نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق آبی
سال سوم / شماره یازدهم / زمستان ۱۳۹۵

Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant
3rd Year / No. 11 / March 2017

تحلیل جریان در سرریز و سازه استهلاک انرژی سد گِلوَرد نکا به کمک روش‌های عددی

خسرو حسینی *[۱]
میلاد فضل اله نژاد [۲]
حجت کرمی [۳]
سعید فرزین [۴]

چکیده

با افزایش احداث سدهای بلند و بالا رفتن استاندارد ایمنی سدها، ضرورت طراحی یک سیستم استهلاک انرژی اقتصادی و مطمئن در پایانه مجاری اصلی تخلیه سیلاب، افزایش یافته است. در این میان، سرریز روگذر و پرتاب‌کننده جامی شکل ازجمله پرکاربردترین سرریزها و مستهلک کننده‌های انرژی محسوب می‌شوند. در تحقیق حاضر سرریز سد گِلوَرد نکا در نرم‌افزار Flow-3D مدل‌سازی گردیده است و هیدرولیک جریان در آن مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج صحت‌سنجی با نتایج مدل آزمایشگاهی نشان داد که مدل آشفتگی RNG مناسب‌ترین مدل آشفتگی است. همچنین در خصوص ابعاد سلول‌های محاسباتی، حساسیت‌سنجی نسبت به ۴ اندازه شبکه‌بندی مختلف صورت گرفت و مشخص گردید که مش مربعی با ابعاد ۰/۶ متر مناسب‌ترین اندازه مش است. تحلیل خصوصیات هیدرولیکی جریان روی سرریز شوت و پرتابه انتهایی نشان داد که وقوع کاویتاسیون در قوس انتهایی شوت بسیار محتمل است؛ اما با توجه به فشار حداکثر مثبت در پرتابه، کاویتاسیون مستهلک کننده انرژی سرریز سد گِلوَرد را تهدید نمی‌کند. در ادامه، نتایج حاصل از تغییر هندسه پرتابه نسبت به مدل اصلی مقایسه شده است. به‌طوری‌که در یک شعاع پرتابه ثابت با تغییر زاویه منفی پرتاب به زاویه مثبت، علاوه بر انحنای بیشتر جریان افزایش طول پرتاب ۴۰ متری مشاهده گردید.

واژه‌های کلیدی

سازه استهلاک انرژی، مدل آشفتگی، سرریز سد گِلوَرد، کاویتاسیون، Flow-3D.

۱*. دانشیار، گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، khhoseini@semnan.ac.ir.
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.
۳. استادیار، گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.
۴. استادیار، گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

تاریخ دریافت۹۵/۰۹/۰۳ تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۱/۰۶

مقدمه

سرریز سازه‌ای است که سیلاب را به‌صورت مطمئن و بدون وارد آوردن مخاطراتی برای سازه سد، دفع می‌کند. به سبب اهمیتی که این سازه دارد حدود ۳۰ درصد هزینه‌های سد مربوط به ساخت این سازه است. سرریزهایی که بر روی بدنه سد وزنی بتنی ساخته می‌شوند، از نوع سرریزهای روگذر می‌باشند. انواع دیگر سرریزها که به‌صورت جدا از بدنه سد طراحی می‌شوند عبارت‌اند از سرریز جانبی، سرریز نیلوفری، سرریز شوت و سرریز سیفونی.

در سال‌های اخیر با افزایش روند روبه رشد احداث سدهای بلند و بالا رفتن استاندارد ایمنی سدها، علاقه عمومی مهندسان هیدرولیک نسبت به طراحی یک سیستم استهلاک انرژی اقتصادی و مطمئن در پایانه مجاری اصلی تخلیه سیلاب سدهای بلند، افزایش یافته است. 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 درنتیجه سرعت جریان بالاتر خواهد بود. چنین جریانی دارای قدرت تخریب‌کننده قابل‌توجهی است که ممکن است به کل سازه هیدرولیکی موردنظر آسیب جدی وارد نماید؛ بنابراین به طریقی باید انرژی جریان مذکور مستهلک گردد. انواع مستهلک کننده‌های انرژی متداول عبارت‌اند از: پرتاب‌کننده جامی پرش اسکی- پرتاب‌کننده جامی مستغرق- حوضچه آرامش- حوضچه آرامش دو مرحله‌ای- حوضچه آرامش واگرا.

چنانچه بستر رودخانه در پایین‌دست در برابر فرسایش مقاوم باشد، می‌توان از انواع مستهلک کننده‌های انرژی مانند پرتاب‌کننده جامی پرش اسکی و یا پرتاب‌کننده جامی مستغرق استفاده نمود. پرتاب‌کننده جامی پرش اسکی سازه‌ای است که در آن جریان آب جهت پرتاب هدایت می‌شود و جریان به‌صورت یک فواره به هوا پرتاب شده 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. چنانچه بستر مقاوم نباشد از حوضچه فرود فواره استفاده می‌گردد (سامانی، ۱۳۹۳). 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 می‌گردد. تجربه نشان داده است که سرعت زیاد آب روی سطوح بتنی سرریزها، می‌تواند باعث ایجاد خرابی ناشی از پدیده کاویتاسیون گردد. برجستگی‌ها و ناصافی‌های سطح بتنی که به هنگام ساخت و یا پس‌ازآن ایجاد می‌شود، باعث ایجاد انحراف خطوط جریان و همچنین مناطق کم‌فشار در بعضی نقاط می‌گردد که چنانچه این فشار کم به حد فشار تبخیر برسد، پدیده کاویتاسیون ظاهر خواهد گشت (حسینی و ابریشمی، ۱۳۹۰).

مدل‌سازی سرریز سدها به همراه سازه استهلاک انرژی انتهایی و بررسی هیدرودینامیک جریان به کمک مدل‌های عددی می‌تواند کمک زیادی در طراحی این سازه بنماید. ازجمله مدل‌های عددی که اخیراً در شبیه‌سازی‌های هیدرولیکی کاربرد پیدا کرده و پاسخ‌های قابل قبولی ارائه داده است، مدل Flow-3D است. Flow-3D یک نرم‌افزار نیرومند تحلیلی در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی است. این نرم‌افزار قابلیت تحلیل سه‌بعدی میدان جریان را دارد و محدوده کاربردی بسیار وسیعی در مسائل مربوط به سیالات دارد.

با توجه به اهمیت موضوع، مسائل مربوط به سرریزها و سازه‌های استهلاک انرژی همواره مورد توجه محققان بوده است. هلر[1] و همکاران (۲۰۰۵) به مطالعه آزمایشگاهی پرتابه‌های جامی پرداختند و حداکثر فشار و محل وقوع آن را در پرتابه جامی بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که عدد فرود، انحنای نسبی جام و زاویه جام اثر قابل‌توجهی روی حداکثر فشار و محل وقوع آن دارند. درگاهی[2] (۲۰۰۶) با شبیه‌سازی یک مدل عددی سه‌بعدی میدان جریان روی سرریز را بررسی کرد. به‌منظور محاسبه سطح آزاد جریان روی سرریز، مدل حجم سیال[3] با مقادیر مختلف هد آبی شبیه‌سازی شد. پروفیل‌های سطح آب و ضرایب تخلیه با محدوده دقت ۱/۵ تا ۲/۹ درصد وابسته به هد عملیاتی سرریز پیش‌بینی شده بود. نظری[4] و همکاران (۲۰۱۳) تحلیل فشار دینامیکی در پرتابه‌های جامی شکل از مطالعات مدل پنج سد را مورد بررسی قرار دادند که درنهایت مقادیر فشار دینامیکی حداکثر و حداقل

[1] Heller
[2] Dargahi
[3] Volume Of Fluid
[4] Nazari

در امتداد پرتابه جامی شکل و همچنین توزیع فشار در راستای محور مرکزی پرتابه جامی شکل استخراج شد. یوستا[1] (۲۰۱۴) به بررسی عددی خصوصیات هیدرولیکی جریان روی سرریز سد لالی[2] و مقایسه با نتایج مدل فیزیکی بر پایه فن حجم سیال با استفاده از مدل عددی Flow-3D پرداخت. نتایج نشان داد مدل عددی سه‌بعدی سرریز می‌تواند ابزار سریع و عملی به‌منظور بررسی خصوصیات هیدرولیکی جریان روی سرریز باشد. رئیسی[3] و همکاران (۲۰۱۵) اثر زاویه همگرایی دیواره‌های شوت را بر خصوصیات جریان در سرریزها با مدل عددی Flow-3D بررسی کردند. نتایج حاکی از 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 همگرایی است. پرسایی[4] و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی پدیده کاویتاسیون روی پرتابه سرریز سد بالارود به کمک مدل عددی پرداختند. در این تحقیق مشخص شد مدل آشفتگی RNG عملکرد مناسبی برای مدل‌سازی کاویتاسیون دارد. همچنین نتایج شبیه‌سازی عددی نشان داد که وقوع کاویتاسیون بر اساس شاخص کاویتاسیون بحرانی ۰/۲۵ در طول سرریز و پرتابه سد بالارود امکان‌پذیر نیست.

صفوی و همکاران (۱۳۸۹) به مطالعه آزمایشگاهی جام‌های پرتابی در پایانه سرریزهای آزاد و دریچه دار پرداختند. ایشان به این نتیجه رسیدند که نحوه بهره‌برداری از سرریز، به ازای دبی‌های کم تأثیر زیادی در طراحی جام‌ها دارد و ممکن است پرش هیدرولیکی تشکیل‌شده بر روی جام، در دبی‌های اولیه سیلاب ایمنی جام را به خطر اندازد. عطار زاده و همکاران (۱۳۹۱) به کمک مدل عددی Fluent مشخصه‌های جریان ازجمله پروفیل سطح آب، سرعت و فشار را در محل تغییر شیب ناگهانی سرریز مورد بررسی قرار دادند که مشخص شد نتایج حاصل از مدل عددی ازجمله پروفیل سرعت و توزیع فشار در بستر در تمام زوایای تغییر شیب، در قسمت کانال سرریز و نیز محل تغییر شیب با نتایج آزمایشگاهی مطابقت خوبی دارند. عزیزی کوچکسرایی و حسن‌زاده (۱۳۹۲) اثر شرایط هیدرولیکی متفاوت بر توزیع سرعت و فشار روی سرریز اوجی سد بالارود را به‌منظور بررسی پدیده کاویتاسیون و جانمایی محل‌های مستعد خلأ زایی مورد پژوهش قرار دادند که نتایج به‌دست‌آمده به کمک مدل Flow-3D نشان داد که با افزایش شدت‌جریان، سرعت و فشارهای منفی، احتمال خلأ زایی بیش‌تر می‌شود. نیک‌پور و همکاران (۱۳۹۳) 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. حسن‌زاده وایقان و همکاران (۱۳۹۴) به بررسی پدیده کاویتاسیون روی سرریز سد ونیار با استفاده از مدل عددی Fluent پرداختند. مشخص شد که در هیچ‌یک از گزینه‌های مطالعه شده کاویتاسیون رخ نداده و سرریز احداث شده در مقابل این پدیده ایمن است. سخایی و همکاران (۱۳۹۵) با محاسبه سرعت و عمق جریان بر روی سرریز اوجی سد جره با استفاده از نرم‌افزار 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.

با توجه به موارد ذکر شده، مطالعه جامع سازه سرریز و پرتابه با عملکرد مؤثر آن در استهلاک انرژی جریان خروجی به‌خصوص در سرریزهای بلند از اهمیت زیادی برخوردار است. در این راستا، شبیه‌سازی سرریز سد و سازه استهلاک انتهای سرریز و بررسی زوایای پرتاب، شعاع پرتابه و امکان وقوع پدیده کاویتاسیون در آن‌ها، ازجمله موضوعات مهم در طراحی این سازه‌ها می‌باشند. ازآنجاکه در مطالعات قبلی بررسی جامع هیدرودینامیک جریان در سازه سرریز شامل کانال تقرب، اوجی سرریز، شوت و مستهلک کننده انتهایی که پرتابه جامی شکل با زاویه پرتاب منفی است، کمتر مورد ارزیابی قرار گرفتند و همچنین خطر وقوع کاویتاسیون در این سازه‌ها حائز اهمیت است؛ بنابراین این پژوهش با صحت‌سنجی از طریق مدل انتقال آشفتگی و حساسیت‌سنجی نسبت به ۴ شبکه‌بندی مختلف می‌تواند یک کار جدید در این زمینه باشد و مورد استفاده مهندسان قرار گیرد.

[1] Usta
[2] Laleli
[3] Reisi
[4] Parsaie

مواد و روش‌ها

سد گلورد نکا از نوع سد سنگریزه‌ای با رویه بتنی[1] 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 گلورد یک سرریز اوجی بوده که با هدایت جریان از طریق کانال تقرب، اوجی، شوت و جام پرتابی سیلاب را به پایاب منتقل می‌کند. در شکل (۱) نمایی از سد در حال ساخت گلورد نشان داده شده است.

شکل (۱): نمایی از سد در حال ساخت گلورد نکا

معادلات حاکم بر جریان

معادلات حاکم بر جریان یک سیال تراکم ناپذیر لزج، توسط معادلات پیوستگی و اندازه حرکت در جهت محورهای مختصات که به معادلات ناویر استوکس معروف هستند، بیان می‌شوند. این معادلات درواقع بیانگر پایداری جرم و اندازه حرکت به بیان ریاضی می‌باشند. چنانچه المانی از سیال به‌عنوان حجم کنترل ثابت در فضای محاسباتی در نظر گرفته شود در این صورت نیروهای وارد بر آن و اصل بقای جرم در این المان به‌صورت معادلات مشتق جزئی نمایان می‌شوند.

نرم‌افزار Flow-3D از روش‌های دقت مرتبه اول و دوم در حل معادلات بهره می‌برد. در این نرم‌افزار، معادلات حاکم بر جریان غیرقابل تراکم به‌صورت روابط (۱) و (۲) است.

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x)+\frac{\partial}{\partial y}(vA_y)+\frac{\partial}{\partial z}(wA_z)=0 \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t}+\frac{1}{V_F}(u_iA_i\frac{\partial u_i}{\partial x_i})=\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i}+g_i+f_i \qquad (۲)$$

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).

مدل‌سازی آشفتگی

مدل‌های آشفتگی زیادی توسط محققان برای شبیه‌سازی جریان‌های آشفته تدوین شده است. تعداد معادلات دیفرانسیل مورداستفاده برای کمیت‌های آشفتگی به دسته‌های مختلفی شامل مدل‌های صفرمعادله‌ای، مدل‌های تک‌معادله‌ای، مدل‌های دومعادله‌ای، مدل‌های دارای معادله تنش و مدل‌های شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ[2] تقسیم می‌شوند. شبیه‌سازی آشفتگی در Flow-3D با استفاده از یکی از پنج مدل آشفتگی طول اختلاط پرانتل[3]، یک معادله‌ای انرژی جنبشی آشفتگی[4]، مدل دو معادله‌ای $k-\varepsilon$[5]، مدل گروه‌های نرمال شده (RNG)[6] و مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ صورت می‌گیرد.

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 (قاسم‌زاده، ۱۳۹۲).

مدل‌سازی شرایط مرزی

نرم‌افزار Flow-3D دارای ۱۰ نوع شرط مرزی متقارن[7]، دیوار[8]، ادامه‌دهنده[9]، فشار[10]، متناوب[11]، سرعت[12]، موج[13]، نرخ دبی[14]، خروجی[15] و پوشش شبکه‌ای[16] بر روی وجه‌های شبکه حل است. شرایط مرزی که در این تحقیق استفاده شده است شامل متقارن، دیوار، خروجی، سرعت و فشار است. شرط دیوار به‌منظور مدل‌کردن دیواره و یا نواحی که جسم صلب در مرز

[1] CFRD
[2] Large Eddy Simulation Models (LES)
[3] Prandtl mixing-length model
[4] One-equation turbulent energy model
[5] Two equation $k-\varepsilon$ model
[6] Renormalized group model
[7] Symmetry
[8] Wall
[9] Continuative
[10] Specified pressure
[11] Periodic
[12] Specified velocity
[13] Wave
[14] Volume flow rate
[15] Outflow
[16] Grid overlay

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. برای تعریف سرعت جریان در مرز از شرط سرعت می‌شود. از شرط فشار برای اعمال فشار در وجه‌های شبکه حل استفاده می‌شود (هدایتی‌فر و پورلک، ۱۳۹۳).

معیارهای ارزیابی دقت مدل

برای مقایسه کمی عملکرد مدل‌های پیشنهادی می‌توان از تجزیه‌وتحلیل خطاهای باقی‌مانده و اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده بهره گرفت. در این تحقیق از میانگین مطلق خطا (MAE[1])، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE[2]) و ضریب همبستگی (R^2) برای ارزیابی عملکرد مدل استفاده شد. بیان ریاضی این آزمون‌ها در روابط ۳، ۴ و ۵ آورده شده است.

$$MAE = \frac{1}{n}\sum\left|y_i^* - y_i\right| \qquad (۳)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{n}\sum(y_i^* - y_i)^2\right]^{0.5} \qquad (۴)$$

$$R^2 = \frac{Cov(y_i^*, y_i)}{\sigma_{y_i^*}\sigma_{y_i}} \qquad (۵)$$

منظور از y_i^*، y_i و n در روابط ۳ و ۴ به ترتیب تراز سطح آب در مدل عددی، تراز سطح آب اندازه‌گیری شده و تعداد کل داده‌ها است. در رابطه ۵ نیز $Cov(y_i^*, y_i)$ و $\sigma_{y_i^*}\sigma_{y_i}$ ، به ترتیب عبارت‌اند از کوواریانس تراز سطح آب مدل عددی و اندازه‌گیری شده و انحراف معیارهای آن‌ها.

معرفی نرم‌افزار Flow-3D

از نرم‌افزار Flow-3D برای تحلیل سه‌بعدی جریان استفاده می‌شود. این نرم‌افزار از دو روش عددی VOF[3] و FAVOR[4] برای شبیه‌سازی هندسی بهره می‌برد. روش VOF برای مدل‌سازی جریان‌های با سطح آزاد استفاده می‌شود. در این روش برای نشان دادن سلول‌های حاوی سیال از کمیتی به نام F (تابع حجم سیال) استفاده می‌شود که بیانگر بخشی از سلول است که توسط سیال پر شده است. برای تعریف پروفیل سطح آب از تابع F(x,y,z) طبق رابطه (۶) استفاده می‌شود:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u_j\frac{\partial F}{\partial x_j} = 0 \qquad (۶)$$

تابع F، شاخص درصد حجمی فاز آب است و مقدار آن بین صفر و یک متغیر است. مقدار بین صفر و یک نشان‌دهنده وجود سطح آزاد در سلول است.

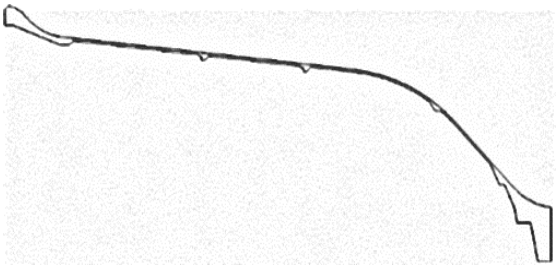
روش FAVOR نیز برای شبیه‌سازی سطوح و احجام صلب مثل مرزهای هندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. جز حجمی سیال (F) در داخل هر سلول شبکه برای تعیین موقعیت سطح سیال به‌کاربرده می‌شود، همچنین کمیت جز حجمی (V_f) برای تعیین سطح بدنه صلب استفاده می‌شود. زمانی که در هر سلول، حجم اشغال‌شده توسط بدنه صلب مشخص باشد با روشی مشابه روش VOF می‌توان مرز صلب را داخل شبکه ثابت مشخص کرد. این مرز برای تعیین شرایط مرزی دیواره که جریان باید از آن تبعیت کند، به کار می‌رود (فرزین و همکاران، ۱۳۹۵).

ارائه نتایج

مدل‌سازی هندسه سد

سد گلورد نکا دارای کانال تقرب در تراز ۷۳۰ متر از سطح دریا (رقوم نرمال اولیه) و اوجی با رقوم ۷۳۳ متر از سطح دریا متناظر با رقوم نرمال سد است. شیب شوت متصل به اوجی ۱۰ درصد است که در انتها با یک قوس به شعاع ۵۰ متر به شیب ۱۰۰ درصد (1H:1V) متصل گردیده است. طول سرریز ۱۷۳ متر که دارای عرض ۶۶ متر و ۴۲/۶ متر به ترتیب در ابتدا و انتهای سرریز است. جهت کنترل پرتاب سیلاب به‌وسیله جام پرتابی و عدم برخورد آن به کوه روبرو ازیک‌طرف و عدم برخورد سیلاب‌های مهم و قابل فرسایش به شیب‌برداری انتهای سرریز از طرف دیگر، زاویه جام پرتابی ۱۰ درجه منفی نسبت به افق (به سمت پائین) و رقوم آن نیز ۶۸۰ متر از سطح دریا است. شعاع جام پرتابی معادل ۲۰ متر و زاویه خروجی جریان در انتهای قوس معادل ۱۰ درجه است (گروه مشارکت اویول- آب نیرو، ۱۳۹۰). در شکل (۲) برش طولی سرریز سد نشان داده شده است.

[1] Mean Absolute Error
[2] Root Mean Square Error
[3] Volume of Fluid
[4] Fractional Area-Volume Obstacle Representation

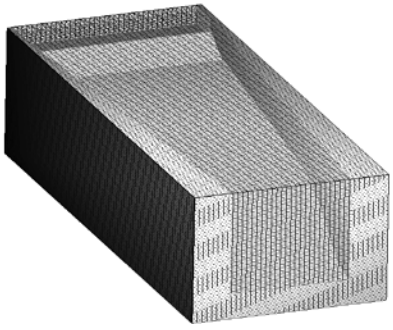


شکل (۲): برش مدل اصلی سرریز سد گلورد نکا

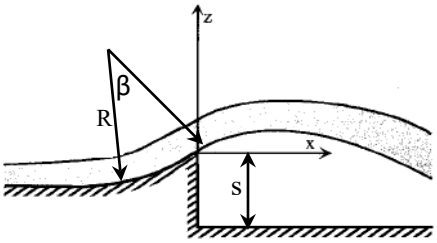
سرریز سد گلورد در محیط اتوکد سه‌بعدی ساخته شد و به محیط Flow-3D وارد گردید. در مدل‌سازی عددی انجام گرفته طول مدل ۱۷۳ متر، ارتفاع تا تاج سرریز ۶۷ متر، عرض سرریز در بالادست ۶۶ متر و عرض در پایین‌دست ۴۲/۶ متر است. به دلیل استفاده از شبکه مش مستطیلی و با توجه به اینکه سرریز همگرا است، دو گوه مثلثی شکل در دو طرف سرریز تعبیه شده است تا جریان از روی سرریز خارج نگردد. در بالادست شبکه حل شرط مرزی فشار، در پایین‌دست شرط مرزی خروجی، در کف و دیواره‌ها شرط مرزی دیوار و در مرز فوقانی شرط متقارن حاکم است. در شکل (۳) نمای نهایی مدل سرریز در محیط Flow-3D و مدل شبکه‌بندی شده نشان داده شده است.

اعتبار سنجی مدل عددی

به‌منظور اعتبارسنجی مدل عددی و به دست آوردن بهترین مدل آشفتگی برای پروفیل سطح آب در پرتاب‌کننده جامی، از آزمایش‌های هلر و همکاران (۲۰۰۵) استفاده شده است. این آزمایش‌ها در یک کانال مستطیلی به عرض ۰/۵ متر، ارتفاع ۰/۷ متر و طول ۷ متر انجام شده است. کف کانال و دیواره راست از جنس PVC و دیواره چپ کانال از جنس شیشه است. شکل (۴) طرح مدل آزمایشگاهی موردنظر را نشان می‌دهد.

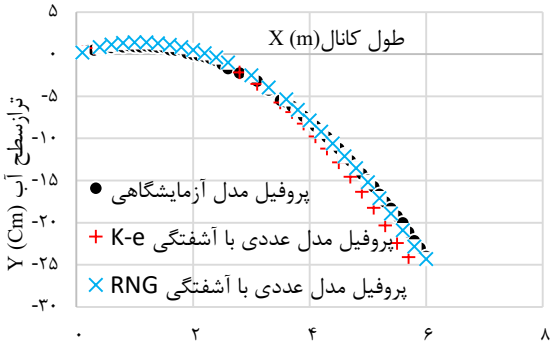


شکل (۳): مدل شبکه‌بندی شده سرریز سد گلورد نکا



شکل (۴): طرح مدل آزمایشگاهی

مدل آزمایشگاهی شامل کانال ورودی افقی به طول ۱ متر، جام پرتابی و کانال خروجی (که ۰/۲۵ متر پایین‌تر از کانال ورودی قرار گرفته است) است. شعاع جام ۰/۱ متر و زاویه انحراف ۱۰ درجه است. تاج باکت به اندازه S بالاتر از کانال پایین‌دست قرار گرفته است که $w = R(1-\cos\beta)$ ارتفاع باکت، R شعاع باکت، β زاویه انحراف باکت و $S-w$ اختلاف ارتفاع بین باکت و کانال پایین‌دست است. در شکل (۵) پروفیل سطح آب برای عدد فرود ۱۰ و مدل‌های آشفتگی RNG و $k-\varepsilon$ مقایسه شده است. در جدول (۱) نیز نتایج ارزیابی دقت مدل آورده شده است. با توجه به جدول (۱)، به دلیل بالا بودن ضریب همبستگی و نزدیک بودن مقادیر شاخص‌های ارزیابی نسبت به حالت بهینه، تحلیل با مدل‌های آشفتگی RNG و $k-\varepsilon$ از جواب‌های قابل قبولی برخوردار می‌باشند؛ اما در دو شاخص ارزیابی، تحلیل با مدل آشفتگی RNG به حالت بهینه نزدیک‌تر است.



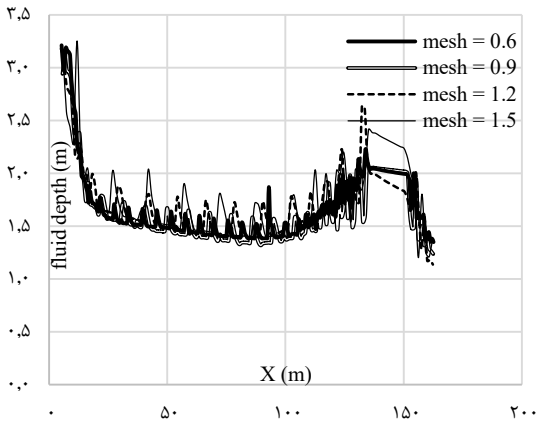
شکل (۵): شبیه‌سازی پروفیل سطح آب با مدل‌های آشفتگی RNG و $k-\varepsilon$ و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی

جدول (۱): نتایج ارزیابی دقت مدل آشفتگی

شاخص ارزیابی	MAE	RMSE	R^2
تحلیل با مدل RNG	۰/۳۵۶	۰/۴۰۶	۰/۹۸
تحلیل با مدل $k-\varepsilon$	۰/۹۶۳	۱/۳۴۶	۰/۹۷

به‌منظور به دست آوردن ابعاد بهینه سلول‌های محاسباتی، عمق جریان روی سرریز سد گلورد با ۴ شبکه‌بندی مختلف به

ترتیب شامل مش مربعی ۰/۶ متر، ۰/۹ متر، ۱/۲ متر و ۱/۵ متر شبیه‌سازی گردید. با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل (۶)، نمودار عمق جریان در مدل با مش ریز (۰/۶ متر) و مش ۰/۹ متر نسبت به بقیه مش‌ها دارای نوسانات کمتری در طول سرریز است که نشان‌دهنده ابعاد مناسب این سلول‌ها است. باوجودی که ابعاد مش برابر با ۰/۹ متر برای مدل‌سازی مناسب است، لیکن برای به دست آوردن نتایج بهتر، از مش با ابعاد ۰/۶ متر برای مدل‌سازی استفاده خواهد گردید.



شکل (۶): مقایسه عمق جریان در ۴ مش مختلف

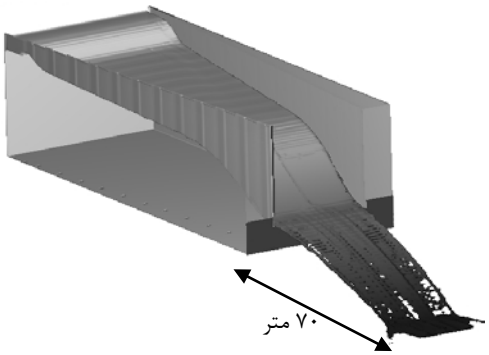
بنابراین در ادامه طبق نتیجه شکل (۶)، مش مربعی ۰/۶ متر با تعداد ۳۳۷۸۲۴۰ سلول محاسباتی برای شبیه‌سازی جریان کل سرریز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

تحلیل خصوصیات هیدرولیکی جریان بر روی سرریز

خصوصیات هیدرولیکی مورد ارزیابی در این پژوهش شامل طول پرتابه، سرعت جریان، فشار وارد بر کف سرریز و پرتابه و شاخص کاویتاسیون تحت دبی با دوره بازگشت ۱۰۰۰۰ ساله (دبی طراحی) معادل ۱۰۹۲ مترمکعب بر ثانیه است. در این بررسی، ابتدا پارامترهای مذکور روی مدل اصلی سرریز سد بررسی گردیده و سپس تأثیر تغییر مشخصات پرتابه بر این خصوصیات به‌خصوص طول پرتابه مورد بحث قرار گرفته است.

طول پرتابه

پرتابه جامی شکل سازه‌ای است که در آن جریان آب به اتمسفر پرتاب می‌شود و سپس در رودخانه فرود می‌آید. قسمتی از انرژی جریان 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. ازآنجاکه زاویه پرتاب مثبت پرتابه سرریز سد گلورد، سبب برخورد جریان و پرتابه به کوه در دبی‌های بیش از ۵۰۰ مترمکعب بر ثانیه می‌گردد، لذا زاویه پرتاب ۱۰- درجه برای مدل نهایی سرریز سد گلورد انتخاب گردیده است (گروه مشارکت اویول- آب نیرو، ۱۳۹۰). همچنین با توجه به تراز پایاب سد گلورد که حدود ۴۰ متر پایین‌تر از لبه پرتابه است، شبیه‌سازی با این اختلاف تراز انجام شده و طول پرتابه از آن استخراج شده است. شکل (۷) نمای سه‌بعدی طول پرتابه جریان در مدل اصلی سرریز سد گلورد را نشان داده است.

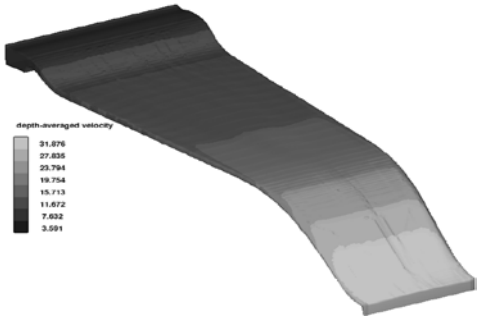


شکل (۷): نمای سه‌بعدی الگوی جریان در سرریز سد گلورد

تحلیل سرعت جریان

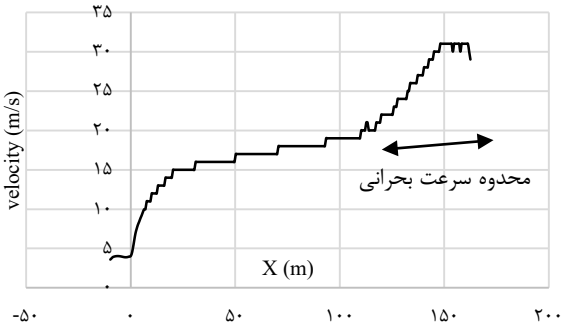
به‌طورکلی در سرریزهای بلند با افزایش دبی عبوری، سرعت در تمامی نواحی سرریز افزایش می‌یابد و محدوده سرعت‌های بیشینه در قسمت انتهایی سرریز به وجود می‌آید و کمترین مقدار سرعت که دارای بیشترین عمق نسبت به نواحی دیگر سرریز است، قبل از رسیدن جریان به تاج سرریز مشاهده می‌شود.

مطابق شکل (۸)، کمترین مقدار سرعت در کانال تقرب و حدود ۴ متر بر ثانیه است. مقدار سرعت در طول شوت نیز که از فاصله حدود ۲۰ الی ۱۰۵ متر قرار دارد، از ۱۵ تا ۱۹ متر بر ثانیه متغیر است. همچنین در انتهای شوت و محل اتصال قوس به شیب ۱۰۰ درصد روند افزایش سرعت چشم‌گیر است و در پرتابه به حدود ۳۰ متر بر ثانیه می‌رسد. با توجه به این شکل، از انتهای شوت و به فاصله ۱۲۰ متر از ابتدا تا ابتدای پرتابه، سرعت جریان از ۲۰ به ۳۰ متر بر ثانیه رسیده است و ازآنجاکه پدیده کاویتاسیون در سرعت‌های بالای ۲۰ متر بر ثانیه محتمل است، کاویتاسیون می‌تواند این ناحیه را تهدید کند (سامانی، ۱۳۹۳).



شکل (۸): نمای سه‌بعدی سرعت جریان عبوری از سرریز سد گلورد

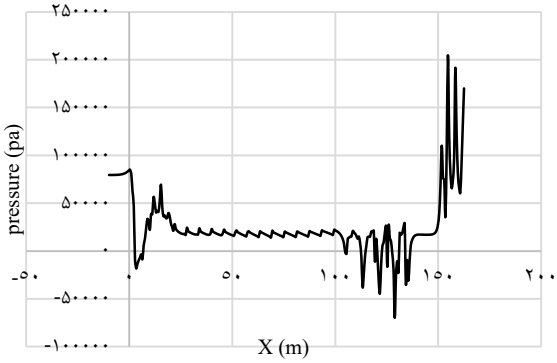
جزئیات سرعت جریان عبوری از سرریز سد گلورد نکا و محدوده سرعت بحرانی در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل (۹): جزئیات سرعت جریان عبوری از سرریز سد گلورد

تحلیل فشار وارد بر سرریز

به‌طورکلی در سرریزهای بلند با افزایش دبی عبوری، از فشار انتهای سرریز کاسته می‌شود و مکش در انتهای سرریز افزایش می‌یابد که احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون را افزایش می‌دهد. شکل (۱۰) جزئیات فشار جریان وارد بر خط میانی سرریز سد را نشان می‌دهد.



شکل (۱۰): تغییرات فشار بر روی سرریز سد گلورد نکا

در محدوده اوجی سرریز، با توجه به ارتفاع بیشتر آب در کانال تقرب، فشار حداکثر مثبت در این ناحیه رخ داده و مقدار آن حدود ۸۵۰۰۰ پاسکال است. فشار وارد بر قوس ابتدایی تاج سرریز اوجی منفی است. در ادامه، روند فشار ثابت به میزان ۱۴۰۰۰ پاسکال در محدوده شوت سرریز مشاهده می‌گردد. حداکثر فشار منفی وارد بر کل سرریز در قوس دایره‌ای به مقدار ۷۰۰۰۰- رخ می‌دهد که با توجه به سرعت جریان در این ناحیه، امکان ایجاد پدیده کاویتاسیون بیش از نقاط دیگر سرریز است. با عبور جریان از قوس و شیب ۱۰۰ درصد، فشار حداکثری مثبت در پرتابه سد گلورد نکا رخ داده که مقدار آن به ۲۰۰۰۰۰ پاسکال می‌رسد.

در محدوده ۱۰۰ تا ۱۵۰ متر، به دلیل تغییر شیب از شیب ملایم (منفی ۱۰ درصد) به شیب تند (منفی ۱۰۰ درصد)، جدایش جریان صورت گرفته که موجب کاهش فشار در این ناحیه می‌گردد. این تغییر شیب، در خصوصیات آشفتگی جریان تأثیرگذار بوده و موجب تغییرات موضعی سرعت و به تبع آن نوسانات فشار می‌گردد.

پس از ۱۵۰ متر نیز، جریان از شیب منفی ۱۰۰ درصد (زاویه ۴۵- درجه نسبت به افق) وارد پرتابه جامی شکل شده و با شیب مثبت از باکت خارج می‌گردد. این امر موجب افزایش فشارهای وارده به کف می‌شود. به دلیل آشفتگی‌های ایجاد شده در این محدوده، نوسانات سرعت و درنتیجه نوسانات فشار قابل‌انتظار است که در شکل ۱۰ این نوسانات مشاهده می‌شود.

تحلیل شاخص کاویتاسیون

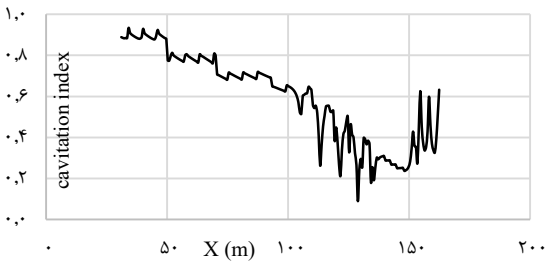
کاویتاسیون پدیده‌ای مخرب در سازه‌های هیدرولیکی است. روی سطح سرریز به علت ناهمواری ممکن است جریان آب به‌طور موضعی متمرکز گردد و نتیجتاً سرعت جریان افزایش یافته و فشار کاهش پیدا کند. معمولاً تمرکز جریان ناگهانی است و باعث تشکیل حفره‌هایی یا مناطقی از بخار آب می‌گردد. خرابی حاصل از کاویتاسیون بر روی سرریز هنگامی اتفاق می‌افتد که حباب‌ها یا حفره‌های کوچک از منطقه با فشار پایین به منطقه با فشار بالاتر حرکت کند و به‌طور ناگهانی منهدم گردند. انهدام حباب‌ها سبب ایجاد فشارهای هیدرودینامیکی قابل‌توجهی می‌گردد. این فشار بالا ممکن است توسط امواج حاصله در اثر همین پدیده از حفره‌های دیگر تقویت گردد و نتیجتاً سطح بتن در اثر تنش موضعی حاصله دچار پدیده خستگی[1] و نهایتاً خرابی شود. این موضوع ممکن

[1] Fatigue

است باعث جدا شدن یک قطعه بزرگ بتنی از بقیه بدنه بتنی شود. معمولاً برای بررسی امکان وقوع پدیده کاویتاسیون در سرریزها از شاخص کاویتاسیون (σ) استفاده می‌شود. زمانی که شاخص 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، ۰/۲ فرض شده است (سامانی، ۱۳۹۳). رابطه (۷) نحوه محاسبه این شاخص را نمایش می‌دهد:

$$\sigma = \frac{(P - P_v)/\gamma}{V^2/2g} \quad \text{و} \quad P = P_{atm} + P_{model} \qquad (۷)$$

در رابطه (۷)، P فشار مطلق، P_v فشار بخار آب که در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد برابر ۲۳۳۰ پاسکال، V سرعت جریان روی سرریز ناشی از شبیه‌سازی عددی، γ وزن مخصوص آب برابر ۹۸۱۰ نیوتن بر مترمکعب، P_{atm} برابر ۹۸۱۰۰ پاسکال و P_{model} فشار وارد بر سرریز ناشی از شبیه‌سازی عددی است. با جایگذاری مقادیر فشار و سرعت مدل شبیه‌سازی شده سرریز سد گلورد در رابطه (۷)، مقادیر شاخص کاویتاسیون در طول سرریز محاسبه گردید و در شکل (۱۱) نمایش داده شده است.



شکل (۱۱): شاخص کاویتاسیون در طول مدل اصلی سرریز سد گلورد نکا

همان‌طور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، شاخص کاویتاسیون در بازه ۱۲۰ تا ۱۴۰ متر پایین‌دست، به مقدار بحرانی ۰/۲ نزدیک شده است و در سه نقطه کمتر از مقدار بحرانی شده است. درنتیجه پتانسیل کاویتاسیون در این محدوده بیش از نقاط دیگر است. بااین‌وجود، در بازه ۱۴۰ تا ۱۶۰ متری (محدوده سازه استهلاک انرژی) علی‌رغم سرعت زیاد جریان و به دلیل فشار مثبت موجود در اثر تغییر جهت جریان در باکت، وقوع پدیده کاویتاسیون منتفی است.

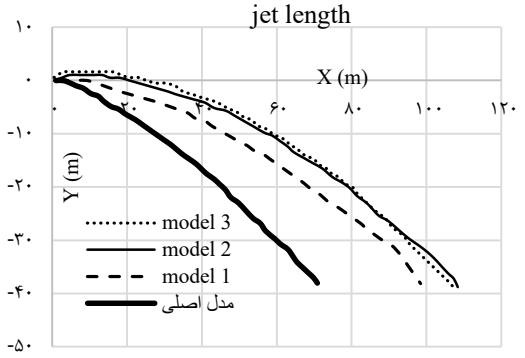
جهت کاهش پتانسیل کاویتاسیون شکل پروفیل شوت باید طوری طراحی شود که فشار موضعی افزایش یابد. چنانچه تغییرات شکل هندسی شوت در کاهش پتانسیل کاویتاسیون مؤثر واقع نشود، باید روش‌های دیگری به‌کاربرده شوند. مؤثرترین و اقتصادی‌ترین روش برای کاهش یا حذف پتانسیل کاویتاسیون، روش هوادهی است (سامانی، ۱۳۹۳). قابل ذکر 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، هوادهی به سرریز پیشنهاد می‌گردد. با اختلاط یک سیال تراکم‌پذیر مانند هوا با غلظت ۶ تا ۸ درصد در داخل آب، اثر این صدمات می‌تواند از بین برود. این روش جلوگیری از پدیده کاویتاسیون که از سال ۱۹۴۱ استفاده می‌شود، باعث گردیده است از میزان صدمات ناشی از کاویتاسیون کاسته شود (حسینی و ابریشمی، ۱۳۹۰).

تحلیل تغییر مشخصات پرتابه بر استهلاک انرژی

در ادامه تأثیر تغییر مشخصات پرتابه بر خصوصیات هیدرولیکی جریان بررسی می‌شود. مدل اصلی سرریز سد گلورد نکا دارای شیب شوت ۱۰٪، شعاع قوس دایره‌ای ۵۰ متر، شعاع پرتابه ۲۰ متر و زاویه پرتاب ۱۰- است. تغییراتی که نسبت به پرتابه مدل اصلی سد ایجاد شد، در جدول (۲) ارائه شده است. طبق انتظار با مشاهده نتایج حاصل از تغییر مشخصات پرتابه اختلاف قابل‌ملاحظه‌ای در مقادیر سرعت جریان و فشار وارد بر سرریز به وجود نیامد؛ اما طبق هدف این پژوهش نتایجی که در خصوص طول پرتاب و استهلاک انرژی به دست آمد جالب توجه بود. شکل (۱۲) اثر تغییر مشخصات پرتابه را بر طول پرتاب جریان نشان می‌دهد.

جدول (۲): مشخصات پرتابه در مدل‌های جدید

مدل	شعاع پرتابه (متر)	زاویه پرتاب (درجه)
مدل اصلی	۲۰	-۱۰
مدل ۱	۱۰	۰
مدل ۲	۲۰	+۱۰
مدل ۳	۳۰	+۱۰



شکل (۱۲): اثر تغییر مشخصات پرتابه بر طول پرتاب جریان

شکل (۱۲) طول پرتابه را بر اساس تغییرات اعمال شده در هندسه پرتاب‌کننده جامی شکل نشان می‌دهد. در مدل ۱ با توجه به کاهش شعاع پرتابه به ۱۰ متر و افزایش زاویه پرتاب به ۰ درجه، افزایش طول پرتاب مشاهده می‌شود و این اهمیت بیشتر زاویه پرتاب را نسبت به شعاع پرتابه در استهلاک انرژی نشان می‌دهد. در مدل ۲ نیز با توجه به ثابت بودن شعاع پرتابه نسبت به مدل اصلی و فقط تغییر زاویه پرتاب از ۱۰- به ۱۰+ درجه افزایش طول پرتاب ۴۰ متری مشاهده می‌گردد. در مدل ۳ با افزایش شعاع پرتابه به ۳۰ متر و ثابت نگه‌داشتن زاویه پرتاب ۱۰+ درجه نسبت به مدل ۲، افزایش طول پرتاب مشاهده نمی‌شود اما در مدل ۳ جریان انحنای بیشتری به خود می‌گیرد و در تماس بیشتری با هوا قرار دارد؛ بنابراین در مدل ۳ استهلاک انرژی بیشتری صورت می‌گیرد.

انتخاب مدل بهینه

در ادامه، مزایا و معایب تغییراتی که در سازه استهلاک سرریز سد پیشنهاد شد مورد بررسی قرار می‌گیرد و مدل بهینه برای سرریز سد گلورد نکا انتخاب می‌شود. مدل‌های ۱، ۲ و ۳ با هدف بررسی طول پرتاب و استهلاک انرژی در ازای تغییر مشخصات پرتابه جامی شکل شبیه‌سازی گردید. با تغییراتی که در شعاع پرتابه و زاویه پرتاب این سه مدل اعمال شد، مشخص شد زاویه پرتاب تأثیر بیشتری نسبت به شعاع پرتابه روی طول پرتاب دارد. در مدل ۲ فقط با افزایش زاویه از ۱۰- به ۱۰+ درجه و ثابت بودن شعاع، افزایش ۴۰ متری طول پرتاب مشاهده گردید. در مدل ۳ نیز با افزایش شعاع پرتابه و ثابت بودن زاویه پرتاب نسبت به مدل ۲، طول پرتاب افزایش نمی‌یابد اما جریان با انحنای بیشتری پرتاب می‌شود و در تماس بیشتری با هوا استهلاک انرژی بیشتری صورت می‌گیرد. در انتها می‌توان گفت در صورت عدم وجود محدودیت کوه روبروی سرریز سد گلورد، می‌توان مدل اصلی سرریز را با شعاع پرتابه بیشتر و زاویه پرتاب مثبت به‌منظور استهلاک انرژی بیشتر به‌عنوان مدل بهینه پیشنهاد کرد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از مدل عددی Flow-3D، پارامترهای هیدرولیکی جریان ازجمله طول پرتابه، سرعت جریان، تغییرات فشار و شاخص کاویتاسیون در سرریز شوت همگرا و پرتاب‌کننده جامی شکل سد گلورد نکا شبیه‌سازی و مورد بررسی قرار گرفت. صحت‌سنجی مدل عددی از طریق مدل آشفتگی و حساسیت‌سنجی نسبت به مش صورت گرفت. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی عددی و تحلیل سرریز سد به شرح زیر است.

- پدیده کاویتاسیون الزاماً در مکان‌های با سرعت بالا رخ نمی‌دهد؛ باوجودآنکه در پرتابه جامی شکل، حداکثر سرعت اتفاق افتاده است لیکن به دلیل افزایش فشار در این محدوده، کاویتاسیون رخ نمی‌دهد. مکان‌هایی که در معرض کاویتاسیون قرار دارند در بالادست پرتابه و در فاصله ۱۲۰ تا ۱۴۰ متری پایین‌دست تاج سرریز قرار دارند. در این بازه، شاخص کاویتاسیون از مقدار بحرانی ۰/۲ کمتر شده است. لذا لازم است راه‌کارهای جلوگیری از کاویتاسیون در این محدوده پیش‌بینی گردد.
- حداقل سرعت جریان ۴ متر بر ثانیه در کانال تقرب با رژیم زیر بحرانی و حداکثر سرعت جریان برابر ۳۱ متر بر ثانیه در پرتابه جامی شکل است.
- حداکثر فشار منفی در سرریز سد در قوس دایره‌ای انتهای شوت به میزان ۷۰- کیلو پاسکال مشاهده گردید. همچنین حداکثر فشار مثبت وارد بر کف سرریز در پرتابه جامی شکل به مقدار ۲۰۰ کیلو پاسکال است. این نتایج با نتایج نظری و همکاران (۲۰۱۳) مطابقت دارد.
- طول پرتابه در سرریز سد از محل پرتاب جت تا برخورد به پایاب با اختلاف تراز ۴۰ متری، برابر ۷۰ متر است.
- با تغییر مشخصات پرتابه جامی شکل مشخص گردید زاویه پرتاب نسبت به شعاع پرتاب تأثیرگذارتر بوده است. به‌منظور استهلاک بیشتر انرژی جریان در صورت عدم وجود محدودیت‌هایی همچون توپوگرافی محل فرود جت، می‌توان با افزایش زاویه پرتابه به این مهم دست یافت.

- استفاده از مدل‌سازی عددی این امکان را به طراح می‌دهد که طرح هیدرولیکی را در شرایط مختلف تجزیه‌وتحلیل نموده و ترکیب بحرانی مجموعه پارامترها را برای نیل به طرح مطلوب مورد بررسی قرار داده و راه‌کارهای اصلاحی در این خصوص ارائه دهد.

مراجع

۱- حسینی، س. م. و ابریشمی، ج. (۱۳۹۰). "هیدرولیک کانال‌های باز" ، چاپ بیست و هفتم، انتشارات آستان قدس رضوی، مشهد، فصل هشتم.

۲- حسن‌زاده وایقان، و. حسن‌زاده، ی. حسین زاده دلیر، ع. و عبدی کردانی، ا. (۱۳۹۴). "بررسی پدیده کاویتاسیون روی سرریز سد ونیار با استفاده از مدل عددی Fluent". مجله پژوهش آب ایران، جلد ۹، شماره ۳، صفحات ۱۷۷ تا ۱۸۰.

۳- سامانی، ح. م. و. (۱۳۹۳). "طراحی سازه‌های هیدرولیکی"، چاپ سوم، انتشارات سیمای دانش، تهران، فصل دوم.

۴- سخایی، س. نوحانی، ا. و افروس، ع. (۱۳۹۵). "محاسبه پارامترهای هیدرولیکی سرعت و عمق جریان بر روی سرریز اوجی با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D (مطالعه موردی، سرریز سد جره) ". ماهنامه شباک، سال دوم، شماره ۳، جلد ۲، صفحات ۱ تا ۹.

۵- صفوی، خ. خراسانی زاده، ع. و غفوری، س. (۱۳۸۹). "ملاحظاتی در طراحی جام‌های پرتابی در پایین‌دست جت‌های ریزشی آزاد"، نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، ۱۸ تا ۲۰ آبان ماه، دانشگاه تربیت مدرس.

۶- عزیزی کوچکسرایی، م. و حسن‌زاده، ی. (۱۳۹۲). "بررسی توزیع سرعت و فشار بر روی سریز اوجی سد بالارود با استفاده از Flow-3D "، کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری و توسعه پایدار شهری، تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز.

۷- عطارزاده، ع. زراتی، ا. ر. و شانه‌ساززاده، ا. (۱۳۹۱). "وضعیت جریان در محل تغییر شیب ناگهانی سرریزها." مجله علمی پژوهشی عمران مدرس، دوره دوازدهم، شماره ۱، صفحات ۱۰۷ تا ۱۱۷.

۸- فرزین، س. کرمی، حجت. و ضمیری، ا. (۱۳۹۵). "مطالعه جریان عبوری از سد لاستیکی با به کارگیری هیدرودینامیک محاسباتی." نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق‌آبی، سال سوم، شماره نهم، صفحات ۱ تا ۱۲.

۹- قاسم‌زاده، ف. (۱۳۹۲). "شبیه‌سازی مسائل هیدرولیکی در Flow-3D"، چاپ دوم، انتشارات نوآور، تهران.

۱۰- گروه مشارکت اویول- آب نیرو (۱۳۹۰). "طراحی هیدرولیکی اوجی، شوت و جام پرتابی سرریز و کنترل فرسایش پایاب سرریز سد گلورد نکا"، فصل دوم.

۱۱- نیک پور، م. ر. سلمانی جلودار، ز. حسین‌زاده دلیر، ع. ثانی خانی، ه. و شجاع، ف. (۱۳۹۳). "کاربرد روش‌های المان محدود و حجم محدود در تحلیل جریان آب روی سرریز اوجی (مطالعه موردی: سد دامغان)." مجله پژوهش آب ایران، سال هشتم، شماره ۱۴، صفحات ۵۵ تا ۶۳.

۱۲- هدایتی‌فر، م و پورلک، م. (۱۳۹۳). "شبیه‌سازی دینامیک سیالات با Flow-3D نگارش ۱۰/۰/۱"، چاپ اول، انتشارات آتی‌نگر، تهران.

13- Heller, V., Hager, W. H. and Minor, H. E. (2005). "Ski jump hydraulics." Journal of Hydraulic Engineering. 131, 347-355.

14- Dargahi, B. (2006). "Experimental Study and 3D Numerical Simulations for A Free Overflow Spillway." Journal of Hydraulic Engineering, ASCE. 132(9), 899-907.

15- Nazari, O., Jabbari, E. and Sarkardeh, H. (2013). "Dynamic pressure analysis at chute flip buckets of five dam model studies." International Journal of Civil Engineering. 3(1), 45-54.

16- Usta, E. (2014). "Numerical Investigation of Hydraulic Characteristics of Laleli Dam Spillway and Comparison with Physical Model Study." Thesis Submitted to the Graduate School of Natural and Applied Sciences Middle East Technical University.

17- Reisi, A., Salah, P. and Kavianpour, M. R. (2015). "Impact of Chute Walls Convergence Angle on Flow Characteristics of Spillways using Numerical Modeling." International Journal of Chemical, Environmental and Biological Sciences (IJCEBS). 3(3), 2320–4087.

18- Parsaie, A., Dehdar Behbahani, S. and Haghiabi, A. H. (2016). "Numerical modeling of cavitation on spillway's flip bucket." Frontiers of Structural and Civil Engineering. 10(4), 438-444.

Analysis of Flow in Spillway and Energy Dissipator of Glevard Dam Using Numerical Methods

Khosrow Hosseini[*1]
Milad Fazlollahnejad[2]
Hojat Karami[3]
Saeed Farzin[4]

Abstract

By increasing in construction of large dams, the needs for increasing the safety of flood discharge structures are necessary in design. Overflow spillway and sky jump as a terminal structure downstream of spillway are frequently used in dams. In the present study, the spillway and sky jump of Glevard dam are modeled by Flow-3D software and their hydraulic parameters are studied. Verification tests revealed that RNG turbulence model is the most convenient turbulence model. Sensitive analysis showed that the more suitable mesh size is 0.6 meter. Analysis of hydraulic characteristics of flow showed that the occurrence of cavitation at the end of chute is more probable. In the sky jump, the occurrence of positive pressure prevents of cavitation. The changes in geometry of bucket such as the angle of lip and the radius of bucket are investigated. Increasing the angle of lip about 20 degrees, increases the length of jet until 40 meters.

Keywords

Energy dissipator, Turbulence model, Glevard Dam, Cavitation, Flow-3.

1*. Associate Professor, Civil Engineering Faculty, Semnan University, Semnan, Iran, khhoseini@semnan.ac.ir.
2. Msc Student, Civil Engineering Faculty, Semnan University, Semnan, Iran.
3. Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.
4. Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.
Received:2016/11/23 Accepted:2017/03/26