

مطالعه موردی بررسی عددی شکل‌گیری کاویتاسیون در سرریز نیلوفری با استفاده از نرم‌افزار Flow3D

سعید احسانی^۱، احسان بهنام طلب^۲، علی‌اکبر صالحی نیشابوری^۳

تاریخ ارسال: ۱۳۹۶/۰۷/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۱/۱۹

چکیده

در سرریزهای نیلوفری در محل ورودی سرریز و محل اتصال ورودی قیفی شکل و شفت قائم و همچنین در محدوده زانویی، پیش‌بینی می‌شود که امکان وقوع کاویتاسیون وجود داشته باشد. این موضوع باعث شده است سرریزهای نیلوفری به عنوان یکی از مستعدترین سرریزها برای شکل‌گیری کاویتاسیون شناخته شوند. در این تحقیق با استفاده از شبیه‌سازی عددی این موضوع بررسی شده است. برای مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار Flow3D استفاده شده و برای معتبرسازی، نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیده، که تطابق مطلوبی را بین نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی، پارامترهای سرعت و فشار برای دبی‌های مختلف و همچنین امکان‌پذیری وقوع کاویتاسیون با محاسبه شاخص کاویتاسیون بررسی شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهند در محدوده ورودی سرریز، بدلیل جدایش جریان حاصل از تغییر شیب مماس به سطح هندسه، فشار منفی ایجاد شده و در دبی‌های قبل از استغراق، کاویتاسیون وجود خواهد داشت و در رژیم جریان مستغرق بدلیل کاهش سرعت، امکان وقوع کاویتاسیون وجود ندارد. شفت قائم، در حالت رژیم جریان آزاد، همانند سرریز شوت عمل کرده و بدلیل کمتر بودن اصطکاک، سرعت زیاد بوده و امکان وقوع کاویتاسیون وجود خواهد داشت. ولی در حالت استغراق بدلیل وجود جریان آرام‌تر، کاویتاسیون مشاهده نمی‌گردد. در محدوده زانویی بدلیل انقباض جریان در ابتدا و انتهای زانویی، کاویتاسیون محتمل می‌باشد، اما در بقیه نقاط، شاخص کاویتاسیون از محدوده بحرانی فاصله دارد.

واژه‌های کلیدی: سرریز نیلوفری، مدل‌سازی عددی، پارامترهای هیدرولیکی، کاویتاسیون، Flow3D.

^۱. دانشجوی کارشناسی ارشد هیدرولک، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس تهران، تهران، ایران، saeed.ehsaninoori@gmail.com ۰۹۱۱۲۱۴۴۳۵۶

^۲. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران، ۰۵۱-۴۴۰۱۲۷۷۷، e.behnamtala@hsu.ac.ir (نویسنده مسئول)

^۳. استاد هیدرولیک، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس تهران، تهران، ایران، ۰۲۱-۸۲۸۸۳۳۱۶، salehi@modares.ac.ir

موجب جدایی جریان همراه با کاهش شدید فشار موضعی در پشت ناهمواری‌ها می‌شود. با توجه به سرعت زیاد جریان، فشار در ناحیه جدایی ممکن است به حد فشار بخار آب رسیده و باعث تشکیل حباب‌های ریز بخار آب گردد. وقتی یک رشته از حباب‌های مذکور از ناحیه کم فشار به ناحیه پرفشار در پایین دست رانده می‌شوند ناگهان درهم می‌شکنند و آب اطراف آن برای پر کردن حفره‌های حاصل به سمت آن هجوم می‌آورد. در نقطه از بین رفتن این حباب‌ها، برخورد دسته‌های آبی که با سرعت بسیار به سمت هم حرکت می‌کنند باعث یک انفجار کوچک شده و فشار درون آب در آن نقطه را به شدت بالا می‌برد. اگر فروپاشیدگی یک حباب در نزدیکی سطح بتن اتفاق بیفتد، انفجار نامتقارن بوده و تولید جت می‌کند که با سرعت زیاد به سطح برخورد خواهد کرد. سرعت این جت می‌تواند بیش از ۱۰۰ متر بر ثانیه باشد (Falvey, 1982). ضربه‌های بسیار شدیدی از برخورد این جت‌های کوچک بر سطح بتن وارد می‌شود که در نهایت در اثر تنش موضعی حاصله، سطح بتن دچار گسیختگی شده و خراب می‌شود. پدیده کاویتاسیون در سازه‌های هیدرولیکی می‌تواند تابعی از سرعت جریان، فشار جریان، زمان عملکرد، زبری مرزها، مقاومت مصالح و مقدار هوای مخلوط شده با آب باشد. بطور خلاصه مطابق شکل (۲) کاویتاسیون پدیده‌ای است که از تغییر فاز مایع به بخار در دمای تقریباً ثابت، در اثر کاهش فشار مایع رخ می‌دهد. این پدیده در منطقه‌ای که فشار از فشار بحرانی کمتر است، اتفاق می‌افتد (اغلب فشار بخار را فشار بحرانی می‌گویند) (Falvey, 1982).

مقدمه

یکی از انواع رایج سرریزها برای تخلیه آب اضافی پشت سدها، مخصوصاً در مخازن سدهایی با دبی سرریز کم تا متوسط، سرریزهای نیلوفری می‌باشند. سرریزهای نیلوفری در دره‌های تنگ و باریک و مکان‌هایی که محدودیت مکانی برای ساخت دیگر سرریزها وجود دارد، مورد استفاده قرار می‌گیرند (شکل ۱).



شکل (۱): نمونه‌ای از سرریز نیلوفری

مهمترین مزیت سرریزهای نیلوفری کاهش هزینه‌های ساخت آن با استفاده از تونل انحرافی احداث شده در زمان ساخت سد به عنوان تونل افقی است. این سرریزها دارای سه قسمت اصلی شامل سرریز مدور در مدخل با یک تبدیل به شکل زنگوله وارونه، شفت قائم با یک زانویی ۹۰ درجه که به گلوگاه معروف است و مجرای افقی (در مواقعی با شیب ملایم) می‌باشد.

از آنجایی که سرریز یکی از مهم‌ترین و حساس‌ترین بخش‌های یک سازه سد محسوب می‌شود شناخت مشکلات و خطراتی که با آن مواجه است لازم و ضروری است. یکی از این خطرات که حتی ممکن است پایداری سازه سرریز را به خطر بیندازد رخ دادن پدیده کاویتاسیون است (روحانی، ۱۳۸۵).

سرریز بسیاری از سدهای متوسط و بزرگ دنیا با سرعت‌های جریان بیش از ۱۰ متر بر ثانیه تا ۴۵ متر بر ثانیه سروکار دارند (روحانی، ۱۳۸۵). در سرریز سدها معمولاً ناهمواری‌هایی وجود دارد که ممکن است ناشی از هندسه سازه، پله‌های تیز، درزهای اجرایی، نشست موضعی و یا ضعف اجرای بتن باشد. این ناهمواری‌ها

σ : شاخص کاویتاسیون

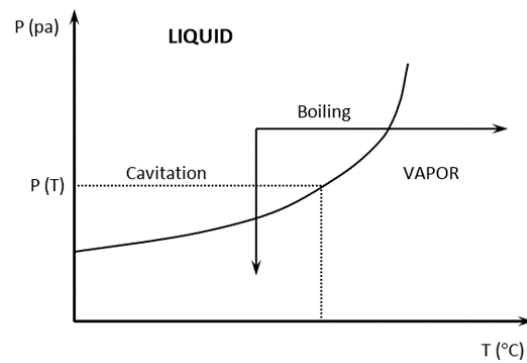
P_0 : فشار در محل موردنظر

P_v : فشار بخار که برابر 0.33 متر ستون آب است.

V_0 : سرعت در محل موردنظر

فالوی در سال ۱۹۸۲ تحقیقی را براساس بررسی خرابی‌های سرریز تونلی چند سد ارائه نمود (Aisenhauer, 1987) که براساس اطلاعات حاصل از این سرریزها، دیاگرامی توسط وی ارائه شده است، که امروزه معیاری برای بررسی، براساس شاخص کاویتاسیون می‌باشد. در این نمودار چنانچه عدد کاویتاسیون بیشتر از 0.2 باشد، خطری از جانب کاویتاسیون سازه را تهدید نمی‌کند و اگر بین 0.1 تا 0.2 باشد، راهکارهای جلوگیری از خطر باید اعمال شود و نصب هواده ضروری می‌باشد و اگر کمتر از 0.1 باشد، سرریز باید مجدداً طراحی گردد.

طباطبایی (۱۳۷۱) پدیده کاویتاسیون، مکانیزم آن و روابط وابسته به این پدیده را در حالات مختلف جریان بررسی کرد. برای مکانیزم کاویتاسیون، یک مدل براساس تعادل استاتیکی نیروهای وارده به یک حباب تشکیل یافته، پیشنهاد شد و تابع فشار وارد به حباب بدست آمد. سپس مقدار کمینه این تابع محاسبه و با استفاده از تعریف ضریب فشار (نسبت کاهش فشار در نقطه فشار کمینه به فشار دینامیکی سیال) و حذف جملات کوچک، در نهایت شاخص کاویتاسیون حاصل شد. سپس یک شاخص کاویتاسیون بحرانی برای سازه محاسبه گردید و بیان شد اگر مقدار شاخص جریان از شاخص بحرانی کمتر باشد، کاویتاسیون رخ خواهد داد. روحانی (۱۳۸۵) در مطالعه‌ای، پدیده کاویتاسیون را بر روی سرریز سد شهید عباسپور با روش عددی شبیه‌سازی کرد. نتایج مدل هیدرولیکی این سد با نتایج حاصل از نرم افزار Flow3D مقایسه گردیده است که نشان می‌دهد مدل عددی حاصل، از دقت مناسبی برای بررسی پدیده کاویتاسیون برخوردار می‌باشد. همچنین تأثیر پارامترهای دبی و زبری بر شکل‌گیری کاویتاسیون در سرریز سد شهید عباسپور مورد مطالعه قرار گرفت. اسدسنگابی و همکاران (۲۰۱۴) به بهینه‌سازی شکل ورودی سرریز نیلوفری با هدف افزایش آبگذری و



شکل (۲): طرح شماتیک رخ دادن کاویتاسیون

برای جلوگیری از خسارت‌های ناشی از کاویتاسیون روش‌های مختلفی وجود دارد. تغییرات هندسی در پروفیل و مقطع مجرای جریان از اقدامات اولیه بوده و در صورتیکه مؤثر واقع نشود می‌توان از طریق راه‌های دیگری از قبیل پرداخت سطح بتن و یا استفاده از ملات‌های رزینی و ... خرابی سطوح بتنی را به مقدار قابل توجهی کاهش داد. البته مؤثرترین روش برای کاهش یا حذف پتانسیل کاویتاسیون، روش هواده‌ی است. بررسی‌ها نشان می‌دهد اگر غلظت هوا در آب حدود 8 درصد یا بیشتر باشد ناهمواری‌های سطح، سبب کاویتاسیون نخواهد شد (روحانی، ۱۳۸۵).

تا مدت‌ها تنها معیار اساسی در خصوص تعیین احتمال وقوع کاویتاسیون، سرعت بحرانی بود. آیزنهاور (۱۹۸۷) سرعت بحرانی را برای شروع وقوع کاویتاسیون بین 20 تا 25 متر بر ثانیه در نظر گرفت. اما از آنجا که این معیار نمی‌توانست تأثیر فشار و همچنین خرابی‌های شدید غیرعادی در پایین‌دست قوس‌های قائم را توجیه کند و از طرف دیگر برای اینکه بتوان حساسیت یک سازه را در برابر حباب‌های ایجاد شده در فشار منفی تشخیص داد، از پارامتری به نام شاخص کاویتاسیون^۱ بهره گرفته شد. شاخص کاویتاسیون که یک پارامتر بدون بعد است و از رابطه برنولی مشتق شده است، بصورت زیر تعریف می‌شود (Aisenhauer, 1987):

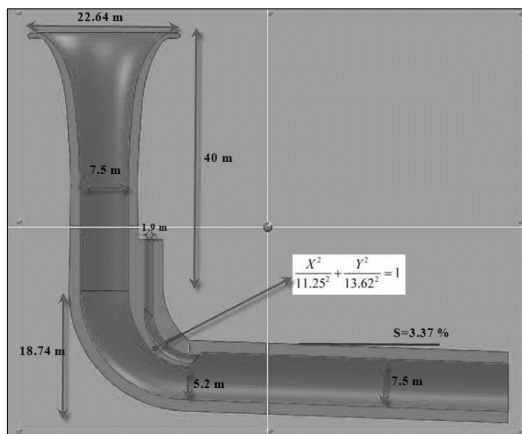
$$\sigma = \frac{P_0 - P_v}{\rho \frac{V_0^2}{2}} \quad (1)$$

که در این رابطه:

¹ Cavitation index

مواد و روش‌ها

تحقیق حاضر بر روی سیستم تخلیه سیلاب سرریز نیلوفری سد البرز واقع بر رودخانه بابلرود در شهرستان سوادکوه در استان مازندران انجام شده است. مشخصات هندسی مدل فیزیکی موردنظر در شکل (۳) ارائه شده است. براساس گزارش مؤسسه تحقیقات آب (۲۰۰۱) در این سرریز، دبی سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰۰ ساله برابر ۲۷۲ مترمکعب بر ثانیه، دبی سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰۰۰ ساله برابر ۶۲۶ مترمکعب بر ثانیه، دبی حداکثر سیلاب محتمل برابر ۱۰۰۴ مترمکعب بر ثانیه و هد آب روی سرریز به ازای دبی حداکثر سیلاب ۴/۷۴ متر می‌باشد.

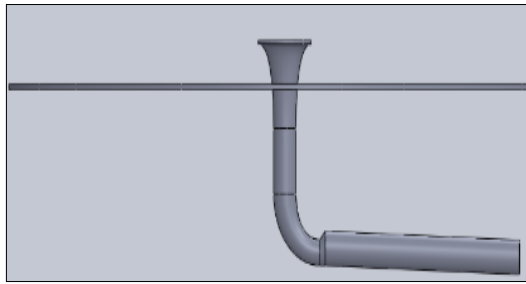


شکل (۳): مشخصات مدل فیزیکی سرریز نیلوفری سد البرز (Enjilzadeh, 2016)

برای مدل‌سازی عددی جریان عبوری از این سرریز از نرم‌افزار Flow3D استفاده شده است. نرم‌افزار Flow3D یک نرم‌افزار بسیار قوی در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی می‌باشد. یکی از قابلیت‌های عمده این نرم‌افزار برای تحلیل‌های هیدرولیکی، توانایی مدل‌سازی جریان‌هایی با سطح آزاد با روش VOF است. Flow3D از یک شبکه متشکل از سلول‌های مستطیلی استفاده می‌کند که دارای مزایایی برای تولید آسان و نظم مناسب برای بهبود بخشیدن به شبیه‌سازی عددی است که به کمترین ذخیره حافظه احتیاج دارد. قوانین حاکم بر جریان یک سیال تراکم‌ناپذیر و لزج توسط یک معادله پیوستگی و سه معادله مومنتم در جهات محورهای سه‌گانه مختصات که به معادلات ناویر-

کاهش امکان‌پذیری کاویتاسیون پرداختند. غفاری (۱۳۹۱) به شبیه‌سازی عددی جریان در سرریز نیلوفری، در دبی‌های مختلف با نرم‌افزار AnsysFluent پرداخت. کاویتاسیون برای چهار دبی مختلف در سرریز نیلوفری مورد بررسی قرار گرفت و میزان آسیب و خطر در نقاط معین شده بر روی بدنه سرریز با کمک منطق فازی بررسی شد. همچنین نقاط بحرانی سرریز نیلوفری مشخص گردید. رضانی (۱۳۹۲) تأثیرات قطر تاج سرریز نیلوفری و عمق تقرب بر روی میدان جریان را بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داد. سپس مدل هیدرولیکی سرریز نیلوفری را در نرم‌افزار Flow3D شبیه‌سازی و پس از صحت‌سنجی، بهترین مدل شبیه‌سازی را ارائه نمود.

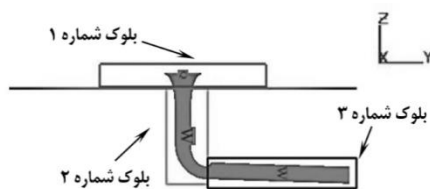
با توجه به مطالعات انجام گرفته، اهمیت موضوع کاویتاسیون در سرریزها، روشن و مشخص است. سرریزهای نیلوفری بدلیل ماهیت آشفته جریان و ویژگی‌های هندسی که دارند یکی از مستعدترین سرریزها برای وقوع پدیده کاویتاسیون محسوب می‌شوند. یکی از بخش‌هایی که دارای حساسیت زیادی در این زمینه می‌باشد، محدوده زانویی سرریز نیلوفری است که با توجه به وجود سرعت بالای جریان، احتمال جداشدگی و افت فشار ناشی از انحناء در آن زیاد می‌باشد (Vischer, 1998). به همین منظور در پژوهش حاضر برای مطالعه کاویتاسیون در سرریز نیلوفری از مدل‌سازی عددی استفاده شده است. نتایج پارامترهای هیدرولیکی این سرریز مانند فشار و سرعت برای دبی‌های مختلف جریان، مورد ارزیابی قرار گرفته و سپس امکان‌پذیری وقوع کاویتاسیون با محاسبه شاخص کاویتاسیون در رژیم‌های جریان آزاد و مستغرق مشخص شده و مناطقی که در سرریزهای نیلوفری، مستعد وقوع کاویتاسیون هستند تعیین شده‌اند. همچنین راهکارهایی برای جلوگیری از وقوع کاویتاسیون در نقاط مستعد پیشنهاد شده است.



شکل (۴): هندسه سه بعدی مدل سرریز نیلوفری البرز

در مدل‌سازی‌های این تحقیق، جریان بصورت تک-فازی و سیال بصورت تراکم‌ناپذیر تعریف شده است. همچنین در نرم‌افزار Flow3D تحت شرایطی که شامل این تحقیق نیز می‌شود، VOF بصورت اتوماتیک لحاظ می‌شود. همچنین در مدل‌های این تحقیق، از شرایط No-Slip (شرایط بدون لغزش) در سطح تماس با دیوار استفاده گردیده است.

حساسیت مدل‌های عددی به شبکه‌بندی و انصال میدان حل و همچنین شرایط مرزی یکی از مسائل مهم در مدل‌های عددی می‌باشد. نرم‌افزار Flow3D نسبت به مرزهای جامد و شبکه بندی، برخورد نسبتاً متفاوتی را نسبت به سایر بسته‌های دینامیک سیالات محاسباتی دارد. از اینرو برای مشخص کردن حدود شبکه‌بندی، بلوک‌هایی مشخص می‌شود که کلیه اندازه‌های سازه موردنظر و فضای آزاد در داخل آن تعریف می‌گردد. برای شبکه‌بندی مدل ساخته شده سرریز نیلوفری از سه بلوک مش‌بندی استفاده شد. بلوک شماره ۱ مربوط به تاج سرریز، بلوک شماره ۲ مربوط به شفت قائم و زانویی و بلوک شماره ۳ نیز مربوط به تونل افقی است. نحوه بلوک‌بندی مدل در شکل (۵) زیر ارائه شده است.



شکل (۵): بلوک‌های مختلف به منظور مش‌بندی سرریز نیلوفری

به منظور تعیین بهترین اندازه سلول در بلوک‌های مختلف مش‌بندی، در چهار مدل مختلف و با اندازه

استوکس معروف هستند بیان می‌شوند. این معادلات در واقع بیانگر پایداری جرم و مومنتم به بیان ریاضی می‌باشند (Flow3D Manual, 2008).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (۲)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u \frac{\partial u_i}{\partial x} + v \frac{\partial u_i}{\partial y} + w \frac{\partial u_i}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial g}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial z^2} \right) \quad (۳)$$

در این روابط ρ چگالی سیال، u ، v و w بترتیب سرعت در جهات اصلی، p فشار، g شتاب ثقل و μ ویسکوزیته دینامیکی است. در نرم‌افزار Flow3D مدل‌سازی جریان آشفته، از شش مدل آشفتگی استفاده شده است که شامل مدل‌های آشفتگی طول اختلاط پراتل، یک معادله‌ای، دو معادله‌ای $k-\omega$ ، دو معادله‌ای $k-\epsilon$ ، دو معادله‌ای RNG و شبیه‌سازی‌گر دانه‌های بزرگ^۱ هستند. در بین این مدل‌ها، مدل آشفتگی RNG که براساس یک روش آماری بدست می‌آید نسبت به حالت استاندارد، در جریان‌های چرخشی کارایی بیشتری دارد. به همین دلیل از این مدل در مدل‌سازی جریان در میدان‌های دارای انحناء و یا پیچیدگی هندسی بیشتر استفاده می‌شود. بطورکلی مدل RNG کاربرد وسیع تری نسبت به دیگر مدل‌های دو معادله‌ای استاندارد دارد (Flow3D Manual, 2008). با توجه به مطالب گفته شده در مطالعه حاضر برای مدل‌سازی جریان آشفته از مدل آشفتگی RNG استفاده شده است.

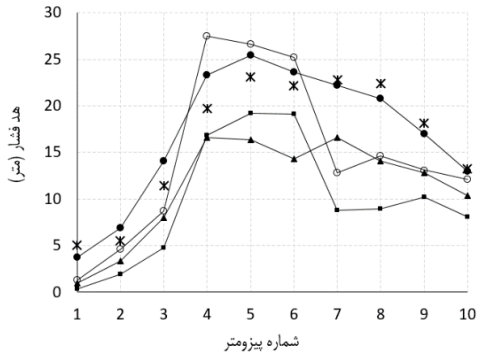
در تحقیق حاضر برای ساخت هندسه مدل برای بررسی هیدرولیکی در نرم‌افزار Flow3D، بدنه صلب سرریز بصورت سه بعدی، مطابق شکل (۴) در نرم‌افزار SolidWorks ساخته شد که شامل بخشی از مخزن، تاج، شفت قائم، زانویی، تبدیل و بخشی از تونل افقی می‌باشد. سپس با فرمت stl به نرم‌افزار Flow3D منتقل گردید.

^۱ - Large Eddy Simulation

۱، ۰/۶۶ متر، در بلوک شماره ۲، ۰/۴۲ متر و در بلوک شماره ۳، ۰/۶۷ متر است. بدلیل حساسیت و اهمیت بیشتر زانویی، سلول‌های ریزتری برای بلوک ۲ در نظر گرفته شد.

سلول مختلف که در جدول (۱) ارائه شده‌اند، نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید.

جدول (۱): حساسیت سنجی مدل نسبت به اندازه سلول



بلوک شماره ۱	بلوک شماره ۲	بلوک شماره ۳	مدل شماره ۱
۲۵۰۰۰۰	۲۰۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰	مدل شماره ۱
۳۵۰۰۰۰	۳۰۰۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	مدل شماره ۲
۵۵۰۰۰۰	۳۷۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	مدل شماره ۳
۶۲۵۰۰۰	۴۷۵۰۰۰	۲۰۰۰۰۰	مدل شماره ۴

شکل (۶): فشارهای برداشت شده در نقاط مختلف در دبی ورودی ۶۰۰ مترمکعب بر ثانیه برای اندازه‌های مختلف سلول

در مختصات کارتزین برای تعریف شرایط مرزی، شش وجه مشخص وجود دارد که با توجه به جهت مثبت محورها شامل X_{min} , X_{max} , Y_{min} , Y_{max} و Z_{max} است. لازم به ذکر است که کلیه این مشخصات در هر بلوک بطور جداگانه تعریف می‌شود. برای انجام محاسبات میدان جریان در هر یک از این بلوک‌ها، بعد از تحلیل حساسیت، مناسب‌ترین شرایط مرزی مطابق جدول (۲) استفاده شده است.

نتایج برداشت فشار در ۱۰ پیزومتر مختلف در بستر زانویی نشان داد که نتایج مدل عددی شماره ۴ به نتایج مدل فیزیکی نزدیک‌تر است. مقایسه نتایج ۴ مدل عددی با نتایج مدل فیزیکی در ۱۰ پیزومتر مختلف (تعریف شده در شکل (۷)) در کف زانویی در شکل (۶) نشان داده شده است. بنابراین در ادامه مدل‌سازی‌ها از مشخصات مش‌بندی مدل شماره ۴ استفاده شد. در این مدل در مجموع سه بلوک، نزدیک به ۱/۳۰۰/۰۰۰ سلول در نظر گرفته شد. اندازه سلول در بلوک شماره

جدول (۲): شرایط مرزی در هر بلوک مش‌بندی

	بلوک شماره ۳	بلوک شماره ۲	بلوک شماره ۱
X_{min}	دیوار	دیوار ^۲	ورودی دبی ^۱
X_{max}	دیوار	دیوار	ورودی دبی
Y_{min}	متقارن	دیوار	ورودی دبی
Y_{max}	خروجی ^۳	متقارن	ورودی دبی
Z_{min}	دیوار	دیوار	متقارن ^۴
Z_{max}	دیوار	متقارن	فشار ثابت ^۵

¹Volume Flow Rate

²Wall

³Outflow

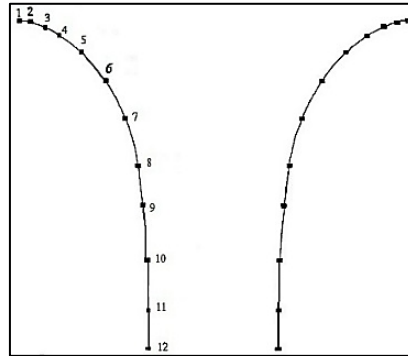
⁴Symmetry

⁵Specified Pressure

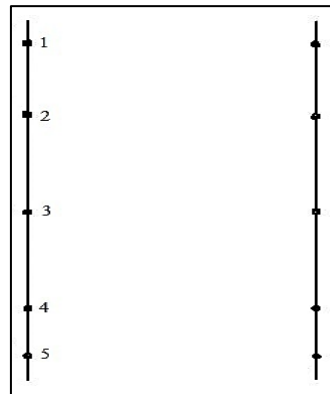
معتبرسازی نتایج مدل عددی

در مدل سازی فیزیکی سرریز نیلوفری سد البرز که توسط مؤسسه تحقیقات آب انجام گرفته است به ازای چهار دبی ورودی ۲۵۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۹۵۰ متر مکعب - بر ثانیه، نتایج پارامتر فشار با استفاده از پیژومترهای

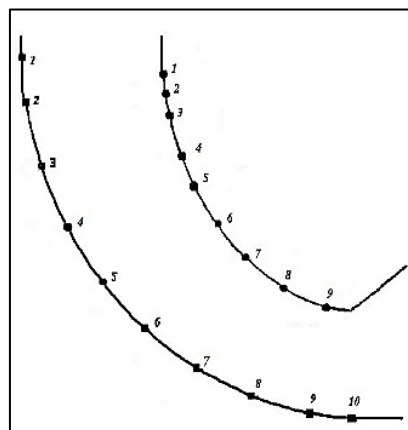
مختلف در تاج سرریز، شفت قائم و زانویی برداشت شده است. در نتایج مدل عددی مشاهده گردید در دبی ۹۵۰ مترمکعب بر ثانیه، رژیم جریان در سرریز بصورت مستغرق است. موقعیت پیژومترهای موردنظر در بخش های مختلف در شکل (۷) ارائه شده است.



الف) تاج سرریز



ب) شفت قائم



ج) زانویی

شکل (۷): مکان پیژومترهای برداشت فشار در قسمت های مختلف مدل فیزیکی سرریز نیلوفری سد البرز

با نتایج آزمایشگاهی صحت سنجی شد. نتایج در جداول (۳) تا (۶) ارائه شده است.

حال برای معتبرسازی نتایج مدل عددی با نرم افزار Flow3D برای چهار دبی ذکر شده، نتایج مدل عددی

جدول (۳): صحت سنجی مقادیر هد فشار بر حسب متر بر روی تاج

پیرومتر شماره	۲۵۰ مترمکعب بر ثانیه		۶۰۰ مترمکعب بر ثانیه		۸۰۰ مترمکعب بر ثانیه		۹۵۰ مترمکعب بر ثانیه	
	آزمایشگاه	عددی	آزمایشگاه	عددی	آزمایشگاه	عددی	آزمایشگاه	عددی
۱	۰/۶۲	۰/۷۵	۰/۴۰	۰/۴۲	۰/۴۹	۰/۴۴	۰/۱۹	۰/۱۲
۲	۰/۶	۰/۷۱	۰/۳۴	۰/۳۹	۰/۰۴	۰/۲۹	-۰/۱۷	۰/۳۹
۳	۰/۲۶	۰/۴۴	۰/۲۶	۰/۳۲	۰/۰۴	۰/۲۷	۰/۳۷	۰/۳۸
۴	۰/۲۹	۰/۳۴	۰/۲۹	۰/۳۳	۰/۲۰	۰/۴۰	۰/۸۴	۰/۷۶
۵	۰/۱۹	۰/۱۳	۰/۲۲	۰/۱۵	۰/۱۱	۰/۱۳	۱/۴۳	۱/۲۲
۶	۰/۱۲	۰/۰۷	-۰/۰۳	-۰/۳۱	-۰/۱۲	-۰/۱۰	۲/۴۵	۲/۳۱
۷	-۰/۰۴	-۰/۰۱	-۰/۳۴	-۰/۵۱	-۰/۶۰	-۰/۶۵	۳/۴۳	۳/۶۷
۸	۰/۰۲	۰/۰۸	-۰/۳۷	-۰/۲۳	-۰/۶۷	-۰/۷۵	۲/۸۹	۳/۰۶
۹	-۰/۱۵	-۰/۲۷	-۰/۲۸	-۰/۳۹	۰/۹۶	۰/۷۲	۰/۳۶	۰/۴۸
۱۰	-۰/۰۶	-۰/۱۱	-۰/۳۲	-۰/۲۷	۲/۱۳	۰/۱۲	-۱/۴۳	-۱/۶۶
۱۱	-۰/۰۶	-۰/۰۱	-۰/۱۵	-۰/۱۱	۰/۷۱	۰/۴۳	-۲/۲۹	-۱/۸۹
۱۲	۰/۲۴	۰/۱۷	-۰/۱	-۰/۱۳	-۰/۰۱	-۰/۰۵	-۲/۱۶	-۱/۷۹

جدول (۴): صحت سنجی مقادیر فشار در شفت قائم

پیرومتر شماره	۲۵۰ مترمکعب بر ثانیه		۶۰۰ مترمکعب بر ثانیه		۸۰۰ مترمکعب بر ثانیه		۹۵۰ مترمکعب بر ثانیه	
	آزمایشگاه	عددی	آزمایشگاه	عددی	پیرومتر شماره	آزمایشگاه	عددی	آزمایشگاه
۱	۰/۲۰	۰/۱۱	۰/۲۰	۰/۳۲	۰/۸۰	۰/۵۷	۰/۴۱	۰/۲۷
۲	۰/۴۳	۰/۲۶	۰/۵۲	۰/۳۹	۰/۶۹	۰/۴۱	۴/۲۰	۳/۱۰
۳	۰/۳۴	۰/۳۷	۰/۶۰	۰/۴۲	۰/۳۴	۰/۱۲	۸/۰۶	۷/۱۲
۴	-۰/۳۰	-۰/۴۰	-۰/۳۰	-۰/۴۱	۰/۰۰	-۰/۳۶	۱۱/۷۹	۱۱/۳
۵	-۰/۷۳	-۰/۸۴	-۰/۰۴	-۰/۱۰	-۰/۷۳	-۰/۸۵	۱۵/۰۴	۱۲/۹۲

جدول (۵): صحت سنجی مقادیر فشار در کف زانویی

پیرومتر شماره	۲۵۰ مترمکعب بر ثانیه		۶۰۰ مترمکعب بر ثانیه		۸۰۰ مترمکعب بر ثانیه		۹۵۰ مترمکعب بر ثانیه	
	عددی	آزمایشگاه	عددی	آزمایشگاه	عددی	آزمایشگاه	عددی	آزمایشگاه
۱	۱/۸۳	۱/۵	۵/۰۴	۳/۷۳	۲/۰۴	۲/۱	۲۳/۷۶	۲۰/۴۷
۲	۲/۰۹	۱/۸۳	۵/۵۲	۶/۸۹	۳/۱۶	۳/۶۷	۲۶/۸۹	۲۴/۲
۳	۳/۵۳	۲/۸۱	۱۱/۲۴	۱۴/۰۶	۱۴/۲۴	۱۶/۸	۳۰/۶۴	۳۳/۶
۴	۱۳/۵۶	۱۵/۳۹	۱۹/۷۷	۲۳/۳۵	۲۶/۴۲	۲۵/۷	۳۳/۳۴	۳۶
۵	۱۵/۱۷	۱۶/۸۲	۲۳/۱	۲۵/۴۷	۲۸/۸۸	۲۹/۳	۳۳/۵۴	۳۶/۷۵
۶	۱۳/۸۳	۱۴/۵۸	۲۲/۱۹	۲۳/۶	۳۰/۷۶	۳۳/۲۱	۳۴/۴۱	۳۵/۶
۷	۹/۹۳	۸/۸۵	۲۲/۷۹	۲۲/۲۳	۲۸/۷۹	۲۶/۷۸	۳۳/۵	۳۱/۲
۸	۹/۳۸	۸/۴۱	۲۲/۴۵	۲۰/۸۲	۲۶/۹۵	۲۴/۴	۳۰/۵۹	۲۷
۹	۹/۳۷	۹/۰۸	۱۸/۱۶	۱۷	۲۳/۷۳	۲۲/۴	۲۶/۹۴	۲۴/۲
۱۰	۶/۶۲	۵/۸۵	۱۳/۲۷	۱۳	۱۸/۴۱	۲۰/۸	۲۱/۰۷	۱۹/۴

جدول (۶): صحت سنجی مقادیر فشار در سقف زانویی

پیزومتر شماره	۲۵۰ مترمکعب بر ثانیه		۹۵۰ مترمکعب بر ثانیه		۸۰۰ مترمکعب بر ثانیه		۶۰۰ مترمکعب بر ثانیه	
	عددی	آزمایشگاه	عددی	آزمایشگاه	عددی	آزمایشگاه	عددی	آزمایشگاه
۱	----	----	----	----	----	----	۹/۲۸	۸/۸۱
۲	----	----	----	----	----	----	۹/۴۳	۸/۹۵
۳	----	----	----	----	----	----	۹/۱۴	۹/۳۲
۴	----	----	----	----	----	----	۸/۵۳	۹/۵۱
۵	----	----	----	----	----	----	۶/۵۸	۱۰/۸
۶	----	----	----	----	----	----	۴/۸۵	۹/۷۵
۷	----	----	----	----	----	----	----	۹/۱۱
۸	----	----	----	----	----	----	----	۸/۹۰
۹	----	----	----	----	----	----	----	۸/۴۳

Ca : مقدار حاصل از مدل فیزیکی

n : تعداد داده‌ها

در جدول (۷) نتایج پارامتر MAER برای دبی‌های مختلف و پیزومترهای کف زانویی ارائه شده است. نتایج میزان خطا در این جدول نشان می‌دهد که در پیزومترهای میانی، تطابق نتایج مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی بیشتر بوده و بدلیل وجود نیروی گریز از مرکز، آب با ضربه دینامیکی بیشتری با نقاط میانی در تماس است که سبب بوجود آمدن فشار بیشتری در این ناحیه از زانویی می‌گردد.

مطابق جداول فوق در اکثر نقاط بعد از پیزومتر شماره ۵ در ورودی سرریز و شفت قائم، بدلیل جدایش حاصل از تغییر شیب مماس به سطح هندسه سرریز، فشار منفی ایجاد شده است. بعد از مستغرق شدن جریان در دبی ۹۵۰ مترمکعب بر ثانیه، هد فشار برای نقاط روی تاج و شفت قائم بیشتر می‌شود. بطور کلی، در دبی‌های قبل از دبی استغراق، هد فشار کم و به هم نزدیک است ولی بعد از رژیم جریان مستغرق، افزایش چشم‌گیری در هد فشار اتفاق می‌افتد و مقادیر آن در تاج و شفت از بقیه قسمت‌ها بیشتر است. در سقف زانویی نیز فقط در دبی ۹۵۰ مترمکعب بر ثانیه، جریان آب وجود دارد و دارای هد فشار بالایی است. بطور کلی در زانویی با افزایش میزان دبی، هد فشار افزایش می‌یابد. در تحقیق حاضر برای تخمین درصد خطا و میزان خطای متوسط در دبی‌های مختلف از پارامتر MAER که بصورت رابطه (۴) تعریف می‌شود، استفاده شده است. مزیت پارامتر MAER این است که بدون در نظر گرفتن واحدها و کمیت‌های اندازه‌گیری، نسبت بین داده‌های واقعی و محاسباتی را بیان می‌کند.

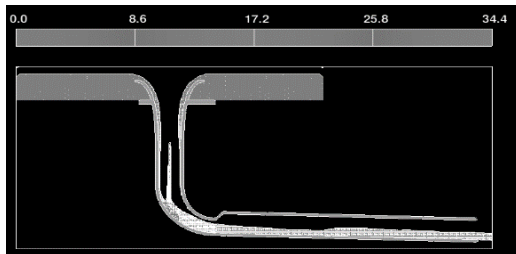
$$MAER = \frac{|Ce - Ca|}{Ce} \times 100 \quad (4)$$

که در آن:

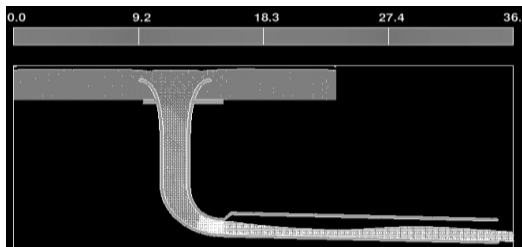
Ce : مقدار حاصل از مدل عددی

نتایج و بحث

براساس رابطه (۱)، یکی از پارامترهایی که تأثیر مستقیم بر شاخص کویتاسیون دارد سرعت است. به همین منظور در این بخش ابتدا مشخصات جریان در دبی ورودی ۶۰۰ متر مکعب بر ثانیه که حالت آزاد جریان وجود دارد بررسی شده و سپس دبی ورودی ۹۵۰ متر مکعب بر ثانیه که سرریز مستغرق می‌باشد بررسی خواهد شد. شکل (۸) منحنی‌های هم‌تراز دو بعدی سرعت برداشت شده از نرم افزار Flow3D را نشان می‌دهد.



الف) رژیم جریان آزاد (دبی ورودی ۶۰۰ مترمکعب بر ثانیه)



ب) رژیم جریان مستغرق (دبی ورودی ۹۵۰ مترمکعب بر ثانیه)

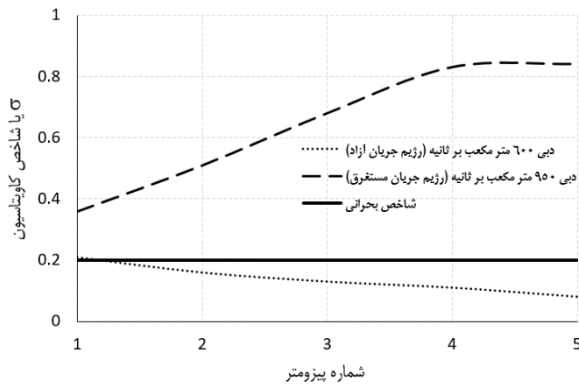
شکل (۸): سطوح هم‌تراز سرعت در شرایط رژیم جریان آزاد و مستغرق

در تاج سرریز، به علت تغییر شیب مماس بر سطح هندسه جام ورودی، گرادیان سرعت حالت افزایشی و در شفت قائم نیز به علت کاهش قطر، روند افزایشی سرعت ادامه خواهد داشت. بطورکلی، بخشی از جام ورودی و شفت قائم عملکردی همانند سرریز شوت را خواهند داشت، بطوریکه با افزایش دبی تا دبی‌های ماقبل مستغرق شدن، افزایش سرعت در جام ورودی و شفت قائم وجود دارد زیرا جام ورودی و شفت قائم در حالت جریان آزاد قرار دارند و جریان با سرعت زیادی

جدول (۷): برآورد میزان خطا با استفاده از پارامتر MAER در پیژومترهای کف زانویی

پیژومه تر شماره	۲۵۰ مترمکعب بر ثانیه	۶۰۰ مترمکعب بر ثانیه	۸۰۰ مترمکعب بر ثانیه	۹۵۰ مترمکعب بر ثانیه
۱	٪۲۲	٪۳۵	٪۳	٪۱۶
۲	٪۱۴	٪۱۹	٪۱۳	٪۱۱
۳	٪۲۵	٪۲۰	٪۱۵	٪۹
۴	٪۱۱	٪۱۵	٪۳	٪۷
۵	٪۹	٪۹	٪۱	٪۸
۶	٪۷	٪۶	٪۷	٪۳
۷	٪۱۲	٪۲	٪۷	٪۷
۸	٪۱۱	٪۷	٪۱۰	٪۱۳
۹	٪۳	٪۶	٪۶	٪۱۱
۱۰	٪۱۳	٪۲	٪۱۱	٪۸
مقدار متوسط پارامتر MAER	۱۲/۷ %	۱۲/۱ %	٪۸/۲	٪۹/۳

همچنین میزان خطای متوسط در دبی‌های مختلف نشان می‌دهد با افزایش دبی ورودی به سرریز، متوسط خطا کاهش می‌یابد که می‌تواند بدلیل پرشدن مقطع زانویی باشد. هد فشار در طول زانویی، ابتدا حالت افزایشی دارد و سپس در نقاط انتهایی حالت کاهش می‌یابد. این موضوع ممکن است به این علت باشد که در نقاط میانی کف زانویی (کاسه زانویی)، جریان با ضربات دینامیکی بزرگتری به کف زانویی برخورد می‌کند. با افزایش میزان دبی، هد فشار، بدلیل ضربه‌های دینامیکی بزرگتری که بوجود می‌آید بیشتر شده و در دبی‌های بعد از استغراق زانویی بیشتر نمایان می‌گردد، زیرا بعد از مستغرق شدن رژیم جریان، آب با سرعت کمتری بدلیل پر بودن مقطع، جریان می‌یابد و در نتیجه فشار بیشتر می‌گردد.

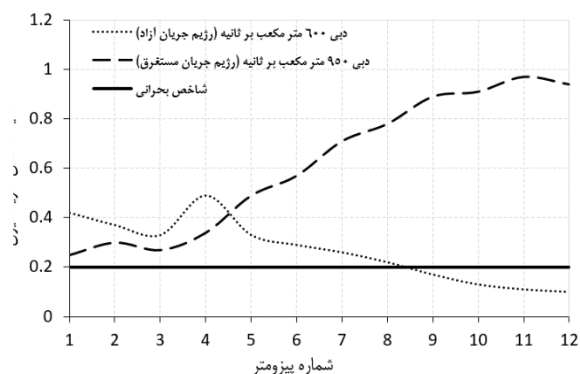


شکل (۱۰): نتایج شاخص کاویتاسیون در پیزومترهای شفت قائم

برای دبی ورودی ۶۰۰ متر مکعب بر ثانیه، در تاج سرریز و همچنین در شفت قائم، رژیم جریان آزاد حاکم بوده و همین نکته سبب می‌شود اصطکاک چندانی در جداره سرریز بوجود نیاید. لذا آب با سرعت بالایی در این دو بخش از سرریز نیلوفری جریان می‌یابد که باعث افت شدید شاخص کاویتاسیون در این مناطق شده و شرایط بحرانی را در اکثر این نقاط بوجود می‌آورد. در تاج سرریز برای نقاط ۸ الی ۱۲، بدلیل سرعت بالای ناشی از هندسه کاهشی مقطع در حالت رژیم جریان آزاد، احتمال وقوع کاویتاسیون وجود دارد. در شفت قائم و در همین حالت از جریان، در اکثر نقاط، کاویتاسیون سازه را تهدید می‌کند. در نتیجه در طراحی سرریزهای نیلوفری، هوادهی مجرای قائم که در آن جریان با سطح آزاد وجود دارد بسیار مهم تشخیص داده می‌شود. این کار جریان نسبتاً همواری را با توزیع فشار اتمسفر ایجاد می‌کند و از ایجاد ارتعاش، کاویتاسیون و بازگشت هوا جلوگیری می‌نماید. بنابراین طراحی مجرای هواده اهمیت زیادی دارد و پیشنهاد می‌گردد کاهش در سطح مقطع نیز به آرامی و با نرخ کمتری صورت پذیرد. در دبی ۹۵۰ متر مکعب بر ثانیه که مقطع پر می‌باشد در شفت قائم و جام سرریز، اصطکاک زیادی بوجود آمده که سبب ایجاد جریان با سرعت کم و هد فشار بالا شده و در نتیجه شاخص کاویتاسیون به بالاتر از ۰/۲ افزایش و در منطقه ایمن قرار می‌گیرد.

به حرکت در می‌آید. هر اندازه دبی افزایش می‌یابد (بخصوص در دبی ۹۵۰ متر مکعب بر ثانیه که سرریز مستغرق شده است) اصطکاک جداره بیشتر می‌شود و جریان، آرام‌تر و با سرعت کمتری به حرکت خود ادامه می‌دهد. در زانویی نیز بدلیل هندسه انقباضی سرریز نیلوفری، سرعت بیشتر می‌گردد. بیشترین سرعت‌ها در مجموع، برای کف زانویی می‌باشد. همچنین میزان سرعت در خروجی زانویی بدلیل انقباضی که در هندسه مقطع وجود دارد (شعاع ابتدای زانویی از ۷/۵ متر به ۵/۲ متر در انتهای زانویی تغییر می‌کند) نسبت به بقیه نقاط زانویی بیشتر می‌باشد. در هر دبی، با نزدیک شدن به سمت انتهای زانویی (از پیزومتر شماره ۷ تا پیزومتر شماره ۱۰) سرعت حالت افزایش خواهد داشت که می‌تواند به سبب تأثیر هندسه انقباضی مقطع باشد. در نقاط ابتدایی کف زانویی بدلیل تغییر هندسه از شفت قائم به محیط انحنادار، نیز سرعت افزایش می‌یابد. بصورت یک نتیجه کلی، سرعت در زانویی از بقیه قسمت‌های سرریز نیلوفری به علت کاهش سطح باید براساس رابطه دبی بیشتر باشد که به همین گونه نیز شده است.

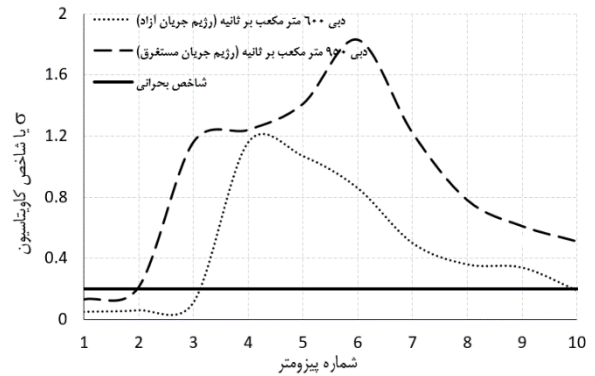
به کمک رابطه ۱، مقدار شاخص کاویتاسیون برای دبی‌های ۶۰۰ متر مکعب بر ثانیه (حالت جریان آزاد) و ۹۵۰ متر مکعب بر ثانیه (حالت جریان مستغرق) براساس اطلاعات مقادیر فشار و سرعت، برای قسمت‌های مختلف سرریز نیلوفری بصورت جداگانه در نقاط مشخص، محاسبه شده است. در شکل‌های ۹ تا ۱۲ نتایج شاخص کاویتاسیون برای دبی‌های موردنظر در نقاط معین ارائه شده است.



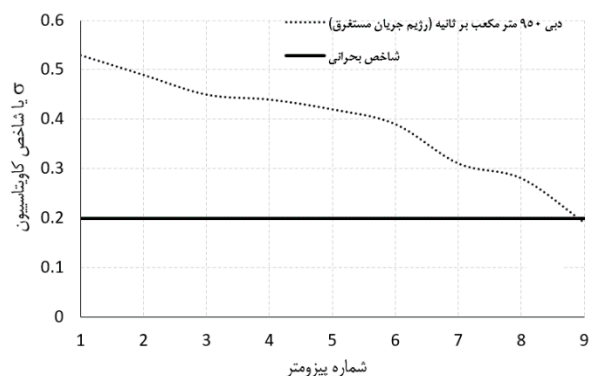
شکل (۹): نتایج شاخص کاویتاسیون در پیزومترهای تاج سرریز نیلوفری

نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، پارامترهای مهم هیدرولیکی تأثیرگذار بر کاویتاسیون از قبیل فشار و سرعت حاصل از مدل سازی عددی در دبی های مختلف مربوط به رژیم های جریان متفاوت با کمک نرم افزار Flow3D محاسبه شدند. برای شناسایی نقاط محتمل کاویتاسیون از شاخص کاویتاسیون استفاده شد. برای صحت سنجی نتایج مدل عددی، نتایج فشار حاصل از مدل سازی عددی با نتایج مدل فیزیکی سرریز نیلوفری البرز مقایسه گردید که نتایج، تطابق مطلوبی را بین مدل عددی و آزمایشگاهی نشان داد. در بیشتر پیرومترهای تاج سرریز و شفت قائم در رژیم جریان آزاد به علت تغییر شیب مماس به سطح هندسه سرریز، فشار منفی مشاهده گردید، درحالی که بعد از مستغرق شدن، هد فشار افزایش یافت. در زانویی نیز بطور کلی بدلیل انحناء و انقباض مقطع، اصطکاک بیشتر بوده و ارتفاع معادل فشار بخصوص در کف زانویی در دبی های مستغرق بطور چشم گیری بیشتر از بقیه قسمت های سرریز نیلوفری می باشد. در ابتدای جام سرریز، شاخص کاویتاسیون در منطقه ایمن قرار دارد، اما در قسمت بعد از انحنای جام ورودی و شفت قائم، تغییر درگردان سرعت بسیار زیاد بوده و سرعت، افزایش زیادی خواهد داشت. افزایش سرعت در دبی های مربوط به حالت آزاد و قبل از پرشدن مقطع، بیشتر بوده و احتمال رخ دادن کاویتاسیون بیشتر می گردد، درحالی که در دبی های مربوط به حالت مستغرق، جریان، فضای حرکتی کمی دارد و آرام تر حرکت می کند. این موضوع باعث افزایش اصطکاک شده و شاخص کاویتاسیون را در منطقه ایمن قرار می دهد. در زانویی سرریز نیلوفری، بدلیل وجود هد فشار بالا، با وجود سرعت بالا، در مجموع به جز در ابتدا و انتهای زانویی که تغییر در مقطع وجود دارد، با توجه به رابطه شاخص کاویتاسیون، پدیده کاویتاسیون تهدید چندانی را برای زانویی سرریز نیلوفری حاضر ایجاد نخواهد کرد. در مجموع، در سرریز نیلوفری حاضر، در محل اتصال جام ورودی با شفت قائم، در محل شفت قائم و نیز در ابتدا و انتهای زانویی بدلیل بوجود آمدن سرعت زیاد ناشی از



شکل (۱۱): نتایج شاخص کاویتاسیون در پیرومترهای کف زانویی



شکل (۱۲): نتایج شاخص کاویتاسیون در پیرومترهای سقف زانویی

در زانویی سرریز نیلوفری، بجز در ابتدا و انتهای زانویی که تغییرات هندسی وجود دارد و شاخص کاویتاسیون در منطقه بحرانی قرار گرفته است، در بقیه نقاط زانویی، بدلیل وجود هد فشار بالا، با وجود سرعت بالا، با توجه به رابطه (۱)، شاخص کاویتاسیون از مقدار بحرانی فاصله داشته و پدیده کاویتاسیون تهدید چندانی را برای سرریز ایجاد نمی کند. در این شرایط محافظت از سطح سرریز با تدابیر خاصی نظیر ساب زدن بتن پیشنهاد می گردد. بصورت یک نتیجه کلی می توان بیان داشت در سرریزهای نیلوفری در محل اتصال جام ورودی با شفت قائم و در محل زانویی (گلوگاه)، به علت تغییر در سطح مقطع و تغییر شکل بستر سرریز، بیشترین خطر ناشی از پدیده کاویتاسیون وجود دارد که دلیل اصلی آن جداسدگی سطح جریان از بستر سرریز و سرعت بالای جریان در این نواحی می باشد.

انتخاب شود که انقباضی در مقطع بوجود نیاید تا سبب جدایش جریان نگردد. همچنین پیشنهاد می‌شود از هواده در شفت قائم استفاده گردد تا سبب ایمنی شفت قائم و زانویی بصورت همزمان شود.

تغییرات سطح مقطع، بخصوص در رژیم جریان آزاد، خطر کاویتاسیون وجود خواهد داشت. همچنین با توجه به پژوهش حاضر، پیشنهاد می‌گردد در سرریزهای نیلوفری، جام سرریز با نرخ انحنای کمتری به شفت قائم وصل گردد و در زانویی نیز شعاع به گونه‌ای

منابع

- روحانی م، "شبیه‌سازی عددی شکل‌گیری کاویتاسیون در سرریز شوت"؛ پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران، مهندسی آب، ۱۳۸۵، دانشگاه تربیت مدرس
- طباطبایی ج، "کاویتاسیون در سازه‌های هیدرولیکی و راه‌های مقابله با آن"؛ پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران، مهندسی سازه‌های هیدرولیکی، ۱۳۷۱، دانشگاه صنعتی شریف
- غفاری م، "بررسی کاویتاسیون در سرریزهای نیلوفری با استفاده از منطق فازی و مدل های CFD"؛ پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران، مهندسی آب، ۱۳۹۱، دانشگاه سیستان و بلوچستان
- گزارش مدل هیدرولیکی سیستم تخلیه سیلاب سد مخزنی البرز"، موسسه تحقیقات آب ایران، ۱۳۸۰-۵- رمضان س، کاویانپور م.ر، (۱۳۹۲)، "بررسی عددی و آزمایشگاهی میدان جریان در سرریزهای نیلوفری"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
- Eisenhauer, N., 1987. Location of Aerators in Spillways. *Concrete International*, 9(3), pp.62-66.
- Asadsangabi, F., Talebbeydokhti, N. and Rahnavard, M., 2014. Two phase flow modeling in shaft-spillways using volume of fluid (VOF) method. *Iranian Journal of Science and Technology. Transactions of Civil Engineering*, 38(C1), p.99.
- Enjilzadeh, M.R. and Nohani, E., 2016. Numerical Modeling of Flow Field in Morning Glory Spillways and Determining Rating Curve at Different Flow Rates. *Civil Engineering Journal*, 2(9), pp.448-457.
- Falvey, H.T., 1982. Predicting cavitation in tunnel spillways. *WATER POWER & DAM CONSTRUCT.*, 34(8), pp.13-15.
- Flow3D. User Manual. 2008.
- Vischer, D., Hager, W.H. and Cischer, D., 1998. *Dam hydraulics* (No. 978-0, pp. 471-97289). Chichester, UK: Wiley.

Numerical investigation of the formation of cavitation in the morning glory spillway

Majid Ehsani¹, Ehsan Behnamtalab², Seyed Aliakbar Salehi Neyshabouri³

Abstract

Morning glory spillway is one of the most susceptible cases for the occurrence of the cavitation phenomena. At the entrance of the spillway, the junction of the funnel entrance, the vertical shaft and within the elbow, cavitation is expected. In the present study, the flow characteristics included the inlet and outlet discharge and the velocity and pressure in the elbow walls were calculated for Alborz dam spillway by using of Flow3D software and the results were compared with the experimental data. The comparison of the numerical results and the experimental data showed the good agreement between them. Also, the occurrence probability of the cavitation in various parts of the morning glory spillway was investigated using of the cavitation index. The results showed that the negative pressure occurs at the entrance of the spillway due to the flow separation. The cavitation was observed just at discharges less than submerged discharge and there was not occurrence probability of the cavitation in the submerged flow regime. In addition, the vertical shaft will act such as chute spillway in the case of the free surface regime and because of the less friction and the high velocity, there was the occurrence probability of the cavitation. In the case of the submerged flow regime, duo to the low velocity, cavitation was not observed. Finally, there was the occurrence probability of cavitation at the beginning and the end of the elbow, but in the other points of the spillway, cavitation index was more than the critical cavitation index.

Keywords: Morning Glory Spillway, Physical Model, Numerical Model, Hydraulic Parameter, Cavitation.

¹ PhD candidate of hydraulic structure, civil engineering department, Isfahan University of Technology, saeed.ehsaninoori@gmail.com

² Assistant professor of hydraulic, department of engineering, Hakim Sabzevari University, e.behnamtalab@hsu.ac.ir

³ Professor of hydraulic, department of civil engineering, Tarbiat Modares University, salehi@modares.ac.ir