

## بررسی عددی پدیده کاویتاسیون در سرریز سد آغ چای به روش VOF و نرم افزار Flow-3D

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

قاسم خلیلزاده  
 دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران،  
 khalilzadeghasem@gmail.com

یوسف حسنزاده  
 استاد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران،  
 yhassanzadeh@tabrizu.ac.ir

### چکیده

به کمک مدل‌های ریاضی می‌توان شرایط هیدرولیکی پیچیده و خصوصاً وجود جریان‌های دوفازی در تندآب سرریزها را به صورت سه بعدی با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی کرد و با برقراری جریان‌های عبوری مختلف احتمال بروز خلاء زایی در این سازه‌ها را بررسی نمود. در تحقیق حاضر امکان ظهور پدیده کاویتاسیون و علاج بخشی روی سرریز سرویس سد آغ‌چای با استفاده از روش‌های عددی در نرم‌افزار Flow-3D در دو دبی ۴۴۰۰ و ۱۰۶۵ متر مکعب بر ثانیه که توسط مشاور طرح ارائه شده است، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و سطح آزاد جریان در این مدل به روش حجم سیال (VOF) محاسبه می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی جریان در دبی ۴۴۰۰ مترمکعب بر ثانیه نشان می‌دهد که در قسمت اوجی و تغییر زاویه کانال تندآب رخداد پدیده کاویتاسیون بسیار محتمل است و باید با استفاده از تدابیری از وقوع آن جلوگیری کرد. ولی در دبی‌های کمتر از جمله ۱۰۶۵ متر مکعب بر ثانیه بخاطر سرعت کمتر و عدم جدایش جریان از بستر احتمال وقوع خلأزایی کم بوده و چندان قابل توجه نیست. نتایج بدست آمده در مقایسه با نتایج مشاور طرح از تطابق خوبی برخوردار می‌باشند. **واژه‌های کلیدی:** سرریز اوجی شکل، مدل‌سازی عددی، نرم‌افزار Flow-3D، سد آغ‌چای، روش VOF، کاویتاسیون.

## Numerical investigation of cavitation phenomenon in Aghchai dam spillway by VOF method and Flow-3D software

S. Pirboudaghi  
 Gh. Khalilzadeh  
 Y. Hassanzadeh

Engineering faculty of Khoy, Urmia university of technology, Urmia, Iran  
 Graduated of civil engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran  
 Faculty of civil engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

### Abstract

With the help of mathematical models, complex hydraulic conditions and especially the presence of two-phase flows over spillway chutes can be simulated in three dimensions with acceptable accuracy. By establishing different flow flows, the possibility of vacuum generation in this structure can be examined. In the present study, the possibility of cavitation and cure on the service spillway of Aghchai dam using numerical methods in Flow-3D software is evaluated. The flood flow regime has 4400 and 1065 cubic meters per second rate, which is provided by the project consultant. The free flow level in this model is calculated by volume of fluid (VOF) method. The results of flow simulation at a flow rate of 4400 cubic meters per second show that cavitation is very likely to occur at the ogee and the angle change of the chute channel where should be prevented by taking some actions. However, in lower flows, such as 1065 cubic meters per second, due to lower speed and lack of separation of flow from the bed, the occurrence probability of vacuum generation is low and not very significant. The results obtained are in good agreement with the results of the project consultant.

**Keywords:** Ogee spillway, Numerical modeling, Flow-3D software, Aghchai dam, VOF method, Cavitation.

### ۱- مقدمه

ایجاد فرسایش و خوردگی می‌کند. تبدیل مجدد حباب‌ها به مایع و فشار ناشی از انفجار آن گاهی به ۱۰۰۰ مگا پاسکال می‌رسد [۱]. از آنجایی که سطوح تماس این حباب‌ها با بستر سرریز بسیار کوچک می‌باشند نیروی فوق‌العاده زیادی در اثر این انفجارها به بسترهای سرریزها و حوضچه‌های آرامش وارد می‌کند. 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. این مرحله را فرسایش کاویتاسیون می‌نامند [۱]. در سرریزهای بلند چون سرعت سیال فوق‌العاده زیاد می‌باشد، در نتیجه ناصافی‌های حتی در حد چند میلیمتر هم می‌تواند باعث ایجاد جدا شدگی جریان شود. هر نوع روزنه 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 و

سرریزها از جمله سازه‌های هیدرولیکی می‌باشند که در معرض شدید وقوع کاویتاسیون قرار دارند. در طول سرریز در اثر وجود ناصافی‌ها و یا ناهمواری‌های کف سرریز، خطوط جریان از بستر خود جدا شده و بر اثر این جداشدگی فشار موضعی در منطقه جداشدگی کاهش یافته و ممکن است که به فشار بخار سیال (فشار بخار فشاری است که در آن مایع شروع به جوشیدن کرده و با بخار خود به حالت تعادل می‌رسد) برسد. در این صورت بر اثر این دو عامل 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 منفجر می‌شود و تولید سر و صدا می‌کند و امواج ضربه‌ای ایجاد می‌کند و به مرز بین سیال و سازه ضربه زده و پس از مدت کوتاهی روی مرز جامد

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: s.pirboudaghi@uut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۰۱

قسمت اوجی ممکن است رخ دهد. بطور مثال سطح آبروی سرریز که ۴۰ تا ۵۰ متر پایین‌تر از سطح تراز آب مخزن می باشد بطور حاد در معرض خطر کاویتاسیون قرار دارد [۲].

تحقیقات و مطالعات گسترده‌ای پیرامون وقوع این پدیده در سرریزها انجام پذیرفته است. اهم فعالیت‌های انجام پذیرفته در این موضوع را می‌توان در مطالعه و بررسی مدل‌های هیدرولیکی از قبیل های [۳] به صورت رابطه بین مدل و نمونه اصلی<sup>۱</sup> اشاره کرد. ممبر [۴] به بررسی آزمایشگاهی نمونه‌های بتنی در معرض کاویتاسیون پرداخت و نتیجه گرفت که نمونه با سختی بالاتر که تحمل انتقال تنش‌های موضعی بیشتری دارد، مقاومت بهتری دارند. نی [۵] تاثیر زبری سطح اثر زبری و ناهواری‌های بستر و نیز سایر خصوصیات جریان و بستر جامد در شکل‌گیری و شدت در کاویتاسیون سرریز در مقیاس آزمایشگاهی را بررسی و نشان داد که زبری بیشتر باعث کاهش پدیده کاویتاسیون می‌شود. این موضوع روی سرریز اوجی دارای نتایج مشابهی می‌باشد [۶]. فریزل و همکاران [۷] کاویتاسیون در سرریز پله‌ای را تحت شرایط کنترل شده آزمایشگاهی بررسی کردند و آسیب کاویتاسیون مورد بررسی قرار گرفته است. متوس و همکاران [۸] نشان دادند که در سرریز پله‌ای با افزایش دبی و همچنین ارتفاع پله‌ها میزان خطر کاویتاسیون افزایش پیدا می‌کند. فرودی و براتی [۹] با بررسی آزمایشگاهی تاثیر دیواره‌های همگرای سرریز اوجی نتیجه گرفتند که کمترین شاخص کاویتاسیون در زاویه صفر و با دبی ۴۰/۵۲ لیتر بر ثانیه در متر رخ می‌دهد.

نقش هوادهی جریان در کاهش وقوع پدیده کاویتاسون توسط چانسون [۱۰] مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعات مشابهی با مدل دانگ و همکاران [۱۱، ۱۲] ارائه شده است. فلدر و چانسون [۱۳] تاثیر تخلخل پله‌های سرریز پله‌ای بر روی هوادهی جریان و احتمال وقوع کاویتاسیون را مدلسازی کرده و نشان دادند که تخلخل باعث کاهش این پدیده می‌شود. بررسی تجربی پارامترهای فشار و مشخصات هوادهی روی شوت‌های پله‌ای نشان می‌دهد که فاکتور محل هوادهی بیشترین اثر در کاهش کاویتاسیون دارد [۱۴]. همچنین می‌تواند محل هوادهی را به صورت رابطه‌ای تخمین زد و طراحی کرد [۱۵] یا بر روی سرریز سیفونی هم عملکرد آن را بررسی کرد [۱۶].

با توسعه تکنیک‌های پیشرفته عددی قابلیت مدلسازی جریان متلاطم امکان‌پذیر شده است. از این روش‌ها برای تعیین پروفیل سرعت، دبی جریان و تلاطم جریان می‌توان استفاده نمود [۱۷]. با توجه به اینکه در جریان روی سرریز متلاطم دو فاز آب و هوا است، شبیه‌سازی جریان روی این گونه سرریزها با استفاده از مدل‌های آشفتگی RNG و با در نظر گرفتن روش جزء حجم سیال<sup>۲</sup> (VOF) به نتایج دقیق‌تری منجر می‌شود [۱۸]. مطالعه عددی سه بعدی دانگ و دو [۱۹] بر روی تونل سرریز نشان می‌دهد که با بسته شدن هر چه بیشتر دریچه انتهایی، امکان هوادهی جریان داخل تونل کمتر شده و خطر کاویتاسیون افزایش می‌یابد.

صدمه کاویتاسیون به سازه‌های طراحی شده برای سرعت‌های بالا و در سدهای بلند و سرریزهای بزرگ یک مشکل دائمی است که باید با

ارزیابی ریسک [۲۰] و با استفاده از راهکارهایی خسارت آن را کاهش داد. با توجه به مطالب فوق واضح است در پروژه بزرگی مثل سد آغ‌چای و سرریز آن که با هزینه‌های زیاد به عنوان اولین سد خاکی قوسی کشور به بهره‌برداری رسیده و نقش مهمی در کشاورزی و تامین آب شرب منطقه ایفا می‌کند، کاهش هزینه‌های نگهداری و افزایش بازده مکانیکی از مهمترین دغدغه‌های امروز است. این تحقیق در پی کاهش هزینه‌های جاری است که از طریق فرسایش سطح رخ داده و نیز افزایش راندمان مکانیکی با کمینه کردن کاویتاسیون می‌باشد. لذا ارزیابی احتمال وقوع کاویتاسیون و دبی خروجی سرریز سد آغ‌چای 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 (RANS) بیان می‌شوند [۲].

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 [۲]:

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

که 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  $(z)$  و  $(y)$  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 تاملیم 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  $x_i$ ،  $P$  فشار کل،  $\rho$  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:

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

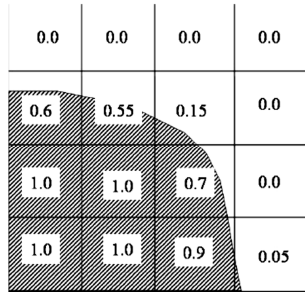
در جریان‌های آشفته، تنش برشی شامل دو جمله بوده و علاوه بر تنش برشی ناشی از مولفه متوسط جریان، تنش برشی دیگری ناشی از مولفه‌های نوسانی سرعت ایجاد می‌شود که به تنش‌های رینولدز معروف بوده و به صورت معادله زیر نشان داده می‌شود:

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

<sup>1</sup> Prototype

<sup>2</sup> Volume of fluid

شامل سیال نمی‌باشد. همانند شکل ۱ بعضی از المان‌ها پر و بعضی خالی هستند و تعداد کمی از المان‌ها هم شامل سطح آزاد می‌باشند با به عبارتی دیگر نیمی پر می‌باشند.



شکل ۱- نمونه‌ای از مقادیر تابع VOF در نزدیکی سطح آزاد [۲۱]

تابع کسر سیال  $F$  که جزء حجم سیال<sup>۵</sup> نامیده می‌شود، در محیط سیال برابر با یک و در خارج از سیال برابر با صفر می‌باشد. با داشتن مقدار کسر  $F$  می‌توان مکان عمومی و زاویه سطح آزاد در المان سطحی را بدست آورد و این حالت با سیال موجود در المان‌های مجاور کنترل می‌شود. سیال در المان‌های سطحی می‌بایست در نزدیک‌ترین فاصله با المان‌های مجاور که بیشترین سیال را دارند قرار بگیرد. برای یک حجم کنترل مقدار تابع  $F$  همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است در بازه  $[0/0 و 1/0]$  قرار دارد شکل این تابع دینفرانسیلی در حالت دو بعدی چنین است:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} = 0 \quad (۶)$$

در حل معادله فوق در سلولی که پر از سیال می‌باشد مقدار  $F$  برابر یک می‌باشد. ولی در سلول خالی از سیال این مقدار برابر صفر است. در سلول سطحی این مقدار بین صفر و یک می‌باشد. به هنگام استفاده از معادلات ناویراستوکس و معادله VOF پارامترهای لزجت و چگالی سیال در هر سلول طبق روابط زیر معین می‌گردد، که در سلول‌های سطحی ترکیب دو فاز سیال در چگالی و لزجت هر سلول دیده می‌شود:

$$\rho = \sum_{i=1}^n F_i \rho_i \quad \mu = \sum_{i=1}^n F_i \mu_i \quad (۷)$$

پیکربندی سیال به صورت جمله‌های یک تابع حجم سیال (VOF) تعریف می‌شود  $(F(x,y,z,t))$ . بیان  $F$  وابسته به نوع مسئله‌ای است که مدل می‌شود. مسائل غیرقابل تراکم شامل سیال با سطح آزاد یا دو سیال با سطح مشترک است. برای یک سیال،  $F$  بیان‌گر حجم اشغال شده بوسیله سیال است. بنابراین جایی که  $F=1$  است، سیال و جایی که  $F=0$  است، حباب و حفره داریم. نواحی حبابی و خالی نواحی هستند که جرم سیال در آنجا نداریم و یک فشار یکنواخت در آن‌ها حاکم است. تعبیر فیزیکی این نواحی مانند جاهایی است که بخار یا گاز با دانسیته قابل صرف‌نظر در مقابل سیال، پر شده است. مزیت بزرگ روش VOF این است که سیال در یک شبکه ثابت حرکت می‌کند و در

در معادلات فوق  $1/2$  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.  $\delta_{ij}$  (دلنای کروئکر) برای کاربردی کردن مدل لزجت گردابه‌ای (EVMs<sup>۱</sup>) است. انرژی جنبشی آشفتگی در واحد جرم ( $k$ ) به صورت زیر بیان می‌شود:

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u_i^2} + \overline{u_j^2} + \overline{u_k^2}) \quad (۵)$$

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

به منظور حل میدان جریان آشفته براساس معادلات پیوستگی و رینولدز، نیاز است تا تنش‌های 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 سرعت‌ها در ۳ امتداد  $x, y$  و  $z$  و به علاوه فشار) معین می‌شوند.

جهت بیان تنش‌های رینولدز و یا به عبارت بهتر، بستن سیستم معادلات فوق از مدل‌های آشفتگی استفاده می‌شود. در مدل‌های مزبور، جمله لزجت گردابه‌ای با استفاده از نظریه‌های مختلف (نظیر نظریه اختلاط) بیان شده و ارتباط بین تنش‌های رینولدز و مولفه‌های متوسط سرعت برقرار می‌شود. واضح است که حل معادلات فوق نیازمند استفاده از روش‌های عددی است. مدل‌های ریاضی که از روش‌های عددی جهت حل میدان‌های سیال استفاده می‌شود به دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۲</sup> معروف هستند. دینامیک سیالات محاسباتی، ابزاری بر اساس روش‌های عددی است که جهت شبیه سازی رفتار سیستم‌هایی شامل جریان سیال، انتقال گرما و دیگر فرآیندهای وابسته به کار می‌رود.

Flow-3D نرم‌افزاری قوی در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی می‌باشد که تولید، توسعه و پشتیبانی آن توسط Flow Science, Inc. صورت گرفته که شامل الگوهای فیزیکی مختلفی از جمله کاوناسیون، آشفتگی، تعیین الگوی جریان روی انواع سرریزها و جریان روی شیب‌شکن‌ها می‌باشد. این نرم‌افزار از دو تکنیک عددی روش حجم سیال (VOF) برای نشان دادن رفتار سیال در سطح آزاد و روش کسر مساحت-حجم مانع (FAVOR<sup>۳</sup>) برای شبیه‌سازی سطوح و احجام صلب استفاده می‌کند. نرم‌افزار Flow-3D معادلات حاکم بر حرکت سیال را با استفاده از تقریب‌های تفاضل و حجم محدود حل می‌کند [۲۱].

## ۲-۲- معادله حاکم بر روش VOF

روش انتقال VOF موجود در Flow-3D بر مبنای تقریبات سلول دهنده - پذیرنده<sup>۴</sup> هست. روش استاندارد از عملگر Splitting و مقادیر تابع VOF از زمان قبل برای محاسبه شار عبوری در هر سه جهت مختصات محاسبه می‌کند. وقتی سطح آزاد وجود دارد همه المان‌ها

<sup>1</sup> Eddy Viscosity Models

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

<sup>3</sup> Fractional Area/Volume Obstacle Representation

<sup>4</sup> Donor-acceptor

<sup>5</sup> Volume of Fraction

نتیجه به تغییر شکل و بازسازی شبکه نیازی نیست و همچنین جرم‌های سیال می‌توانند بر اساس قوانین دینامیک با هم ترکیب یا از هم جدا شوند و به هیچ منطق خاصی برای تعیین تقاطع سطوح نیاز نیست [۲۱].

### ۲-۳- مشخصات سد آغ چای

رودخانه آغ چای از میان دشت چایپاره عبور می‌کند. موقعیت جغرافیایی ساختمان سد آغ چای (شکل ۲) در فاصله زمینی ۴۲ کیلومتری شهرستان خوی و ۳۵ کیلومتری شهر چایپاره قرار داشته و ارتباط زمینی به محل ساختمان سد از طریق جاده قدیم خوی به چایپاره معروف به جاده همزیان می‌باشد. گستره شبکه آبیاری و زهکشی آغ‌چای اراضی دشت‌های چایپاره و نازک را در بر می‌گیرد. به منظور تخلیه مطمئن سیلاب‌های ورودی به مخزن سد آغ‌چای، از یک سرریز آزاد واقع در جناح چپ سد بهره گرفته شده است (شکل ۳) [۲۲]. دبی سیلاب از طریق سیستم تخلیه سیلاب به آبراهه واقع در جناح چپ سد هدایت شده و از طریق این آبراهه به رودخانه اصلی هدایت می‌گردد. سیستم تخلیه سیلاب به نحوی طراحی گردیده است که امکان تخلیه حداکثر سیلاب متحمل بدون خطر لبریز شدن آب از روی تاج سد فراهم باشد. ظرفیت سیستم تخلیه سیلاب بنحوی انتخاب شده است که هنگام وقوع سیلاب ۱۰۰۰۰ ساله بعلاوه بادی با دوره بازگشت ۱۰ ساله حداکثر رقوم سطح آب با در نظر گرفتن ارتفاع موج و ارتفاع خیزش<sup>۱</sup> بالاتر از تاج سد قرار نگیرد. پروفیل اوجی، ارتفاع دیوارهای کانال تندآب و حوضچه آرامش براساس استاندارد USBR با سیلاب حداکثر متحمل<sup>۲</sup> (در جهت کنترل فشارهای منفی) و با عمق آب بهنگام وقوع بدون در نظر گرفتن ارتفاع آزاد، کنترل شده است.

این سیستم شامل کانال تقرب در ابتدا جهت هدایت جریان به سمت مقطع کنترل از یک کانال دوزنقه‌ای شکل که در توپوگرافی مقابل مقطع کنترل سرریز حفاری می‌گردد بهره گرفته شده است. کف کانال مورد بحث در رقوم ۱۲۹۲/۵ متر از سطح دریا واقع شده است و عرض آن از ۱۱۵/۵ متر در ابتدا تا ۸۰ متر در محل مقطع کنترل سرریز متغیر می‌باشد. شیب جناحین کانال تقرب معادل ۱:۱ می‌باشند و طول کانال تقرب در محور سرریز در حدود ۷۸/۵ متر می‌باشد. حداکثر سرعت جریان در کانال تقرب معادل ۳ متر بر ثانیه فرض شده است.

مقطع کنترل اوجی شکل به طول ۸۰ متر می‌باشد. تاج اوجی در رقوم عادی بهره‌برداری (معادل ۱۲۹۶/۵ متر از سطح دریا) واقع شده است و منحنی وجه پایین دست آن براساس بار طراحی ۶/۵ متر از طریق معادله  $y=0.1309 x^{1.775}$  تعیین گردیده است. این منحنی در طول ۳/۵ متر و در رقوم ۱۲۹۵/۰۷ متر از سطح دریا با قوسی از دایره به شعاع ۲۴/۳۱ متر و زاویه مرکزی ۳۰/۸۷۴ درجه و در رقوم ۱۲۹۱/۱۲ متر از سطح دریا (در فاصله ۱۶/۳۳ متری از محور سرریز) به کف کانال تندآب (با شیب ۴/۰۵ درصد) متصل می‌شود. جریان عبوری سرریز از طریق یک کانال بتنی مستطیل شکل با عرض ثابت ۸۰ متر در ابتدا و در انتها به ۴۰ متر کاهش یافته و به سمت پرتاب‌کننده جامی شکل هدایت می‌گردد.

کانال تندآب از رقوم ۱۲۹۱/۱۲ متر از سطح دریا شروع می‌گردد. پروفیل کف این کانال از رقوم فوق‌الذکر تا رقوم ۱۲۸۴/۳۷۳ متر از سطح دریا بصورت خطی در طول ۱۶۶/۶ متر و با شیب ۴/۰۵ درصد ادامه می‌یابد. در این رقوم شیب پروفیل کف با قوس محدبی از دایره به شعاع ۲۵ متر و زاویه مرکزی ۱۵/۱۷ درجه از ۴/۰۵ درصد در بخش ابتدایی به ۳۰/۵۳ درصد افزایش می‌یابد. رقوم انتهای قوس محدب معادل ۱۲۸۳/۲۳۸ متر از سطح دریا می‌باشد که کانال تندآب از این رقوم به صورت خطی (با شیب کف ۳۰/۵۳ درصد و در طول ۱۱۱/۱۳ متر) به پرتاب‌کننده جامی شکل متصل می‌گردد.

برای هدایت جریان آب رها شده توسط سرریز به آبراهه پایین دست از یک پرتاب‌کننده جامی کل بهره گرفته شده است. این سازه در فاصله ۲۹۵/۲۷ متری محور سرریز و با عرض ثابت ۴۰ متر قرار داده شده است. ارتفاع دیوارهای جناحین کانال تندآب و پرتاب‌کننده معادل ۳/۵ متر در نظر گرفته شده است.



شکل ۲- نمایی از سد مخزنی آغ چای



شکل ۳- نمایی از سرریز اوجی سد آغ چای

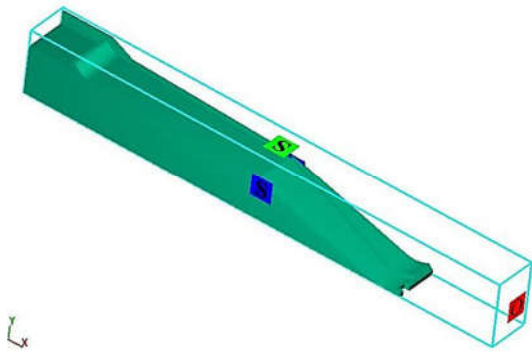
### ۲-۴- مدل‌سازی هندسی و تولید شبکه مناسب

در این تحقیق ورژن نرم‌افزار به کارگرفته شده Flow-3D ۷10.1.1.05 است [۲۱]. با توجه به قابلیت نرم‌افزار مش‌بندی و شرایط مرزی جهت شبیه‌سازی عددی و روند حساسیت‌سنجی نسبت به پارامترهای یاد شده در خود نرم‌افزار Flow-3D انجام می‌شود. سایر تغییرات جهت بررسی تاثیر پارامترهای هیدرولیکی موثر در مدل صحت‌سنجی و کالیبره شده و شبیه‌سازی می‌شود. حداکثر سیلاب محتمل عبوری از روی سرریز ۴۴۰۰ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. با توجه به اینکه در سیلاب‌های کمتر هم احتمال کاویتاسیون وجود دارد و همچنین برای هماهنگی و مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج مشاور طرح، دبی ۱۰۶۵ مترمکعب بر ثانیه هم بررسی و مدل‌سازی شده است

<sup>1</sup> Run up & Setup

<sup>2</sup> PMF

با توجه به اینکه دبی تخلیه سرریز ۴۴۰۰ و ۱۰۶۵ مترمکعب بر ثانیه است و بخاطر تقارن نصف آن مدلسازی شده، لذا نصف دبی ورودی به ترتیب ۲۲۰۰ و ۵۳۲/۵ مترمکعب بر ثانیه به مدل معرفی شده است. بقیه پارامترها پیش فرض هستند. در مرز خروجی یا انتهای مدل شرایط خروج جریان به صورت Outflow 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>۲</sup> با کسر سیال<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 شکافت شار 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 انتخاب گام زمانی است که به صورت اولیه برابر ۰/۰۰۱ 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. در خروجی‌های مدل پارامترهای هیدرولیکی جریان نیز اضافه شده و پس از شبیه‌سازی بدست می‌آید. با استفاده از نتایج نرم‌افزار در شکل ۵ ملاحظه می‌شود که گام زمانی بیشتر از ۰/۰۰۵ ثانیه برای پایداری روش صریح کافی است.

[۲۳]. در General Tab، سیال به صورت تراکم‌ناپذیر و با سطح آزاد معرفی شده است. زمان کل شبیه‌سازی هم ۶۰ و ۷۰ ثانیه در نظر گرفته شده که از طریق پایدار شدن نیمرخ سطح آزاد جریان بدست می‌آید. مدلسازی در سیستم SI بوده و سه گزینه Gravity and non-inertial frame برای اثرات وزن سیال، Viscosity and turbulence برای اثرات تلاطم جریان روی سرریز و Cavitation برای مدلسازی 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 ۲۰ درجه با لزجت نیوتنی و مدل آشفتگی، RNG در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه فشار بخار سیال برای آب ۲۰ درجه برابر ۲۳۳۹ پاسگال (فشار اتمسفر برابر ۱۰۰ کیلوپاسگال) است، در مدل کاویتاسیون نرم‌افزار عدد مورد نظر وارد شده و زمان مشخصه برای از بین رفتن حباب‌های بخار آب در حد میکروثانیه در نظر گرفته شده است.

با استفاده از نرم‌افزار FLOW 3D می‌توان احجام ساده مثل مکعب، دایره و .. را ایجاد کرد. با توجه هندسه پیچیده پروفیل سرریز سد آغ چای و ناتوانی نرم‌افزار FLOW 3D برای مدلسازی این هندسه، کل سرریز به طور کامل توسط نرم‌افزار Autocad به نرم‌افزار Solidworks معرفی و مدل شده است. سپس خروجی نرم‌افزار Solidworks با فرمت STL، به نرم‌افزار FLOW 3D معرفی شده است. در شکل ۴ نمایی از هندسه ساخته شده و حجم کنترل آن ملاحظه می‌شود. با توجه به تقارن سرریز و صرفه‌جویی در وقت و هزینه، نیمه سمت راست سرریز به مقدار ۴۰ متر مدل شده است.

طول کل هندسه مدل در شکل ۴ برابر ۴۵۰ متر است که مرز ورودی آن متعلق به ورودی و کانال تقرب است. مرز خروجی حجم کنترل منطبق با انتهای پرتاب‌کننده جامی است به نحوی که اجازه خروج آب از این مرز تعریف می‌شود. ارتفاع حجم کنترل تا روی تراز بالای ورودی سرریز و تقریباً تا کف پرتاب‌کننده جامی به اندازه ۶۵ متر می‌باشد. ابعاد مش‌بندی با استفاده از صحت‌سنجی نتایج به این صورت که تغییر محسوسی ایجاد نشود، بدست می‌آید.

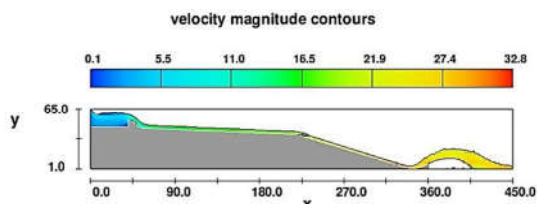
از جمله موارد مهم تاثیرگذار در تعریف و مدلسازی عددی، ایجاد شرایط مرزی متناسب با واقعیت در مرزهای قطع شده می‌باشد. برای مدلسازی عددی سرریز سد آغ چای، باید شرایط مرزی مناسب در مرزهای قطع شده به خصوص ورودی و خروجی تعریف شود. این مرزها در شکل ۴ نشان داده شده است.

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.

<sup>2</sup> Specified pressure

<sup>3</sup> Fluid fraction

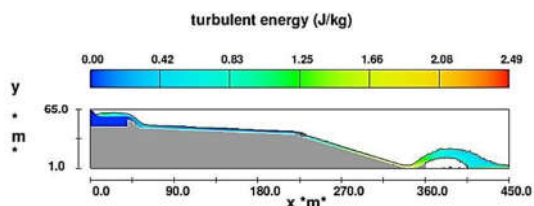
<sup>1</sup> Wall



شکل ۷- کانطور سرعت متوسط در نقاط مختلف سرریز بر حسب متر بر ثانیه در دبی ۴۴۰۰ مترمکعب بر ثانیه

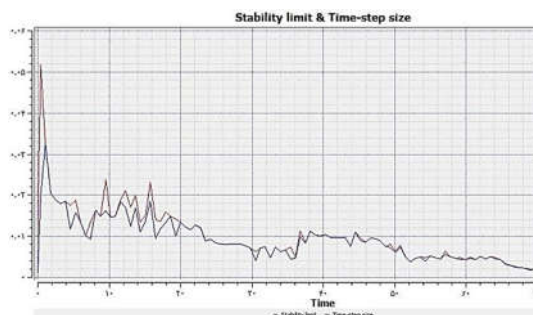
نرم افزار Flow 3D در حین شبیه سازی پیغامی نشان می دهد که جریان پس از تقریباً ۵۲٫۶ ثانیه پایا<sup>۳</sup> شده است ولی برای اطمینان بیشتر در نهایت نتایج پس از ۷۰ ثانیه بررسی و ارائه شده است. لازم به ذکر است جریان قبل از ۵۲٫۶ ثانیه پایا نیست. لذا باید گام زمانی مناسب مطابق با نتایج در شکل ۵ استفاده شود. اگرچه ابتدا آب با سرعت بیشتری به سمت انتها حرکت می کند اما پس از پایداری از سرعت آن کاسته شده و به میزان ثابتی میل می کند که نشان می دهد جریان کاملاً یکنواخت است. سیلاب جریان پس از عبور از روی بخش اوجی سرریز به بخش شوت می رسد که ضمن عبور از کانال تنداب، خود را به انتهای شوت رسانده و از طریق پرتاب کننده جامی به سوی هوا پرتاب می شود تا انرژی جریان مستهلک شود. با مشاهده نوسانات ارتفاع سطح آب و مقایسه آن با ارتفاع دیواره مشخص می شود که در حالت حداکثر سیلاب طراحی سرریز، سرریز ظرفیت انتقال دبی اوجی سیلاب ۴۴۰۰ مترمکعب بر ثانیه را داشته و تمامی سیلاب را به حوضچه آرامش انتقال می دهد.

از شکل ۷، کمترین سرعت در کانال تقرب قبل از قسمت اوجی و بیشترین سرعت در پرتاب کننده جامی به مقدار ۳۲٫۸ متر بر ثانیه است که اگرچه بسیار زیاد است ولی با توجه به ارتفاع زیاد سرریز و دبی زیاد ورودی قابل انتظار است که از طریق پرتاب به هوا مستهلک می شود. جریان در روی سرریز فوق بحرانی است. در شکل ۸ پروفیل انرژی تلامم بر روی سرریز نشان داده شده است. ملاحظه می شود که بیشترین تلامم مربوط به کف و حوالی پرتاب کننده جامی است.



شکل ۸- کانطور انرژی تلامم در نقاط مختلف سرریز

در سرریز بلندی مثل سرریز سرویس بلندتر سد کارون<sup>۳</sup> چون سرعت سیال بسیار زیاد می باشد (۳۲٫۸ متر بر ثانیه)، در نتیجه ناصافی های حتی در حد چند میلیمتر هم می تواند باعث ایجاد جداشدگی جریان شود. هر نوع روزنه یا برآمدگی، تعویض ناگهانی سطح مقطع یا هر نوع تغییر در کف سرریز مثل قسمت اوجی هم در



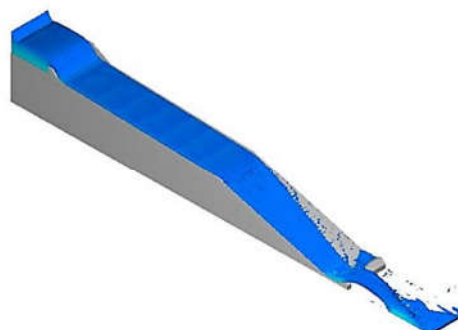
شکل ۵- اندازه گام زمانی و حد پایداری در روش حل معادلات

پس از اتمام مدل سازی باید مدل به صورت عددی شبیه سازی شود. با در نظر گرفتن شرایط اولیه مدل در شکل ۴، نرم افزار FLOW 3D توجه به زمان تعریف شده در سربرگ General به عنوان مثال ۷۰ ثانیه، گام های زمانی مناسب در نظر می گیرد و بین این گام های زمانی صحیح و خطا می کند تا به حالت نهایی برسد. همچنین ابعاد مش بندی بعد از سعی و خطا ۵، ۰ متر در نظر گرفته شده است بطوریکه دبی خروجی از مدل بعد از ریز کردن مش تغییر محسوس نکند. به منظور شبیه سازی ابتدا مدل پیش شبیه سازی<sup>۱</sup> شده و با ملاحظه خطاها ایرادات برطرف شده اند و در نهایت مدل شبیه سازی<sup>۲</sup> می شود. برای برطرف کردن خطاها و ایرادات مدل سازی پس از پیش شبیه سازی می توان با سربرگ Display به راحتی این کار را انجام داد. در حین شبیه سازی باید مراحل مختلف تحت نظر قرار گیرد تا نتایج به صورت واگرا نباشند. در نتیجه با اعمال این موارد از صحت مدل سازی اطمینان حاصل می شود. برای کاهش زمان محاسبات، فاصله زمانی به مقدار لازم تعریف شده است به صورتی که در گام های انتهایی تفاوت محسوسی بین پروفیل سطح آب در سربرگ Analyze وجود نداشته باشد.

### ۳- نتایج

#### ۳-۱- ارائه نتایج به ازاء دبی ۴۴۰۰ متر مکعب بر ثانیه

نتایج شبیه سازی پس از ۷۰ ثانیه به صورت سه بعدی در شکل ۶ و سرعت متوسط به صورت دوبعدی (نمای جانبی) در شکل ۷ نشان داده شده است.

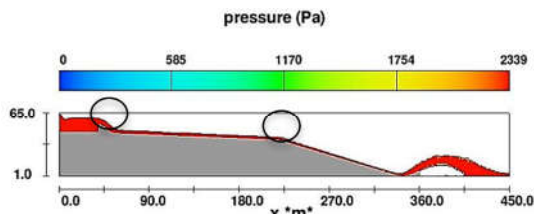


شکل ۶- نمای سه بعدی جریان سیلاب حداکثر روی سرریز در دبی ۴۴۰۰ مترمکعب بر ثانیه

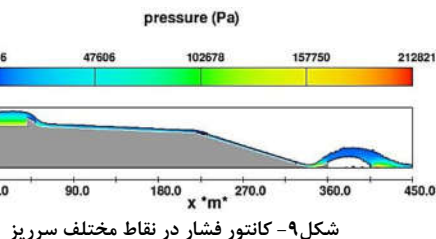
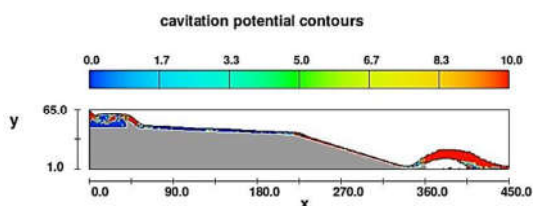
<sup>3</sup> Steady

<sup>1</sup> Preprocess Simulation  
<sup>2</sup> Simulate

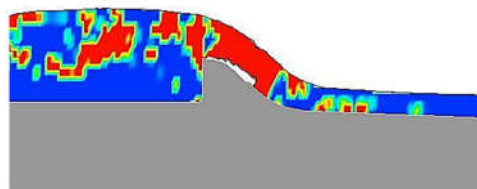




شکل ۱۰- کانتور فشار در نقاط مختلف سرریز با محدودیت حداقل صفر و حداکثر فشار بخار آب ۲۰ درجه سلسیوس



شکل ۹- کانتور فشار در نقاط مختلف سرریز



شکل ۱۱- کانتور نقاط دارای پتانسیل کاویتاسیون بر روی سرریز در دبی ۴۴۰۰ مترمکعب بر ثانیه

- کنترل شاخص کاویتاسیون برای هندسه مورد نظر
  - کنترل خسارت ناشی از کاویتاسیون با هوادهی جریان
- اگر در مناطقی وقوع کاویتاسیون تخمین زده شود، آنگاه هندسه سرریز یا ناهمواری سطح آن باید اصلاح شود. برای قسمت اوجی سرریز سرویس سد آغ چای، باید منحنی اوجی اصلاح شده و قسمت مستعد کاویتاسیون بلندتر شود تا منحنی اوجی اصلاح شده و امکان کاویتاسیون از بین برود. به عنوان مثال می‌توان در رابطه اولیه  $y=0.1309 x^{1.775}$  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. بدین صورت با حذف فاصله بین کف بتنی و آب امکان خلازایی کمتر شود. اگر با این کار نتیجه‌ای حاصل نشد، هوادهی جریان باید انجام شود.

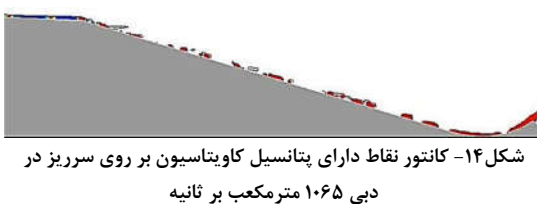
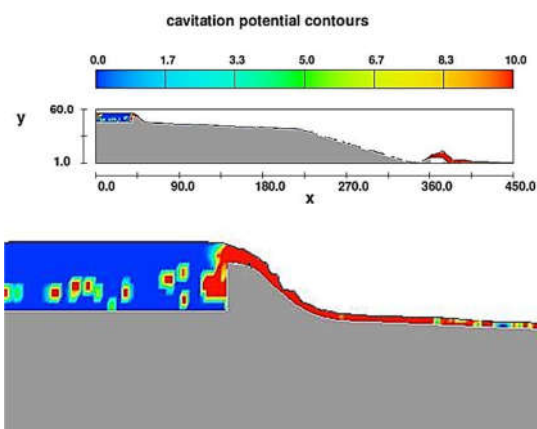
برای مقابله با پدیده کاویتاسیون در قسمت تغییر شیب تندآب میتوان شیب قسمت پایینتر را اصلاح و کم کرده و با طول بیشتر اجرا کرد که باید شرایط توپوگرافی فراهم بوده ولی هزینه اجرای بیشتری در پی خواهد داشت. لذا به عنوان راهکار عملی‌تر، بایستی شیار هوادهی پیش‌بینی شود که از دیواره‌های اطراف به لوله‌های هواده 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

صورت طراحی نادرست می‌تواند باعث جدایی خطوط جریان شود. بنابراین سطح آبروی سرریز سرویس سد آغ چای که ۶۵ متر پایین‌تر از سطح تراز اوجی می‌باشد بطور حاد در معرض خطر کاویتاسیون قرار دارد. برای بررسی خطر کاویتاسیون در شکل ۹ کانتور فشار جریان آب روی سرریز سرویس سد آغ چای در قسمت‌های مختلف نشان داده شده است.

ملاحظه می‌شود که فشار آب در محدوده ماکزیمم ۲۱۲۸۲۱ پاسکال در کف پرتاب‌کننده جامی تا مینیمم فشار نسبی ۷۴۶۶ پاسکال در نقاط مختلف 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 ۲۰ درجه فشار بخار برابر ۲۳۳۹ پاسکال می‌باشد. بنابراین با استفاده از امکانات نرم‌افزار Flow-3D، مقدار حداکثر کانتور فشار به ۲۳۳۹ پاسکال محدود شده و در نواحی که فشار کمتر از آن باشد، آب شروع به جوشیدن کرده و کاویتاسیون اتفاق می‌افتد. در شکل ۱۱، با استفاده از کانتور نقاط دارای پتانسیل کاویتاسیون نرم‌افزار، این پدیده به راحتی قابل تشخیص است.

از اشکال ۱۰ و ۱۱ ملاحظه می‌شود در ۲ ناحیه از طول سرریز کاویتاسیون ایجاد می‌شود. قسمت اوجی سرریز و تغییر شیب تندآب، قسمت‌هایی هستند که دارای مشکل کاویتاسیون می‌باشند و باید از وقوع آن جلوگیری کرد. به دلیل جدایی جریان از بستر در مقطع اوجی و همچنین در تغییر شیب کانال تندآب از ۴/۵ به ۳/۵ درجه چرخش جریان ایجاد می‌شود. با سرعت بالای جریان و کاهش فشار موضعی، دما افزایش یافته و در نتیجه حباب ایجاد می‌شود تا به مرحله‌ای می‌رسد که حباب ایجاد شده فروریزی و منفجر می‌شود. براینکه این انفجار خلاءزایی یا کاویتاسون در این نقاط بوجود می‌آورد.

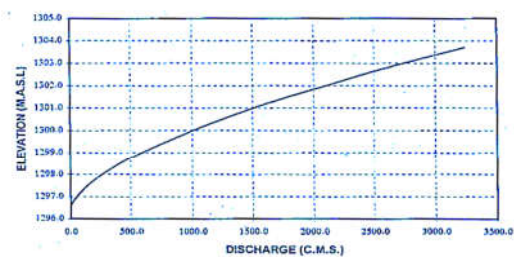
کاویتاسیون به خودی خود خطری برای هیچ سازه‌ای ندارد. اگر کاویتاسیون در نزدیکی جدار روی دهد، ممکن است خسارت‌هایی را در پی داشته باشد و سازه در معرض خسارت جدی قرار گیرد. در طی تجربه و بررسی عملکرد سرریزها ( شامل مدل و آزمایش بر روی پروتوتیپ) این طور نتیجه‌گیری شده که کاویتاسیون در اثر عملکرد مجموعه‌ای از 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. خسارت ناشی از کاویتاسیون را می‌توان با دو روش زیر کنترل کرد [۲۴]:



شکل ۱۴- کانتور نقاط دارای پتانسیل کاویتاسیون بر روی سرریز در دبی ۱۰۶۵ مترمکعب بر ثانیه

### ۳-۳- ارائه نتایج مشاور طرح مهتاب قدس

مطالعات پخش سیلاب توسط مشاور طرح مهتاب قدس به کمک برنامه کامپیوتری FLD4 انجام گرفته است. برنامه مذکور بررسی و ارزشیابی تاثیر تغییرات یک سیل کوهه که از مخزن عبور می‌نماید را به کمک روش هیدرولیکی پالس انجام می‌دهد. در شکل ۱۵ نحوه پخش سیلاب به صورت رقوم ارتفاعی مخزن و دبی سیلاب نشان داده شده است [۲۳].



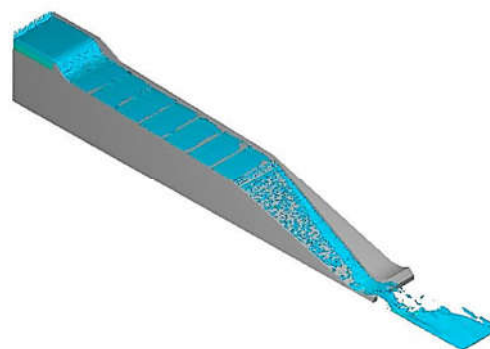
شکل ۱۵- منحنی رقوم مخزن و دبی سیلاب با برنامه FLD4 [۲۳]

برای بررسی وضعیت کاویتاسیون از سه پارامتر وضعیت خطر، عدد کاویتاسیون و پتانسیل خطر به ازای ناهمواری مختلف استفاده شده است. محاسبات این پارامترها به کمک برنامه کامپیوتری WS77 مشاور برای دبی‌های مختلف عبوری از سرریز ۱۰۶۵، ۲۲۵۳ و ۴۴۰۰ مترمکعب بر ثانیه انجام گرفته است (جدول ۱) [۲۳].

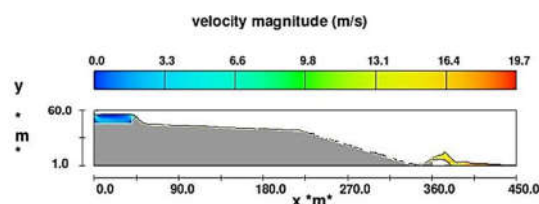
در طول شبیار به راحتی از طریق لوله‌های هوادهی انجام شود. در واقع با افت فشار و ایجاد خلا در ناحیه جدا شده روی شبیار، از طریق لوله‌های هواده کناری مکش صورت گرفته و کمبود فشار جبران می‌شود تا امکان ظهور پدیده کاویتاسیون از بین رود. همانطور که از اشکال ۱۰ و ۱۱ مشخص است، جریان پس از عبور از روی پرتاب‌کننده جامی شکل هم، 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. باید توجه شود که حباب بخار آب با انتقال به منطقه پرفشار جریان آب در اثر تصعید شدن باعث ایجاد موج انفجاری و تخریب بستر می‌شود، در حالیکه حباب هوای مخلوط در آب باعث ابری شدن جریان آب شده، امکان انفجار نداشته و تخریبی به همراه ندارد.

### ۳-۲- ارائه نتایج به ازاء دبی ۱۰۶۵ مترمکعب بر ثانیه

بعد از run شدن مدل در نرم‌افزار و تکرار محاسبات در آن به ازاء دبی ۱۰۶۵ مترمکعب بر ثانیه، روی سطح سرریز در ثانیه ۶۳ از گذر جریان پایا گردید. نتایج شبیه‌سازی به صورت سه بعدی در شکل ۱۲ و سرعت متوسط به صورت دوبعدی در شکل ۱۳ نشان داده شده است. بیشترین سرعت در پرتاب‌کننده جامی به مقدار ۱۹/۷ متر برثانیه است که با توجه به کاهش دبی مورد انتظار است. همچنین بخاطر دبی کم و شیب زیاد در قسمت انتهایی جریان حالت منقطعی دارد. در شکل ۱۴ کانتور نقاط دارای پتانسیل کاویتاسیون توسط نرم‌افزار ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که مجدداً در قسمت اوجی و همچنین قسمت تغییر شیب احتمال وقوع کاویتاسیون وجود دارد ولی توجه به سرعت کمتر جریان در دبی ۱۰۶۵ مترمکعب بر ثانیه هیچگونه جدایی جریان از بستر ایجاد نمی‌شود. در نتیجه احتمال فرآیند بوجود آمدن حباب ناشی از خلزایی یا کاویتاسیون بسیار کم بوده و چندان قابل توجه نیست.



شکل ۱۲- نمای سه بعدی جریان سیلاب حداکثر روی سرریز در دبی ۱۰۶۵ مترمکعب بر ثانیه



شکل ۱۳- کانتور سرعت متوسط در نقاط مختلف سرریز بر حسب متر برثانیه در دبی ۱۰۶۵ مترمکعب بر ثانیه



جدول ۱- وضعیت خطر و عدد کاویتاسیون

کل دبی عبوری از سرریز	رقوم مخزن	مقطع اوجی شکل و کانال تندآب		
		وضعیت خطر کاویتاسیون	حداقل عدد کاویتاسیون	بیشترین پتانسیل خسارت
۱۰۶۵	۱۳۰۰/۲۳	۰/۰۲۵	۰/۳۳	۹۵
۲۲۵۳	۱۳۰۲/۲۶	۰/۱۱	۰/۲۴	۱۵۰
۴۴۰۰	۱۳۰۴/۳۱	۰/۲۹	۰/۱۳	۶۷۰

بر اساس نتایج خروجی از نرم‌افزار WS77 ملاحظه می‌شود که حداقل خسارت کاویتاسیون در دبی ۱۰۶۵ متر مکعب بر ثانیه ۰/۰۲۵ درصد می‌باشد که مورد توجه نیست. ولی در دبی بالاتر مانند ۲۲۵۳ و ۴۴۰۰ متر مکعب بر ثانیه پتانسیل خسارت افزایش خواهد یافت. حتی ممکن است در دبی حداکثر سیلاب طراحی ۴۴۰۰ متر مکعب بر ثانیه خسارت فاجعه بار رخ داده و مقطع اوجی حالت اولیه خود را از دست دهد [۲۳]. مقایسه نتایج مشاور مهتاب قدس در مقایسه با نرم‌افزار FLOW-3D نشان می‌دهد که با افزایش دبی سیلاب خطر وقوع کاویتاسیون هم بالاتر خواهد رفت و بیشترین خطر در دبی بیشینه ۴۴۰۰ متر مکعب بر ثانیه می‌باشد. بنابراین نتایج هر دو یکسان بوده و همخوانی خوبی باهم دارند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

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

- استفاده از مدل عددی به جای مدل‌های آزمایشگاهی باعث صرفه‌جویی در هزینه و زمان می‌گردد.
- 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 ۴۴۰۰ متر مکعب بر ثانیه را داشته و تمامی سیلاب را به حوضچه آرامش انتقال می‌دهد.
- کمترین سرعت در کانال تقرب و بر روی اوجی و بیشترین سرعت در پرتاب‌کننده جامی به مقدار ۳۲٫۸ متر بر ثانیه است.
- بیشترین تلاطم مربوط به کف و حوالی پرتاب‌کننده جامی است. در حالت کلی جریان به غیر از کف تلاطم زیادی نداشته و در اکثر نقاط به صورت لایه‌ای است. این امر می‌تواند ناشی از طراحی درست پروفیل کف سرریز مطابق با پروفیل آب عبوری باشد. هر چند در دبی ۱۰۶۵ متر مکعب بر ثانیه حالت منقطعی در قسمت شیب انتهایی دارد.
- در ۲ ناحیه از طول سرریز سرویس سد آغ جای کاویتاسیون ایجاد می‌شود. قسمت اوجی سرریز و قسمت تغییر شیب، قسمت‌هایی هستند که دارای مشکل کاویتاسیون می‌باشند و در قسمت اوجی باید از وقوع آن جلوگیری کرد.
- برای قسمت اوجی سرریز سرویس سد آغ جای، باید منحنی اوجی اصلاح شده و قسمت مستعد کاویتاسیون بلندتر شود تا منحنی

اوجی اصلاح شده و امکان کاویتاسیون از بین برود. لذا می‌توان رابطه ریاضی جدیدی پیشنهاد کرد. اگر با این کار نتیجه‌ای حاصل نشد، هوادهی جریان باید انجام شود.

۷. در قسمت تغییر شیب شوت کانال سرریز، باید شیب دو قسمت متناسب شده و حداقل امکان شیب قسمت انتهایی با توجه به شرایط توپوگرافی کمتر شود. در غیر این صورت باید از شیار هوادهی جریان استفاده گردد تا جریان پس از عبور از روی شیار، هوادهی شده و امکان ظهور پدیده کاویتاسیون از بین رود.

۸. مدل حجم محدود به روش VOF برای مدلسازی سطح آزاد آب برنامه FLOW-3D می‌تواند ابزاری مناسب برای مدل‌سازی جریان بر روی سرریز باشد بطوریکه با نتایج مشاور طرح سد همخوانی خوبی داشته و می‌توان از داده‌های مدل مزبور، در کنار نتایج آزمایشگاهی، جهت بررسی جریان بر سازه سرریز و تحلیل و طراحی آن و کنترل آسیب کاویتاسیون بهره برد.

#### ۵- مراجع

- [1] Falvey H.T., *Cavitation in chutes and spillways*, US Department of the Interior, Bureau of Reclamation Denver, CO, USA, 1990.
- [2] Khatsuria R., *Hydraulics of spillways and energy dissipators* 1st edn, 2005.
- [3] Hay D., Model-prototype correlation: *Hydraulic structures*, in, ASCE, 1988.
- [4] Momber A.W., Short-time cavitation erosion of concrete, *Wear*, 241(1), 47-52, 2000.
- [5] Nie M.-X., Cavitation prevention with roughened surface, *Journal of Hydraulic engineering*, 127(10), 878-880, 2001.
- [6] Shabani A., H. Khozayemehzad, M. Mohsen Pourreza Bilondi, Y. Ramezani, Experimental Investigation of Roughness Effect on the Cavitation Index in Ogee-Spillway, *Journal of Hydraulics*, 16(2), 107-121, 2021.
- [7] Frizell K.W., Renna F.M., Matos J., Cavitation potential of flow on stepped spillways, *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(6), 630-636, 2013.
- [8] Matos J., Novakoski C.K., Ferla R., Marques M.G., Dai Prá M., Canellas A.V.B., Teixeira E.D., Extreme Pressures and Risk of Cavitation in Steeply Sloping Stepped Spillways of Large Dams, *Water*, 14(3), 306, 2022.
- [9] 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.
- [10] Chanson H., Aeration and deaeration at bottom aeration devices on spillways, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 21(3), 404-409, 1994.
- [11] Dong Z.-y., Su P.-l., Cavitation control by aeration and its compressible characteristics, *Journal of Hydrodynamics*, 18(4), 499-504, 2006.
- [12] Dong Z.-y., Liu Z.-p., Wu Y.-h., Zhang D., An experimental investigation of pressure and cavitation characteristics of high velocity flow over a cylindrical protrusion in the presence and absence of aeration, *Journal of Hydrodynamics*, Ser. B, 20(1), 60-66, 2008.
- [13] Felder S., Chanson H., Effects of step pool porosity upon flow aeration and energy dissipation on pooled stepped spillways, *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(4), 04014002, 2014.
- [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] Terrier S., Pfister M., Schleiss A.J., Performance and design of a stepped spillway aerator, *Water*, 14(2), 153, 2022.
- [16] 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.
- [17] Fadaei-Kermani E., Barani G., Ghacini-Hessaroyeh 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] Deng C., Du J., Numerical Simulation of Hydraulic Characteristics of Spillway Tunnel with Gradually Expanding Outlet and Lower outlet height, in: *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, pp. 012031, 2022.
- [20] Echávez G., Risk Analysis of Cavitation in Hydraulic Structures, *World Journal of Engineering and Technology*, 9(3), 614-623, 2021.
- [21] FLOW-3D® Version 10.0 *User's Manual FLOW-3D* [Computer software]. Santa Fe, NM: Flow Science, Inc. <https://www.flow3d.com>, 2008.
- [22] Mahab Ghods Consulting engineers, *Design appearance of Aghchay dam*, Technical archive of Regional water company of West Azerbaijan, 2002 (In Persian).
- [23] Mahab Ghods Consulting engineers, *Aghchay Technical Report of Hydraulic Structures*, 2000 (In Persian).
- [24] U.B.O. Reclamation, *Design of small dams*, Water Resources Technical Publication, 860p, 1987.