge pool scour, *Journal of Hydraulic Engineering*, 115(3) 385-399, 1989.
- [34] Salmasi F., Abraham J., Multivariate Nonlinear Regression for Predicting Free Falling-Jet Scouring: An Experimental Study, *Iranian Journal of Science and Technology*, Transactions of Civil Engineering, 46(5) 3859-3870, 2022.
- [35] Taheri Aghdam A., Hosseinzadeh Dalir A., Salmasi F., Abbaspour, A., Abraham J., Numerical and Experimental Study of Trajectory for Free-Falling Jets, *Iranian Journal of Science and Technology*, Transactions of Civil Engineering, 1-13, 2023.