

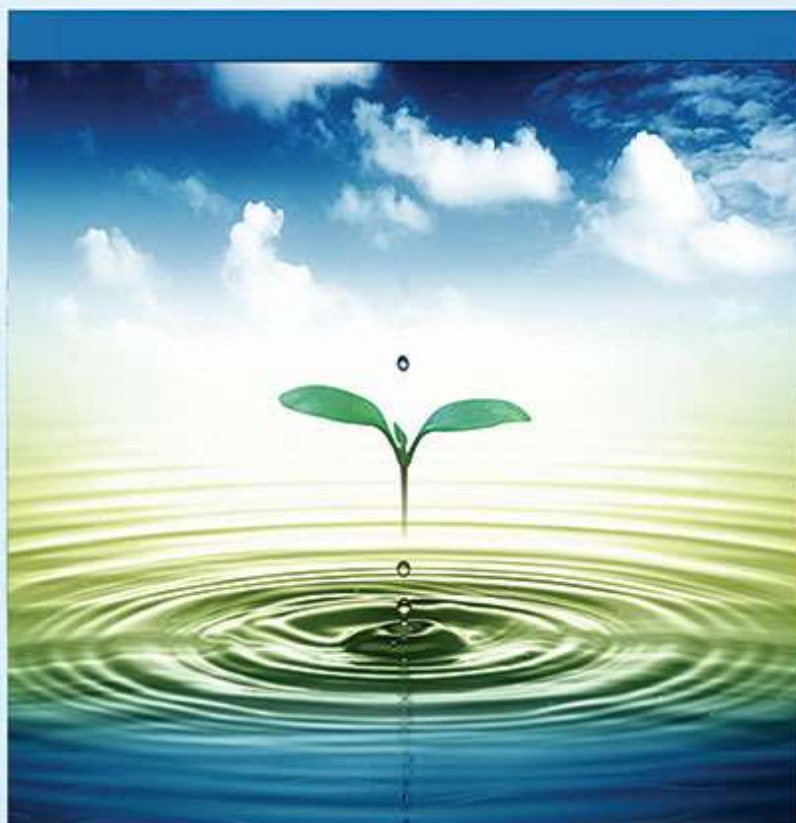
بررسی خصوصیات جریان در سرریز شوت سد گِلورد نکا با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی
میلاذ فضل اله نژاد، خسرو حسینی، حجت کرمی و سعید فرزین

دوره ۳، شماره ۱، بهار ۱۳۹۶، صفحات ۴۰ - ۵۳

Vol. 3(1), Spring 2017, 40 - 53

**Assessing Flow Characteristics in Chute
Spillway of Neka-Gelvard Dam using
Computational Fluid Dynamics**

Fazlollahnejad M., Hosseini Kh., Karami H. and
Farzin S.



www.jewe.ir

OPEN  ACCESS

نحوه ارجاع به این مقاله: فضل اله نژاد م.، حسینی خ.، کرمی ح. و فرزین س. (۱۳۹۶). بررسی خصوصیات جریان در سرریز شوت سد گِلورد نکا با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی. محیط زیست و مهندسی آب، جلد ۳، شماره ۱، صفحات: ۴۰ - ۵۳.

How to cite this paper: Fazlollahnejad M., Hosseini Kh., Karami H. and Farzin S. (2017). Assessing flow characteristics in chute spillway of Neka-Gelvard dam using computational fluid dynamics. J. Environ. Water Eng., 3(1), 40 -53 .

بررسی خصوصیات جریان در سرریز شوت سد گِلورد نکا با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی

میلاذ فضل‌اله نژاد^۱، خسرو حسینی^۲، حجت کرمی^۳ و سعید فرزین^{۳*}

۱- کارشناس ارشد، گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

*نویسنده مسئول: Saeed.farzin@semnan.ac.ir

تاریخ دریافت: [۱۳۹۵/۱۰/۰۷]

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۵/۱۱/۱۱]

چکیده

در سال‌های اخیر با بالا رفتن استاندارد ایمنی سدها، علاقه مهندسين هیدرولیک به طراحی یک سیستم استهلاک انرژی اقتصادی و مطمئن در مجاری اصلی تخلیه سیلاب، افزایش یافته است. سرریز لبه‌آبریز و پرتاب‌کننده جامی شکل از جمله پرکاربردترین سرریزها و مستهلک‌کننده‌های انرژی محسوب می‌شوند. این پژوهش با هدف مدل‌سازی و بررسی خصوصیات هیدرولیکی جریان روی شوت همگرا و پرتابه جامی شکل با شیب منفی در سد گِلورد نکا با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D و مقایسه نتایج حاصل از تغییر هندسه سرریز این سد نسبت به مدل اصلی انجام شد. مقایسه صحت‌سنجی مدل عددی با نتایج مدل فیزیکی نشان داد که مدل RNG مناسب‌ترین مدل آشفتگی است. همچنین، در خصوص ابعاد سلول‌های محاسباتی، نتایج آنالیز حساسیت مشخص کرد که مش مربعی با ابعاد ۰/۶ متر مناسب‌ترین اندازه مش است. با توجه به نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی، به علت بیشتر شدن سرعت جریان از ۲۰ متر بر ثانیه در انتهای شوت و حداکثر فشار ۷۰۰۰۰ پاسکال در این ناحیه، پدیده کاویتاسیون قوس دایره‌ای انتهای شوت را تهدید می‌کند. از اینرو شیب و شعاع قوس تعدیل گردید و نتایج تحلیل عددی مجدداً بررسی شد. نتایج بیانگر آن بود که با کاهش شیب شوت، نقاط بحرانی پدیده کاویتاسیون از ۳ به ۱ نقطه کاهش یافت. همچنین تغییر شعاع قوس دایره‌ای، به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بر خصوصیات هیدرولیکی اثرگذار نبوده و فقط با افزایش شعاع، افزایش طول پرتاب ۵ متری مشاهده گردید.

واژگان کلیدی: خصوصیات هیدرولیکی، سد گِلورد، کاویتاسیون، مدل آشفتگی، مدل عددی Flow-3D

۱- مقدمه

سرریز^۱ یکی از سازه‌های اصلی سد است که وظیفه آن کنترل سیلاب ورودی به مخزن سد است. به سبب اهمیتی که این سازه دارد حدود ۳۰٪ هزینه‌های سد مربوط به ساخت این سازه است. شکل و ابعاد سرریز تابعی از موقعیت جغرافیایی و هیدرولوژیکی منطقه خواهد بود. از انواع سرریزهای سد می‌توان سرریز سیفونی، سرریز نیلوفری، سرریز جانبی، سرریز شوت و سرریز لبه‌آبریز را نام برد (Hosseini and Abrishami 2011). در انتقال آب به پایین‌دست، انرژی پتانسیل جریان به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود. هر چه ارتفاع سرریز بیشتر و پایاب پایین‌تر باشد، این تبدیل انرژی شدیدتر و در نتیجه سرعت جریان بالاتر خواهد بود. بنابراین به طریقی باید انرژی جریان مذکور مستهلک گردد. انواع مستهلک کننده‌های انرژی^۲ متداول عبارت‌اند از: پرتاب‌کننده جامی پرش اسکی، پرتاب‌کننده جامی مستغرق، حوضچه آرامش، حوضچه آرامش دو مرحله‌ای و حوضچه آرامش واگرا (Samani 2014). توزیع سرعت و فشار از خصوصیات هیدرولیکی مهم در سدهای بلند به شمار می‌روند. سرعت بالای جریان و همچنین کاهش فشار جریان تا حد فشار بخار روی سرریز باعث ایجاد پدیده کاویتاسیون^۳ می‌گردد. (Hosseini and Abrishami 2011). مدل‌سازی این پدیده‌ها به کمک مدل‌های عددی می‌تواند سودمند و مفید باشد. از جمله مدل‌های عددی که اخیراً کاربرد زیادی در این زمینه پیدا کرده و پاسخ‌های قابل قبولی در مورد شبیه‌سازی‌های هیدرولیکی تولید کرده است، مدل Flow-3D است. این نرم‌افزار قابلیت تحلیل سه‌بعدی میدان جریان را دارد و محدوده کاربردی بسیار وسیعی در مسائل مربوط به سیالات دارد. (Heller et al. (2005) به مطالعه آزمایشگاهی پرتابه‌های جامی پرداختند و حداکثر فشار و محل وقوع آن را در پرتابه جامی بررسی کردند. نتایج نشان داد عدد فرود، انحنای نسبی جام و زاویه جام اثر قابل توجهی روی حداکثر فشار و محل وقوع آن دارند. (Dargahi (2006) با شبیه‌سازی یک مدل عددی سه‌بعدی میدان جریان روی سرریز را بررسی کرد. به‌منظور محاسبه سطح آزاد جریان روی سرریز، مدل حجم سیال استفاده شد. مدل عددی تحت مقادیر هد آبی مختلف شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها به انتخاب عملکرد دیوار، فاصله شبکه و عدد رینولدز وابسته بود. پروفیل‌های سطح آب و ضرایب تخلیه با محدوده دقت ۱/۵ تا ۲/۹ درصد وابسته به هد عملیاتی سرریز پیش‌بینی شده بود. (Steiner et al. (2008) توزیع فشار در مستهلک کننده‌های پرش اسکی با جام مثلی را به‌وسیله مدل آزمایشگاهی مورد مطالعه قراردادند. نتایج نشان داد عدد فرود، ارتفاع نسبی جام و زاویه دفکتور اثر قابل توجهی روی حداکثر فشار و توزیع آن در جام دارد. (Yamini and Kavianpour (2011) به بررسی فشار استاتیک و دینامیک روی پرتابه جامی شکل ساده پرداختند و مقادیر فشار حداکثر را در دو مدل پرتابه ساده به دست آوردند و نتایج با دیگر تحقیقات مقایسه شد. (Nazari et al. (2013) تحلیل فشار دینامیکی در پرتابه‌های جامی شکل از مطالعات مدل پنج سد را مورد بررسی قراردادند. در نهایت مقادیر فشار دینامیکی حداکثر و حداقل در امتداد پرتابه جامی شکل و همچنین توزیع فشار در راستای محور مرکزی پرتابه جامی شکل استخراج شد. (Usta (2014) به بررسی عددی خصوصیات هیدرولیکی جریان روی سرریز سد لالی و مقایسه با نتایج مدل فیزیکی بر پایه تکنیک حجم سیال با استفاده از مدل عددی Flow-3D پرداخت. در این تحقیق، انتخاب شبکه مناسب، روند پالایش مش، توزیع فشار روی سرریز، اثر افزودن حباب‌های هوا، اثر مقیاس و پتانسیل کاویتاسیون روی سرریز سد لالی بررسی شد و مشخص گردید مدل عددی سه‌بعدی سرریز می‌تواند ابزار سریع و عملی به‌منظور پیش‌بینی خصوصیات هیدرولیکی جریان روی سرریز باشد. (Nikpour et al. (2014) با شبیه‌سازی دوبعدی روش‌های المان محدود و حجم محدود در تحلیل جریان آب روی سرریز اوجی به این نتیجه رسیدند که روش حجم محدود در شبیه‌سازی هیدرولیک جریان عملکرد بهتری داشته است. (Reisi et al. (2015) اثر زاویه همگرایی دیواره‌های شوت را بر خصوصیات جریان در سرریزها با مدل عددی Flow-3D بررسی کردند. نتایج بیانگر آن بود با افزایش زاویه همگرایی دیواره، مقادیر پروفیل سطح آزاد و سرعت در امتداد شوت افزایش می‌یابد. ایشان با بررسی شاخص کاویتاسیون نشان دادند که با افزایش زاویه همگرایی، شاخص کاویتاسیون افزایش می‌یابد و بیشترین خطر کاویتاسیون برای مدل با حداقل

¹ Spillway² Energy Dissipaters³ Cavitation

همگرایی است. (Hasanzadeh et al. (2015) به بررسی پدیده کاویتاسیون روی سرریز سد ونیار با استفاده از مدل عددی Fluent پرداختند. با بررسی نتایج حاصل از پژوهش، هماهنگی مناسبی بین نتایج حاصل از Fluent و مدل آزمایشگاهی به دست آمد. همچنین مشخص شد که در هیچ یک از گزینه‌های مطالعه شده کاویتاسیون رخ نداده و سرریز احداث شده در مقابل این پدیده ایمن است. Sakhaei et al. (2016) با محاسبه سرعت و عمق جریان بر روی سرریز اوجی سد جره با استفاده از نرم افزار Flow-3D و مقایسه با مدل فیزیکی ساخته شده در آزمایشگاه مؤسسه تحقیقات آب به این نتیجه رسیدند که مقادیر دو پارامتر فوق از مطابقت قابل قبولی برخوردارند.

از این رو مطالعه جامع سازه سرریز و پرتابه با عملکرد مؤثر آن در استهلاك انرژی جریان خروجی به خصوص در سرریزهای بلند از اهمیت زیادی برخوردار است. همچنین در مطالعات قبلی، هیدرولیک جریان در شوت‌های همگرا کمتر مورد ارزیابی قرار گرفته است و بیشتر جام‌های پرتابی با زوایای مثبت مورد بررسی قرار گرفتند. هدف از این تحقیق، شبیه‌سازی و تحلیل خصوصیات هیدرولیکی جریان شامل سرعت، توزیع فشار، طول پرتاب و شاخص کاویتاسیون روی شوت همگرا و پرتابه جامی شکل با شیب منفی در سد گُلورد نکا با استفاده از نرم افزار Flow-3D می‌باشد. همچنین تغییراتی در هندسه سرریز پیشنهاد می‌شود و نتایج حاصل با نتایج مدل اصلی مقایسه می‌گردد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معادلات حاکم بر جریان

قوانین حاکم بر جریان یک سیال تراکم‌ناپذیر لزج، به وسیله معادلات پیوستگی و اندازه حرکت در جهت محورهای مختصات که به معادلات ناویر-استوکس^۱ معروف هستند، بیان می‌شوند. این معادلات در واقع بیانگر پایداری جرم و اندازه حرکت به بیان ریاضی می‌باشند. چنانچه المانی از سیال به عنوان حجم کنترل ثابت در فضای محاسباتی در نظر گرفته شود در این صورت نیروهای وارد بر آن و اصل بقای جرم در این المان به صورت معادلات مشتق جزئی نمایان می‌شوند. نرم افزار Flow-3D از روش‌های دقت مرتبه اول و دوم در حل معادلات بهره می‌برد. در این نرم افزار، معادلات حاکم بر جریان غیرقابل تراکم به صورت روابط (۱) و (۲) است.

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V_F}(u_i A_i \frac{\partial u_i}{\partial x_i}) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i + f_i \quad (2)$$

در روابط (۱) و (۲)، u ، v و w مؤلفه‌های سرعت سیال در جهت‌های x ، y و z (m/s)، V_F کسر حجمی جریان (m^3)، A_x ، A_y و A_z کسرهای سطحی جریان در جهت‌های x ، y و z (m^2)، ρ چگالی سیال (kg/m^3)، p فشار در هر نقطه از سیال (Pa)، g_i مؤلفه شتاب ثقل در جهت i (m/s^2) و f_i بیانگر تنش رینولدز (Pa) است. معمولاً برای بررسی امکان وقوع پدیده کاویتاسیون در سرریزها از اندیس کاویتاسیون (σ) استفاده می‌شود. زمانی که اندیس کاویتاسیون در هر نقطه از سرریز از مقدار بحرانی شروع کاویتاسیون (σ_i) بیشتر باشد امکان وقوع این پدیده کم است. این مقدار بحرانی بستگی به شکل هندسی سرریز و شرایط جریان دارد. در تحقیق حاضر مقدار σ_i ، 0.2 فرض شده است (Samani 2014). رابطه (۳) نحوه محاسبه این شاخص را نمایش می‌دهد:

¹ Navier-Stokes equations

$$\sigma = \frac{(P - P_v) / \gamma}{V^2 / 2g} \text{ و } P = P_{atm} + P_{model} \quad (3)$$

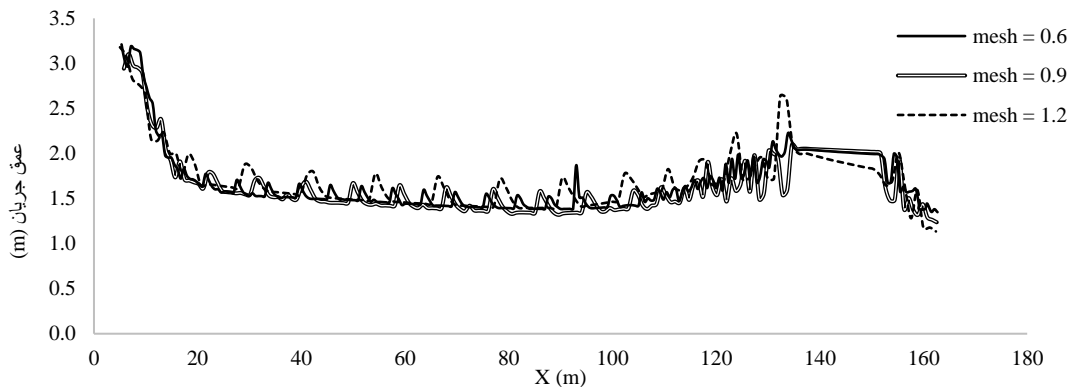
در رابطه (۳)، P فشار مطلق، P_v فشار بخار آب برابر ۲۳۳۰ پاسکال، V سرعت جریان روی سرریز ناشی از شبیه‌سازی عددی، γ وزن مخصوص آب برابر ۹۸۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب، P_{atm} برابر ۹۸۱۰۰ پاسکال و P_{model} فشار وارد بر سرریز ناشی از شبیه‌سازی عددی است.

۲-۲- مدل‌سازی آشفتگی و شرایط مرزی

مدل‌های آشفتگی زیادی توسط محققان برای شبیه‌سازی جریان‌های آشفته تدوین شده است. شبیه‌سازی آشفتگی در Flow-3D با استفاده از یکی از پنج مدل آشفتگی طول اختلاط پرناتل، یک معادله‌ای انرژی جنبشی آشفتگی، مدل دو معادله‌ای $k - \varepsilon$ ، مدل گروه‌های نرمال شده (RNG) و مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ صورت می‌گیرد (Ghasemzadeh 2013). در پژوهش حاضر از دو مدل آشفتگی نرمال شده (RNG) و مدل دو معادله‌ای $k - \varepsilon$ استفاده شده است. در عمل مدل RNG به تولید نتایج دقیق در جریان‌های با شدت کم آشفتگی و جریان‌های با نواحی برشی قوی شهرت دارد (Ghasemzadeh 2013). با توجه به موارد بالا و نتایج صحت‌سنجی در تحقیق حاضر، مدل آشفتگی RNG به‌عنوان مدل آشفتگی نهایی انتخاب گردید. همچنین نرم‌افزار Flow-3D دارای ۱۰ نوع شرط مرزی بر روی وجه‌های شبکه حل است. شرایط مرزی که در این تحقیق استفاده شده است شامل متقارن، دیوار، خروجی و فشار است. شرط دیوار به‌منظور مدل‌کردن دیواره و یا جاهایی که جسم صلب در مرز است استفاده می‌شود. جریانی که به مرز خروجی می‌رسد، شرایط در مرز خود را طوری تطبیق می‌دهد که جریان بدون هیچ تأثیری از مرز عبور کند. این شرط مرزی برای سیالات غیرقابل تراکم و دارای سرعت کم کاربرد دارد و بهترین شرط مرزی برای مرزهای خروجی در حوزه هیدرولیک است. از شرط فشار برای اعمال فشار در وجه‌های شبکه حل استفاده می‌شود (Hedayatifar and Poulak 2014).

۲-۳- ارزیابی دقت مدل‌سازی

با توجه به نبود نتایج مدل آزمایشگاهی سرریز سد گُلورد نکا، صحت‌سنجی مدل با تعیین مدل آشفتگی و شبکه‌بندی مناسب صورت پذیرفت. طبق تحقیقات مشابه انجام‌گرفته در این زمینه، در اغلب شبیه‌سازی‌ها از مدل‌های آشفتگی RNG و $k - \varepsilon$ استفاده شده است (Nikpour et al. 2014). بنابراین در این تحقیق نیز با استناد به تحقیقات مشابه، شبیه‌سازی سرریز با دو مدل آشفتگی RNG و $k - \varepsilon$ صورت گرفت. با مقایسه نمودار عمق جریان در این دو مدل آشفتگی و با توجه به تطابق مطلوب این دو نمودار مدل آشفتگی RNG به‌عنوان مدل آشفتگی نهایی انتخاب گردید. بعد از مشخص شدن مدل مناسب انتقال آشفتگی برای صحت‌سنجی نهایی، مدل عددی با ۳ شبکه‌بندی مختلف شبیه‌سازی گردید و مقایسه نهایی بین این ۳ شبیه‌سازی طبق شکل (۱) صورت گرفت. این ۳ شبکه‌بندی به ترتیب شامل مش مربعی ۰/۶ متر، ۰/۹ متر و ۱/۲ متر می‌باشند. با توجه به شکل (۱) اختلاف قابل توجهی بین نمودار عمق جریان با مش‌های مختلف وجود ندارد. همچنین نوسانات سطح آب در مدل با مش ریز از ثبات بیشتری برخوردار است. برای مشاهده بهتر، عمق جریان بعد از تاج در شکل (۱) آورده شده است.



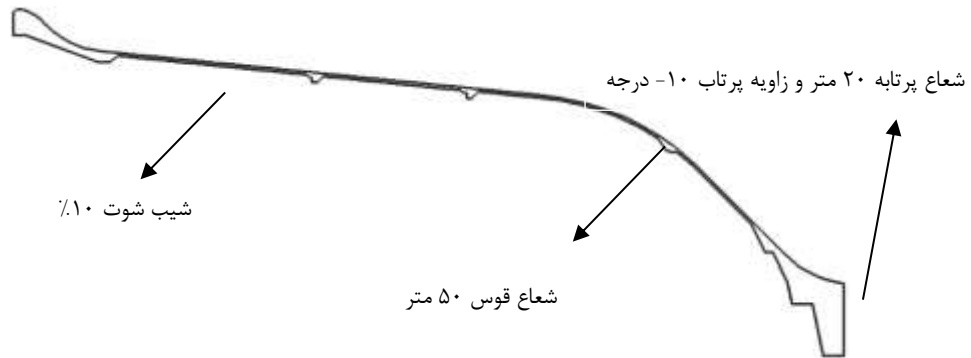
شکل ۱- مقایسه عمق جریان در ۳ مش مختلف

با شبیه‌سازی نصف سرریز و بهینه‌سازی مش در راستای Z نیز تغییر محسوسی در نمودار عمق جریان مشاهده نشد. از این رو مش‌بندی یکسان در تمام جهات استفاده گردید. بنابراین مش مربعی $0/6$ متر برای شبیه‌سازی جریان کل سرریز مورد استفاده قرار گرفت.

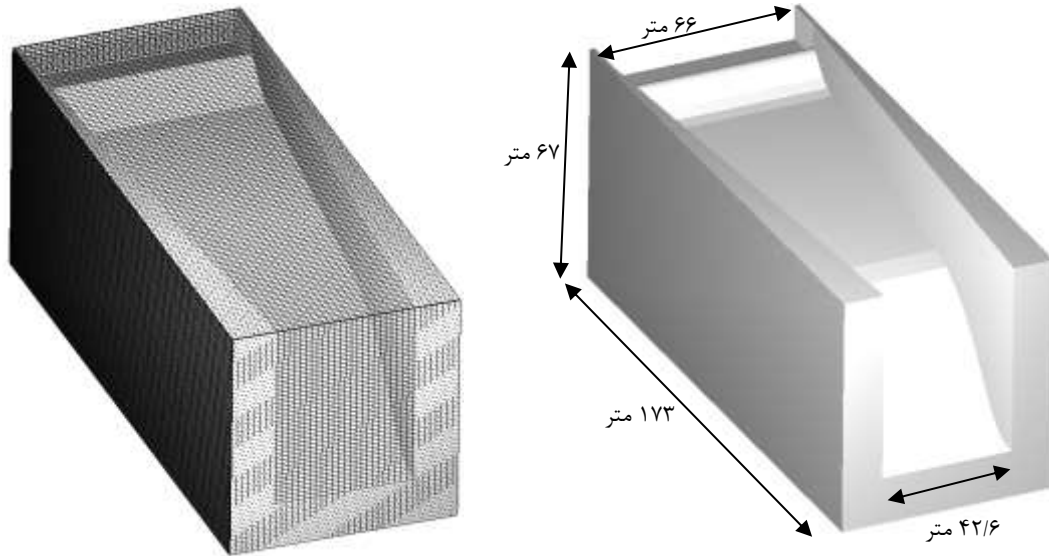
۲-۴- مدل‌سازی عددی

سد گُلورد نکا از نوع سد سنگریزه‌ای با رویه بتنی بوده که به ارتفاع ۱۱۳ متر از بستر سنگی در شمال ایران در ۳۷ کیلومتری شهرستان نکا در استان مازندران در حال ساخت است. سرریز سد گُلورد یک سرریز اوجی بوده که با هدایت جریان از طریق کانال تقرب، اوجی، شوت و جام پرتابی سیلاب را به پایاب منتقل می‌کند. تراز کانال تقرب یا دسترسی ۷۳۰ متر از سطح دریا (رقوم نرمال اولیه) بوده و رقوم اوجی نیز ۷۳۳ متر از سطح دریا یا متناظر با رقوم نرمال منظور شده است. شیب شوت متصل به اوجی 10% است که در انتهای کار با یک قوس به شعاع ۵۰ متر به شیب $1:10$ (1H:1V) متصل گردیده و برای کنترل پرتاب سیلاب به وسیله جام پرتابی و عدم برخورد آن به کوه روبرو از یک طرف و عدم برخورد سیلاب‌های مهم و قابل فرسایش به شیب‌برداری انتهای سرریز از طرف دیگر، زاویه جام پرتابی 10° درجه منفی نسبت به افق (به سمت پائین) و رقوم آن نیز ۶۸۰ متر از سطح دریا بهینه‌سازی شده است. طول تاج سرریز در تراز نرمال مزبور معادل ۶۶ متر منظور گردیده است. طول سازه جام پرتابی معادل $42/6$ متر در نظر گرفته شده است، شعاع جام پرتابی برابر ۲۰ متر و زاویه خروجی جریان در انتهای قوس معادل 10° درجه است (Anonymous 2011). در شکل (۲) برش طولی سرریز سد گُلورد نشان داده شده است.

سرریز سد گُلورد در محیط اتوکد سه‌بعدی ساخته شد و به محیط Flow-3D وارد گردید. در مدل‌سازی عددی انجام گرفته طول مدل ۱۷۳ متر، ارتفاع تاج سرریز ۶۷ متر، عرض سرریز در بالادست ۶۶ متر و عرض در پایین دست $42/6$ متر است. به دلیل استفاده از شبکه مش مستطیلی و با توجه به اینکه سرریز همگرا است، دو گوه مثلثی شکل در دو طرف سرریز تعبیه شده است تا جریان از روی سرریز خارج نگردد. در شکل (۳) نمای نهایی مدل سرریز در محیط Flow-3D و مدل شبکه‌بندی شده نشان داده شده است.



شکل ۲- برش طولی سرریز سد گِلورد نکا



الف- نمای نهایی مدل سرریز سد

ب- مدل شبکه‌بندی شده سرریز سد

شکل ۳- مدل و شبکه‌بندی سرریز سد گِلورد نکا در محیط Flow-3D

۳- یافته‌ها و بحث

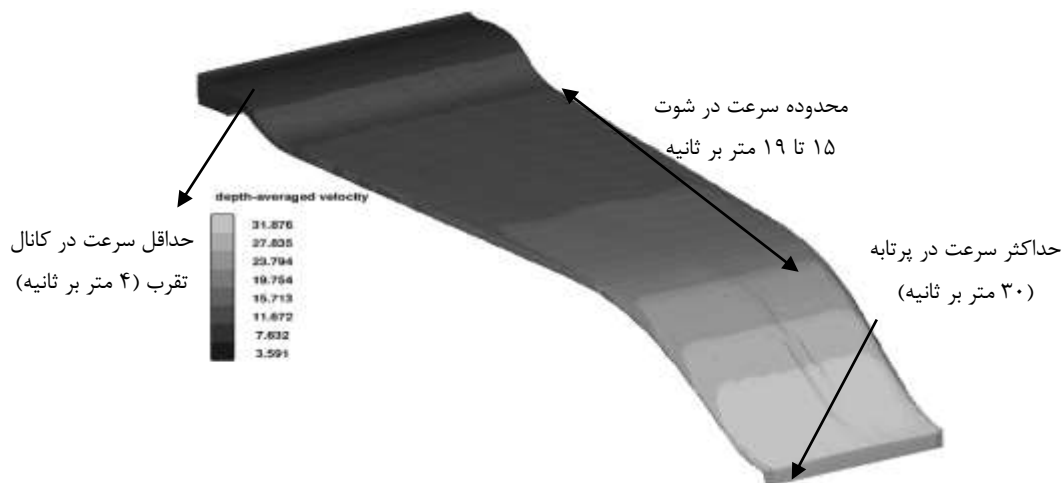
خصوصیات هیدرولیکی که در این پژوهش مورد ارزیابی قرار می‌گیرد شامل سرعت جریان، فشار وارد بر سرریز، طول پرتاب و اندیس کاویتاسیون است. در جدول (۱) مشخصات مدل اصلی و تغییرات مدل‌های جدید نسبت به مدل اصلی ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات مدل اصلی و تغییرات مدل‌های جدید نسبت به مدل اصلی

نام مدل	شیب شوت	شعاع قوس دایره‌ای	شعاع پرتابه	زاویه پرتاب
مدل اصلی	۱۰٪	۵۰ متر	۲۰ متر	۱۰- درجه
مدل ۱	۵٪	۵۰ متر	۲۰ متر	۱۰- درجه
مدل ۲	۱۵٪	۵۰ متر	۲۰ متر	۱۰- درجه
مدل ۳	۱۰٪	۴۰ متر	۲۰ متر	۱۰- درجه
مدل ۴	۱۰٪	۶۰ متر	۲۰ متر	۱۰- درجه
مدل ۵	۱۰٪	۷۰ متر	۲۰ متر	۱۰- درجه

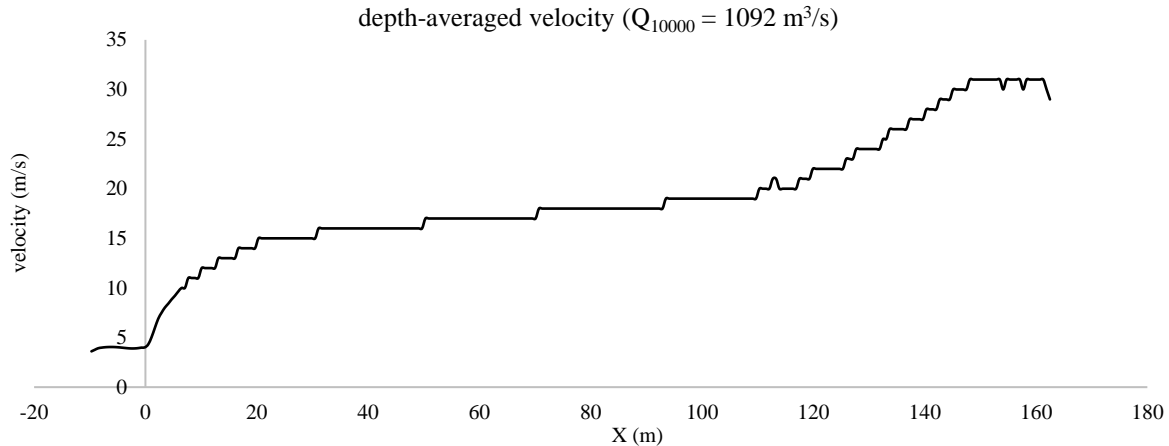
۳-۱- تحلیل سرعت جریان

به‌طور کلی در سرریزهای بلند با افزایش دبی عبوری، سرعت در تمامی نواحی سرریز افزایش می‌یابد و محدوده سرعت‌های ماکزیمم در انتهای سرریز به وجود می‌آید و کمترین مقدار سرعت که دارای بیشترین عمق نسبت به نواحی دیگر سرریز است، قبل از رسیدن جریان به تاج سرریز مشاهده می‌شود. صحت این مطالب را می‌توان در شکل (۴) که نمای سه‌بعدی سرعت جریان عبوری از مدل اصلی سرریز سد گُلورد را نشان می‌دهد، مشاهده کرد. طبق شکل (۴) که سرعت را در عمق متوسط جریان نشان می‌دهد، کمترین مقدار سرعت در کانال تقرب و حدود ۴ متر بر ثانیه است. مقدار سرعت در طول شوت نیز که از متر ۲۰ حدود ۱۰۵ الی ۱۰۵ متر است، از ۱۵ تا ۱۹ متر بر ثانیه متغیر است. همچنین در انتهای شوت و محل اتصال قوس به شیب ۱۰٪ روند افزایش سرعت چشم‌گیر است و در پرتابه به حدود ۳۰ متر بر ثانیه می‌رسد.



شکل ۴- نمای سه‌بعدی سرعت جریان عبوری از سرریز سد گُلورد

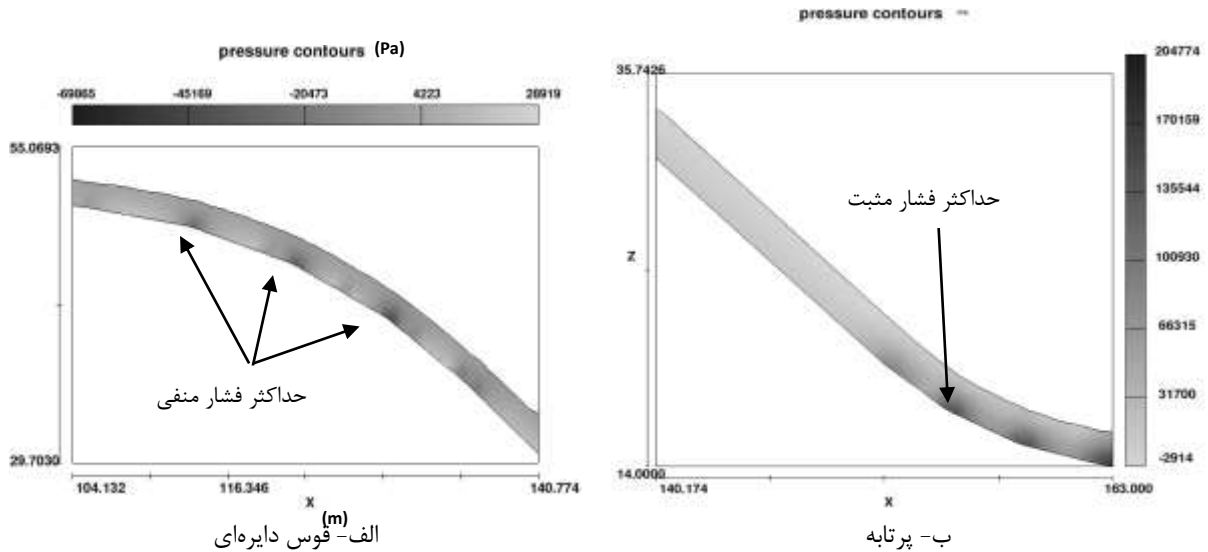
جزئیات سرعت جریان عبوری از سرریز سد گُلورد نکا در شکل (۵) آورده شده است. با توجه به نمودار از انتهای شوت و متر ۱۲۰ متر تا ابتدای پرتابه سرعت جریان از ۲۰ به ۳۰ متر بر ثانیه رسیده است و از آنجا که پدیده کاویتاسیون در سرعت‌های بالای ۲۰ متر بر ثانیه روی می‌دهد، کاویتاسیون می‌تواند این ناحیه را تهدید کند (Samani 2014).



شکل ۵- جزئیات سرعت جریان عبوری از مدل اصلی سرریز سد گُلورد

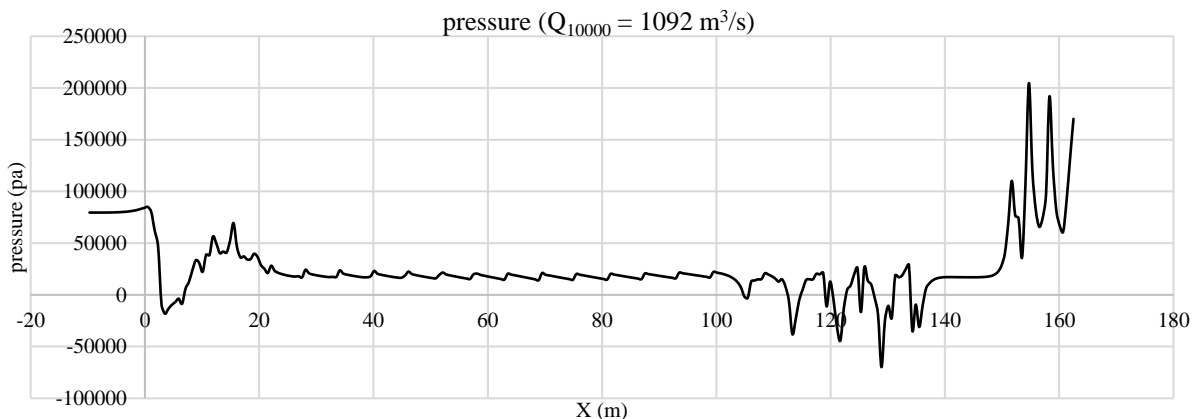
۳-۲- تحلیل فشار وارد بر سرریز

به‌طور کلی در سرریزهای بلند با افزایش دبی عبوری، از فشار انتهایی سرریز کاسته می‌شود و مکش در انتهای سرریز افزایش می‌یابد که احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون را افزایش می‌دهد. با توجه به اینکه جزئیات فشار وارد بر کف در شکل سه‌بعدی سرریز به‌خوبی مشاهده نمی‌شود، شکل (۶) فشار وارد بر ۲ ناحیه قوس دایره‌ای و پرتابه سرریز را به‌طور مجزا و دوبعدی نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۶-الف) حداکثر فشار منفی وارد بر کل سرریز در این محدوده مشاهده می‌شود. فشاری که در چند نقطه در شکل نمایان است و حداکثر مقدار آن حدود 70000 پاسکال است. با توجه به سرعت بالای جریان در این ناحیه (طبق بخش تحلیل سرعت جریان)، امکان ایجاد پدیده کاویتاسیون در این قسمت بیش از نقاط دیگر سرریز است. به‌طور کلی طراحی سرریز باید به‌گونه‌ای انجام شود که حتی‌الامکان در تمام طول سرریز فشار بالا و میزان سرعت جریان پایین باشد تا نهایتاً اندیس کاویتاسیون از حد بحرانی کمتر نشود. در سرریزها، کاهش ابعاد به‌صورت همگرا موجب افزایش عمق و به‌تبع آن باعث افزایش فشار جریان می‌گردد. همچنین تغییر انحنا کف موجب افزایش فشار خواهد شد. یکی دیگر از مؤثرترین و اقتصادی‌ترین روش‌های جلوگیری از خسارات ناشی از کاویتاسیون هوادهی جریان است (Samani 2014). شکل (۶-ب) فشار را در محدوده شیب 10% و پرتابه سد نشان می‌دهد. پس از عبور جریان از قوس دایره‌ای که بیشترین فشار منفی در آن ناحیه مشاهده شد و ورود جریان به پرتابه جامی‌شکل روند افزایش فشار مشاهده می‌گردد. به دلیل سرعت و نیروی زیاد جریان و برخورد به پرتابه، فشار حداکثر مثبت در کل سرریز سد گُلورد نکا در این محدوده رخ داده که مقدار آن به 200000 پاسکال می‌رسد.



شکل ۶- فشار وارد بر کف سرریز

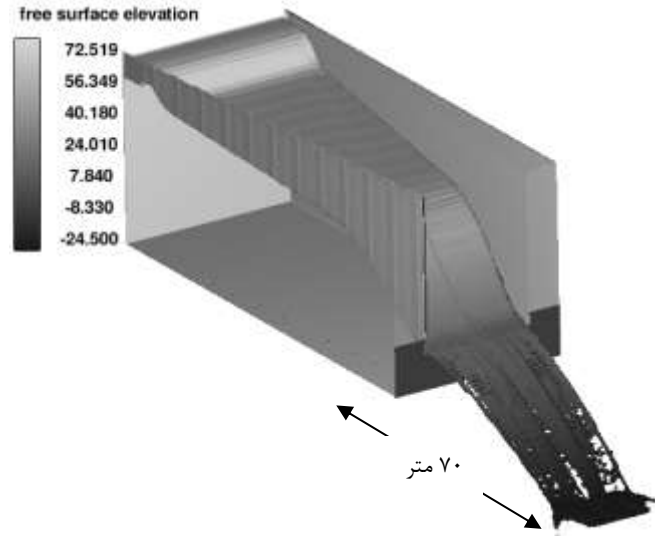
جزئیات فشار جریان وارد بر سرریز، در شکل (۷) آورده شده است که طبق آن پس از فشار منفی وارد بر قوس ابتدایی تاج سرریز، روند فشار ثابت در محدوده شوت سرریز مشاهده می‌گردد تا جریان به قوس دایره‌ای برسد که حداکثر فشار منفی در این محدوده رخ می‌دهد. با عبور جریان از قوس و شیب ۱۰٪، فشار حداکثر مثبت در قسمت پرتابه جامی شکل، شکل می‌گیرد.



شکل ۷- جزئیات فشار وارد بر سرریز سد گِلورد

۳-۳- تحلیل طول پرتاب

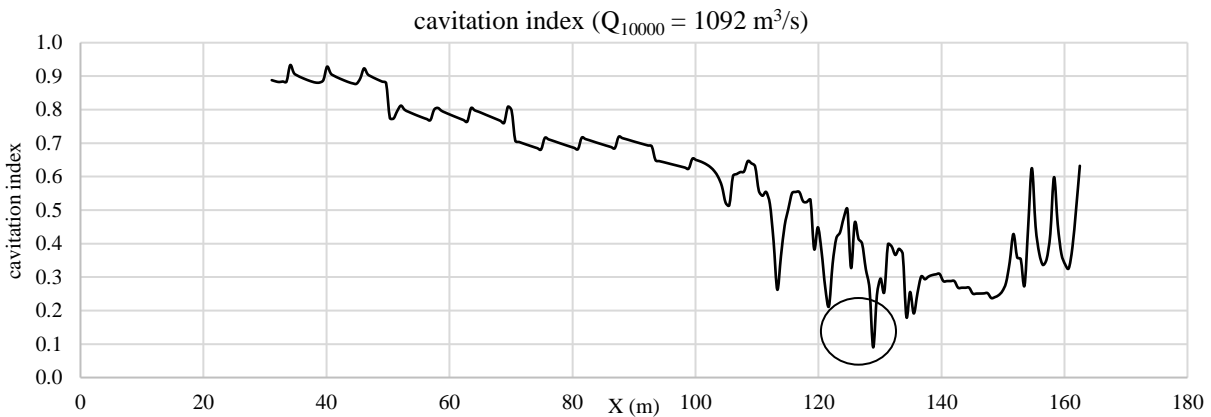
طبق تعریف پرتابه جامی شکل سازه‌ای است که در آن جریان آب جهت پرتاب هدایت می‌شود و جریان به صورت یک فواره پرتاب‌شونده در هوا درمی‌آید و سپس در رودخانه فرود می‌آید. قسمتی از انرژی جریان فوق بحرانی در اثر اصطکاک با هوا مستهلک می‌گردد و عمده انرژی در اثر اختلاط و تلاطم در حفره فرسایش که در محل فرود تشکیل می‌گردد مستهلک می‌شود (Samani 2014). از آنجاکه زاویه پرتاب مثبت پرتابه سرریز سد گِلورد جریان را در دبی‌های بیش از ۵۰۰ مترمکعب بر ثانیه به کوه روبرو پرتاب می‌کند، زاویه پرتاب ۱۰- درجه برای مدل نهایی سرریز سد گِلورد انتخاب گردید (Anonymous 2011). همچنین با توجه به تراز پایاب سد گِلورد که حدود ۴۰ متر پایین‌تر از لبه پرتابه است، شبیه‌سازی طبق این اختلاف تراز انجام شده و طول پرتاب از آن استخراج شده است. شکل (۸) نمای سه‌بعدی طول پرتاب جریان در مدل اصلی سرریز سد گِلورد را نشان داده است.



شکل ۸- نمای سه‌بعدی طول پرتاب جریان در مدل اصلی سرریز سد گِلورد

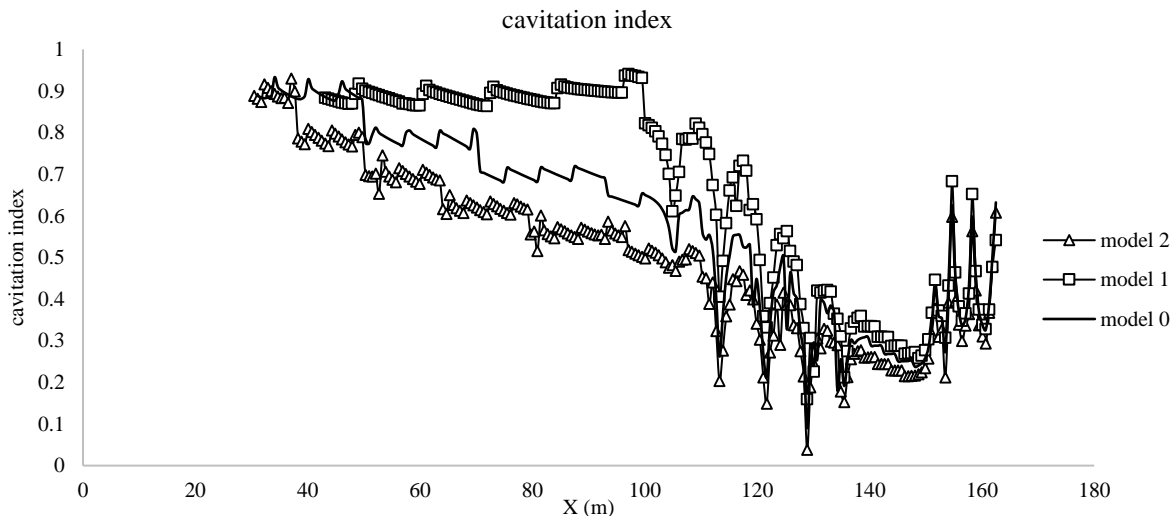
۳-۴- تحلیل اندیس کاویتاسیون

خرابی حاصل از کاویتاسیون بر روی سرریز هنگامی اتفاق می‌افتد که حباب‌ها یا حفره‌های کوچک کاویتاسیون به طرف پایین‌دست از منطقه با فشار پایین به منطقه نزدیکی با فشار بالاتر حرکت کند و به‌طور ناگهانی حباب‌ها بترکد و آب اطراف به‌سرعت به سمت آن‌ها حرکت کند تا فضای حباب را پر کند. در صورتی که حباب بخار نزدیک سطح بتن بترکد، حرکت موضعی آب به‌صورت فواره‌های متقارن و بسیار کوچک ظاهر خواهد شد. این فشار بالا ممکن است به‌وسیلهٔ امواج حاصله در اثر همین پدیده از حفره‌های دیگر تقویت گردد و نتیجتاً سطح بتن در اثر تنش موضعی حاصله دچار پدیده خستگی و نهایتاً خرابی شود. این موضوع ممکن است باعث جدا شدن یک قطعه بزرگ بتنی از بقیه بدنه بتنی شود (Samani 2014). با قرار دادن مقادیر فشار و سرعت مدل شبیه‌سازی‌شده سرریز سد گِلورد نکا در رابطه (۳) مقادیر اندیس کاویتاسیون در طول سرریز محاسبه گردید و در شکل (۹) نمایش داده‌شده است.



شکل ۹- اندیس کاویتاسیون در طول مدل اصلی سرریز سد گِلورد

شکل (۹) نشان می‌دهد که اندیس کاویتاسیون در محدوده مترهاژ ۱۲۰ تا ۱۴۰ متر به مقدار بحرانی $0/2$ نزدیک شده است و در سه نقطه کمتر از مقدار بحرانی شده است. در نتیجه پتانسیل کاویتاسیون در این محدوده بیش از نقاط دیگر است. جهت کاهش پتانسیل کاویتاسیون شکل پروفیل شوت باید طوری طراحی شود که فشار موضعی افزایش یابد. چنانچه تغییرات شکل هندسی شوت در کاهش پتانسیل کاویتاسیون مؤثر واقع نشود، باید روش‌های دیگری به کار برده شوند. مؤثرترین و اقتصادی‌ترین روش برای کاهش یا حذف پتانسیل کاویتاسیون، روش هواده‌ی است (Samani 2014). با توجه به امکان وقوع پدیده کاویتاسیون در محدوده ۱۲۰ تا ۱۴۰ متر، اقدام به تغییر پروفیل سرریز گردید. به طوری که ابتدا با تغییر دادن شیب شوت و سپس با تغییر شعاع قوس دایره‌ای شبیه‌سازی مدل‌های جدید طبق جدول (۱) صورت گرفت. با شبیه‌سازی مدل‌های جدید، مقادیر سرعت و فشار استخراج می‌گردد و در رابطه (۳) جایگذاری می‌شود. در شکل (۱۰) تأثیر تغییر شیب شوت بر اندیس کاویتاسیون مشاهده می‌گردد.



شکل ۱۰- اثر تغییر شیب شوت بر اندیس کاویتاسیون

با توجه به شکل (۱۰) به علت افزایش شیب شوت در مدل ۲، اندیس کاویتاسیون در محدوده مترهاژ ۱۲۰ تا ۱۴۰ متر در ۵ نقطه کمتر از مقدار بحرانی $0/2$ گردید بنابراین احتمال ایجاد پدیده کاویتاسیون در این مدل بیش از دو مدل دیگر است. با کاهش شیب شوت و کاهش سرعت در مدل ۱ تنها در ۱ نقطه اندیس کاویتاسیون کمتر از مقدار بحرانی گردید. پس در نتیجه اگرچه تغییر شیب شوت در حد 5% بر فشار وارد بر سرریز سد گَلُورْد تأثیرگذار نیست اما کم و زیاد کردن شیب شوت اثر مستقیم روی سرعت جریان دارد و می‌تواند عاملی مهم در ایجاد یا عدم ایجاد پدیده کاویتاسیون باشد. همچنین با تغییرات شعاع قوس دایره‌ای تغییرات در اندیس کاویتاسیون قابل توجه نیست و در هر سه مدل جدید مانند مدل اصلی در همان محدوده ۱۲۰ تا ۱۴۰ متر در تقریباً سه نقطه اندیس کاویتاسیون کمتر از مقدار بحرانی $0/2$ می‌گردد. قابل ذکر است که اگرچه استفاده از بتن با مقاومت بالا، خرابی حاصله از سرعت‌های بالا را مانع می‌شود، اما چنانچه کاویتاسیون به وجود آید، چنین شرطی نیز قادر به ممانعت از خرابی‌های ناشی از آن نیست. برای جلوگیری از چنین صدماتی، می‌بایست امکان ایجاد کاویتاسیون در یک سرعت خاص در حین طراحی و یا در ضمن اجرا و حتی مرمت سطح سرریز بررسی گشته و با تخمین نسبتاً دقیق سرعت، میزان زبری مطلق مورد نیاز را به دست آورد. به علاوه هواده‌ی سرریزها برای جلوگیری از صدمات ناشی از کاویتاسیون در سرعت بالا امری مهم و همیشه مدنظر بوده است. با مخلوط نمودن یک سیال تراکم‌پذیری مانند هوا با غلظت ۶ تا ۸ درصد در داخل آب، اثر این صدمات می‌تواند از بین برود که به همین علت

از سال ۱۹۴۱ سعی شده است تا با وارد کردن هوا به داخل آب، از میزان صدمات ناشی از کاویتاسیون بکاهند (Hosseini and Abrishami 2011).

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق مدل عددی Flow-3D، به منظور شبیه سازی پارامترهای هیدرولیکی جریان از جمله سرعت جریان، تغییرات فشار، طول پرتاب و اندیس کاویتاسیون در سرریز شوت همگرا و پرتابه جامی شکل سد گلورد نکا مورد بررسی قرار گرفت. پس از صحت سنجی نرم افزار، نتایج جدیدی از مدل عددی سرریز سد گلورد به دست آمد. در این خصوص ۵ مدل جدید با تغییرات در شیب شوت و شعاع قوس دایره ای در نرم افزار شبیه سازی گردید. مدل های مختلف با عبور دبی ۱۰۰۰۰ ساله ۱۰۹۲ مترمکعب بر ثانیه و ارتفاع جریان ۴/۱ متر روی تاج سرریز مورد بررسی قرار گرفتند. با توجه به وجود احتمال وقوع کاویتاسیون در قوس دایره ای انتهایی شوت، تغییرات هندسی در شیب شوت و سپس شعاع قوس دایره ای منظور گردید. نتایج حاصل از تغییر پروفیل سرریز سد گلورد نشان داد، کاهش شیب شوت در مقایسه با افزایش شیب شوت و اصلاح شعاع قوس دایره ای جهت کاهش پتانسیل کاویتاسیون عملکرد مناسب تری دارد. نتایج به دست آمده از تجزیه و تحلیل مدل اصلی سرریز سد گلورد نکا و سپس مدل های جدید به صورت زیر قابل بیان است:

(۱) همگرایی شوت در سرریز سد گلورد موجب افزایش عمق و کاهش سرعت جریان در قوس دایره ای انتهایی شوت می شود و خطر وقوع پدیده کاویتاسیون را کاهش می دهد.

(۲) حداقل و حداکثر سرعت جریان به ترتیب در کانال تقرب و پرتابه جامی شکل به میزان ۴ و ۳۱ متر بر ثانیه است. طول پرتاب در مدل اصلی سرریز سد از محل پرتاب جت تا برخورد به پایاب که اختلاف تراز ۴۰ متری با پرتابه دارد، ۷۰ متر است.

(۳) اندیس کاویتاسیون در ناحیه قوس دایره ای و مترای ۱۲۰ تا ۱۴۰ متر در سه نقطه از مقدار بحرانی ۰/۲ کمتر شده و پدیده کاویتاسیون این محدوده را بیش از نقاط دیگر تهدید می کند.

(۴) با کاهش شیب شوت در مدل ۱، افزایش عمق جریان، کاهش سرعت جریان، کاهش حداکثر فشار منفی و در نهایت افزایش اندیس کاویتاسیون و کاهش پتانسیل کاویتاسیون در محدوده قوس دایره ای انتهایی شوت، مشاهده گردید. با افزایش شیب شوت در مدل ۲، تمام نتایج بالعکس می شود.

(۵) در مدل های ۳، ۴ و ۵ با کم و زیاد کردن شعاع قوس دایره ای انتهایی شوت تغییرات محسوسی در خصوصیات هیدرولیکی سرریز و مخصوصاً افزایش یا کاهش اندیس کاویتاسیون مشاهده نگردید. ضمن اینکه با افزایش شعاع قوس مذکور مقدار طول پرتاب جریان، حداکثر ۵ متر افزایش یافت.

References

- Anonymous., (2011). Ogee hydraulic design, chute, flip bucket and downstream erosion control of Neka Gelvard dam spillway. Ev-yol-ab-niru group Co., Chapter 2 [In Persian].
- Dargahi B., (2006). Experimental Study and 3D Numerical Simulations for a Free Overflow Spillway. J. Hyd. Eng. ASCE., 132(9), 899-907.
- Ghasemzadeh F., (2013). Simulation of hydraulic problems in Flow-3D. Noavar Publications, Tehran, Iran. 256 p [In Persian].
- Hasanzadeh V., Hasanzadeh Y., Hosseinzadeh Delir A., Abdi A. (2015). Investigation of cavitation over the Vanyar dam spillway using fluent numerical model. J. Iran Water Res., 9(3), 177 - 180 [In Persian].

- Hedayatifar M., Poulak M. (2014). Fluid dynamics simulation with Flow-3D version 10.0.1 (1th Ed.). Atinegar Publications, Tehran, Iran. 264 p [In Persian].
- Heller V., Hager W. H., Minor H. E. (2005). Ski jump hydraulics. *J. Hyd Eng.*, 131(5), 347-355.
- Hosseini S. M., Abrishami J. (2011). Open channel hydraulics. Astan Quds Razavi Publications, Mashhad. Iran. 613 p [In Persian].
- Jannaty M. H., Eghbalzadeh A., Hosseini S. A. (2015). A hybrid ANFIS- PSO model for scour depth prediction. *J. Environ. Water Eng.*, 1(1), 81-94 [In Persian].
- Nazari O., Jabbari E., Sarkardeh H. (2013). Dynamic pressure analysis at chute flip buckets of five dam model studies. *Int. J. Civ Eng. Trans A Civil Eng.*, 13(1), 45-54.
- Nikpour M. R., Salmani Jelodar Z., Hosseinzadeh Delir A., Sanikhani H., Shoja F. (2014). The application of finite element and finite volume methods in the analysis of water flow over ogee spillway (case study: Damghan dam). *J. Iran Water Res.*, 14, 55-63 [In Persian].
- Reisi A., Salah P., Kavianpour M. R. (2015). Impact of Chute Walls Convergence Angle on Flow Characteristics of Spillways using Numerical Modeling. *Int. J. Che, Env & Bio. Sci.*, 3(3), 245-251.
- Sakhaei S., Nohani A., Afrous A. (2016). Calculation of hydraulic parameters of velocity and flow depth over ogee spillway using Flow-3d (Case study: Jarreh dam spillway). *Shabak magazine*, 3(2), 1- 9 [In Persian].
- Samani H. M. V. (2014). Design of hydraulic structures. Simaye Danesh Publications. Chapter 2, Tehran, Iran. 346 p [In Persian].
- Steiner R., Heller V., Hager W. H., Minor H. E. (2008). Deflector ski jump hydraulics, *J. Hyd. Eng.*, 134(5), 562-571.
- Usta E. (2014). Numerical Investigation of Hydraulic Characteristics of Laleli Dam Spillway and Comparison with Physical Model Study. PhD thesis, Middle East Technical University.
- Yamini O. A., Kavianpour M. R. (2011). Experimental study of static and dynamic pressures over simple flip bucket, 5th SASTech, Mashhad, Iran.

Assessing Flow Characteristics in Chute Spillway of Neka-Gelvard Dam using Computational Fluid Dynamics

Milad Fazlollahnejad¹, Khosrow Hosseini², Hojat Karami³ and Saeed Farzin^{3*}

¹ M.Sc., Department of Water and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

² Associate Professor, Department of Water and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

³ Assist. Professor, Department of Water and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

*Corresponding author: Saeed.farzin@semnan.ac.ir

Abstract

In recent years, as dam safety standards have increased, hydraulic engineers have become more eager to design an economical and safe energy dissipation system at the main flood evacuation course. Ogee spillway and flip bucket are the most used types of spillway and energy dissipation structures. The main aims of the present research were modeling and analyzing hydraulic characteristics of the flow over convergent chute and flip bucket with negative slope of Gelvard Dam, Neka, the north of Iran using Flow-3D software and comparing the results of spillway geometry modification in relation to the initial model. The validation results of numerical model with the experimental data showed that RNG model is the most appropriate turbulence model. Moreover, with respect to the dimensions of computational cells, sensitivity analysis showed that square mesh with dimensions of 0.6 m is appropriate. Considering the results of the numerical modeling, due to increasing the flow velocity more than 20 m/s at the end of chute and maximum pressure of -70000 pa in this area, cavitation threatens the circular arc. Therefore, the slope of the chute and circular arc radius was changed respectively and numerical analysis results were remeasured. The results showed that by reducing the chute slope, the critical points of cavitation decreased from 3 points to 1 point. In addition, it was indicated that changing circular arc radius had no considerable effect on hydraulic characteristics. It just showed that when arc radius increases, jet length increases up to 5 m.

Keywords: Hydraulic characteristics, Gelvard dam, cavitation, turbulence modeling, Flow-3D numerical model.