

خطر کاویتاسیون در دریچه‌های تحتانی سدها با استفاده از حل عددی نرم‌افزار انسیس

علی کسری، امیر خسرو جردی* و حسین بابازاده^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۴/۲)

چکیده

پژوهش حاضر با هدف محاسبه عدد کاویتاسیون دریچه تحتانی در آبگیر تحتانی سد نسا، به صورت مدل آزمایشگاهی و عددی طرح‌ریزی شده است. مقادیر فشار استاتیک در طول مدل دریچه تحتانی، توسط ۲۲ پیژومتر تعبیه شده، اندازه‌گیری شد. برای مشخص کردن نقاط و مناطق با ریسک بالای کاویتاسیون، مقطع طولی دریچه تحتانی به سه بلوک تقسیم‌بندی شد. این تقسیم‌بندی براساس تأثیر پارامترهای هیدرولیکی مؤثر بر پدیده کاویتاسیون معرفی می‌شود. در بلوک شماره یک، نتایج محاسبه عدد کاویتاسیون نشان داد، این منطقه که در ابتدای جت خروجی سد را در بر می‌گیرد، سطح خطر، "امکان کاویتاسیون" را نشان می‌دهد. بررسی‌ها نشان داد، عدد کاویتاسیون در این منطقه وابسته به ارتفاع آب در کانال بالادست است. برای منطقه شماره دو، نتایج نشان داد، به‌ازای نسبت موقعیت در نظر گرفته شده به کل طول دریچه تحتانی و در محدود ۰/۴۴ و ۰/۹ مقادیر کاویتاسیون، پارامتری از سرعت خروجی جت در دریچه تحتانی هستند. لازم به ذکر است، بررسی سطح خطر در مناطق دوم و سوم به ازای $x/L = 0/44$ ، سطح خطر وابسته به فشار منفی در این مناطق است. همچنین مدل‌سازی عددی به ازای روش‌های مختلف مدل آشفتگی نشان داد که مدل آشفتگی K-ε RNG با مش ریز بهترین همخوانی را با نتایج مدل آزمایشگاهی دارد و مقادیر خطای آن به‌ازای مدل آزمایشگاهی و عددی محاسبه شد.

واژه‌های کلیدی: کاویتاسیون، فشار استاتیک، دبی، دریچه تحتانی، سرعت

۱. گروه مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: khosrojerdi@srbiau.ac.ir

مقدمه

داشتند که به کارگیری شیر هواده‌ی، می‌تواند تا حد زیادی فشار منفی در منطقه مورد نظر به سمت فشار مثبت تغییر وضعیت دهد. همچنین، در مطالعه ویسچر و هگر (۱۹) به بررسی پارامتر نیاز هواده‌ی پرداخته شد. این پارامتر به‌عنوان نسبتی از دبی هواده‌ی به دبی جریان تعریف می‌شود. از این رو به‌ازای نسبت هواده‌ی، مرز کاویتاسیون مشخص شد.

در بحث استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی، استفاده از ابزار اندازه‌گیری فشار آب، بخش حائز اهمیت در محاسبه مقدار کاویتاسیون است. استفاده از پیژومترهای فشار، با توجه به ساختار هیدرومکانیکی آنها، می‌تواند فشار هیدرواستاتیک را با دقت قابل قبولی بدست آورند. کالینسکی و رابرت (۱۱) با در نظر گرفتن پرش هیدرولیکی در مجرای افقی دایره‌ای میزان هوای مورد نیاز جهت جلوگیری از خطر کاویتاسیون را تخمین زدند. در این پژوهش از پیژومترهای نصب شده در بدنه مجرای دایره‌ای استفاده شد. همچنین نتایج بررسی این پژوهشگران نشان داد، به‌ازای افزایش عدد فرود جریان، میزان هواده‌ی برای جلوگیری از کاویتاسیون افزایش پیدا می‌کند. همچنین در ادامه مطالعه‌ی پژوهشگران بیان داشتند (۱۱) که افزایش هواده‌ی باعث کاهش شدت آشفستگی در مقطع طولی مجرای دایره‌ای می‌شود و با افزایش هواده‌ی سرعت در جهت طولی نیز افزایش پیدا خواهد کرد.

اثر طول دریچه تحتانی یکی دیگر از پارامترهای تأثیرگذار در کاویتاسیون دریچه‌های تحتانی است. مطالعه‌ی (۱۵) به بررسی عوامل هندسی تأثیرگذار بر پدیده‌ی کاویتاسیون پرداخت. در این پژوهش پارامترهایی از جمله ارتفاع آب در مخزن بالادست، طول شفت افقی دریچه‌ی تحتانی و عرض دریچه تحتانی به صورت آزمایشگاهی مورد پژوهش و بررسی قرار داده شد. درنهایت، با استفاده از بکارگیری آنالیز ابعادی و تکنیک رگرسیون غیر خطی، میزان دبی هوای مورد نیاز جهت جلوگیری از پدیده‌ی کاویتاسیون ارائه داد.

هورموث (۸) با بررسی جت خروجی از دریچه‌ی تحتانی

کاویتاسیون پدیده‌ای هیدرودینامیکی است که در اثر کاهش فشار سیال به مقادیر پایین‌تر از فشار اتمسفر، در سازه‌های هیدرولیکی رخ می‌دهد. ایجاد خسارات فراوان و حتی تخریب سازه می‌تواند بخشی از عملکرد این پدیده باشد. این پدیده خطری است که سازه‌های هیدرولیکی را در معرض سرعت بالا و افت فشار موضعی را قرار می‌دهد. راه‌های متعددی جهت مقابله با این پدیده و تخریب‌های ناشی از آن پیشنهاد شده است که عبارتند از: هواده‌ی، بهینه‌کردن شکل شیار دریچه‌ها، استفاده از بتن الیافی و تقویت‌کردن سطح و استفاده از روکش‌های فولادی. از جمله سازه‌هایی که در معرض خطر کاویتاسیون می‌باشد قسمت خروجی دریچه‌های کشویی تحتانی است. احتمال وقوع کاویتاسیون با عدد کاویتاسیون سنجیده می‌شود و برای محاسبه مقدار کاویتاسیون، اندازه‌گیر فشار و سرعت، در محل دریچه‌ها امری بسیار حائز اهمیت است. در این قسمت به بررسی مطالعاتی انجام شده بر روی عدد کاویتاسیون و دیگر مفاهیم پرداخته خواهد شد.

نکته حائز اهمیت در کنترل پدیده کاویتاسیون، استفاده از تمهیدات مانع‌شونده از جمله هواده‌ی در منطقه مورد نظر در جهت از بین بردن فشار منفی است. سرعت و آشفستگی بالای جریان در خروجی دریچه‌های تحتانی، نیاز به هواده‌ی مناسب دارد. این امر معمولاً با استفاده از به کارگیری تونل‌های انتقال هوا صورت می‌پذیرد. بسیاری از مطالعات از جمله دترما (۴) و فالوی (۶) و همچنین هورموث (۸) بیان داشتند که هواده‌ی در منطقه کاویتاسیون می‌تواند تا حد خیلی زیادی خطر بوجود آمدن کاویتاسیون را کاهش دهد.

از جمله عوامل تأثیرگذار بر میزان خطر کاویتاسیون در دریچه‌ی تحتانی سدها، به مطالعاتی از جمله فالوی (۶)، یواس آ سی ای (۱۸) و ویسچر و هگر (۱۹) اشاره کرد. نکته حائز اهمیت در این پژوهش‌ها نحوه هواده‌ی توسط شیر تعبیه شده در منطقه‌ی در خطر کاویتاسیون است. این پژوهش‌ها بیان

مدل می‌تواند برآورد مناسبی برای مقدار کاویتاسیون، فشار استاتیک و سرعت جریان ارائه دهد. آنها بیان داشتند که استفاده از حل عددی نیازمند واسنجی توسط مدل آزمایشگاه می‌باشد و بدون در نظر گرفتن این قسمت، حل عددی نمی‌تواند برآورد مناسبی از شبیه‌سازی جریان ارایه دهد.

در مطالعه‌ای (۱۵) به بررسی دو عامل مهم بر پدیده کاویتاسیون در شافت افقی سرریز نیلوفری شهید عباسپور پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که بیشترین خسارت در قسمت انتهایی خروجی قرار خواهد گرفت. همچنین، در این مطالعه بررسی خطرات ناشی از کاویتاسیون در شفت افقی مورد مطالعه قرار داده شد. با در نظر گرفتن حل عددی و مدل نرم‌افزاری رابطه‌ای برای میزان هوادهی مورد نیاز در جهت کاهش خطر کاویتاسیون در این منطقه پرداختند.

پژوهش حاضر با بکارگیری شبیه‌سازی عددی انسیس، به شبیه‌سازی جریان در دریچه تحتانی آبگیر تحتانی سد نسا می‌پردازد. در این پژوهش از مدل آزمایشگاهی ساخته شده، جهت راستی‌آزمایی حل عددی استفاده شد. در نهایت با انتخاب بهترین مدل آشفتگی برای شبیه‌سازی عددی مدل دریچه تحتانی سد نسا، مقادیر سرعت و فشار استاتیکی محاسبه شد. در ادامه با در نظر گرفتن این پارامترها، مقدار عدد کاویتاسیون محاسبه شد. در نهایت، با توجه به مقادیر عدد کاویتاسیون، مناطق با خطر بالای کاویتاسیون مشخص شد. در حل مدل عددی، روش‌های مختلف و مدل‌های مختلفی ارائه شده است. در این پژوهش با در نظر گرفتن روش‌های مختلف سعی در مقایسه این روش‌ها شد. مقایسه مدل‌های آشفتگی می‌تواند به‌عنوان بخش نوآوری در این پژوهش در نظر گرفته شود.

مواد و روش‌ها

عدد کاویتاسیون

محاسبه عدد کاویتاسیون، نیازمند برآورد میزان فشار و سرعت در آن ناحیه است. با توجه به مقدار عدد کاویتاسون، سطح خطر کاویتاسیون در جدول ۱ ارایه شده توسط فالوی (۶)، مشخص شده است. از این‌رو، ابتدا باید مقدار عدد کاویتاسیون

بیان داشتند که این جت به میزان قابل قبولی باعث اختلاط آب و هوا در سطح جت می‌شود درحالی‌که در قسمت‌های کف این اختلاط ناچیز است و در این محدوده به‌ازای سرعت‌های بالا، احتمال بوجود آمدن پدیده‌ی کاویتاسیون محتمل است. آنها بیان داشتند که با اضافه کردن شیارهایی در طول جریان می‌توان این اختلاط هوا را در قسمت‌های پایینی جریان وارد کرد و از ایجاد پدیده‌ی کاویتاسیون جلوگیری به عمل آید.

در این پژوهش‌ها از روش اجزا محدود برای حل معادله جریان استفاده شد. نتایج این پژوهش‌ها نشان داد، اجزا محدود روش مناسبی برای حل عددی معادله جریان می‌باشد و شبیه‌سازی عددی برآورد نسبی خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد. همچنین، مطالعاتی در زمین بررسی عدد کاویتاسیون بر روی دیگر سازه‌ها مثل سرریز پلکانی وجود دارد. در مطالعه‌ای (۱۳)، با بکارگیری حل عددی بر پایه راستی‌آزمایی مدل آزمایشگاهی، مدل سرریز پلکانی را با استفاده از مدل آشفتگی RNG شبیه‌سازی کرد. نتایج این پژوهش نشان داد، برآورد دبی در مدل آشفتگی دقت مناسبی با مدل آزمایشگاهی دارد و همچنین مناطق در خطر کاویتاسیون در این نوع سرریز مشخص شد.

مطالعه‌ای (۷) به برآورد عددی نیروی سطحی بر روی سطوح روبه‌رو شده با پدیده‌ی کاویتاسیون پرداخت. نتایج این پژوهش نشان داد، مقادیر فشار منفی در سطوح کف دریچه تحتانی و سرریز نیلوفری و همچنین باکت‌های پرتابه‌ای جریان می‌تواند نیروی مخربی ایجاد کند. همچنین، محاسبه‌های فشار استاتیک نشان داد، فشار منفی ۱۰۰۰ مگا پاسکال در این مناطق محتمل است و پژوهشگران باید بیشتر موارد جلوگیری‌کننده را در مقابل فشار منفی طرح‌ریزی کنند تا مقابله با سرعت بالای قسمت جت خروجی دریچه تحتانی.

همچنین، برآورد عدد کاویتاسیون با استفاده از مدل عددی، در سازه‌هایی از جمله دریچه تحتانی و سرریز نیلوفری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. پژوهش‌های (۱) و (۱۲) از جمله پژوهش‌هایی هستند، که حل عددی انسیس را برای شبیه‌سازی استفاده کردند. نتایج این پژوهش‌ها نشان داد، این

جدول ۱. خطر کاویتاسیون به ازای عدد کاویتاسیون و سرعت جریان در محل مورد بررسی

شماره	خطر کاویتاسیون	محدوده سرعت	محدوده عدد کاویتاسیون
۱	بدون خطر کاویتاسیون	$V \leq 5$	$\sigma > 1$
۲	امکان خطر کاویتاسیون	$5 < V \leq 16$	$0.45 < \sigma \leq 1$
۳	خطر کاویتاسیون	$16 < V \leq 25$	$0.25 < \sigma \leq 0.45$
۴	خطر جدی کاویتاسیون	$25 < V \leq 40$	$0.17 < \sigma \leq 0.25$
۵	خرابی فراوان حاصل از کاویتاسیون	$V > 40$	$\sigma \leq 0.17$

جدول ۲ نمایش داده شده است.

مدل آزمایشگاهی

در جهت مدل سازی و راستی آزمایی نتایج مدل عددی، از مدل آزمایشگاهی دریچه تحتانی سد نسا در آزمایشگاه استفاده شد. از آنجایی که دبی آبگیر تحتانی سد نسا، ۸۵ متر مکعب بر ثانیه بود و با در نظر گرفتن مدل سازی بر اساس عدد رینولدز (مجرای بسته) دبی در مدل آزمایشگاهی ۰/۰۸۵ متر مکعب محاسبه شد، لازم به ذکر است مقیاس ۱:۱۰۰۰ است.

مقیاس ساخت مدل آزمایشگاهی تا حد امکان بزرگ در نظر گرفته شد تا نتایج مدل آزمایشگاهی با واقعیت همخوانی بیشتری داشته باشد. در حالت کلی با کوچک شدن مدل آزمایشگاهی میزان خطای بین داده های آزمایشگاهی و داده های محیطی آبگیر تحتانی سد نسا افزایش پیدا می کند و بنا به تجربه، هر اندازه که مدل آزمایشگاهی در ابعاد بزرگتری ساخته شود، میزان خطای بین داده ها محیطی و آزمایشگاهی کاهش پیدا می کند. از این رو با امکان سنجی ساخت مدل آزمایشگاهی و برقرار تشابه هندسی، سینماتیک و دینامیک بین مدل آزمایشگاهی و آبگیر تحتانی سد نسا، مدل آزمایشگاهی آبگیر در ابعاد قابل قبول ساخته شد، در شکل ۲، مدل آزمایشگاهی مشخص است

در نهایت با اعمال دبی در مدل دریچه تحتانی در آزمایشگاه، مقادیر فشار استاتیکی با استفاده از پیزومترهای تعبیه

در محل با برآورد مقادیر فشار، سرعت و همچنین بکارگیری فرمول ارائه شده توسط آنالیز ابعادی برای پدیده کاویتاسیون، محاسبه شود. در زیر می توان مقدار کاویتاسیون را از رابطه یک محاسبه کرد.

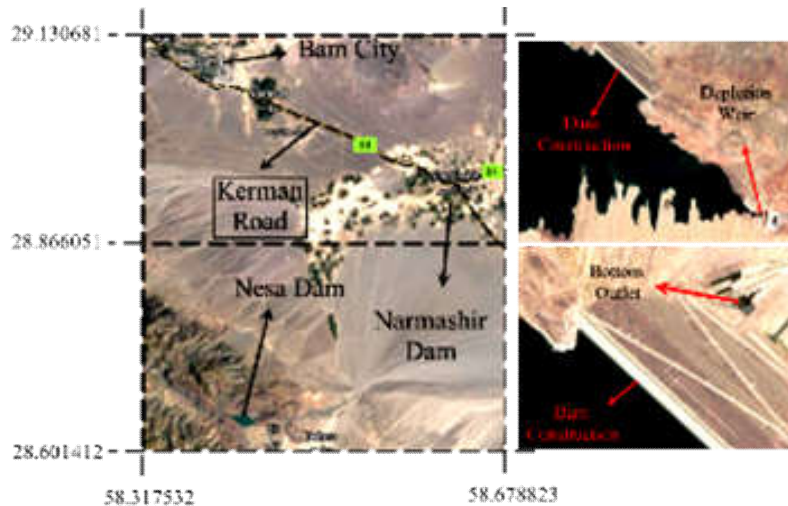
$$\sigma = \frac{P_0 - P_v}{\frac{1}{2} \rho V_0^2} \quad (1)$$

در این رابطه σ میزان عدد کاویتاسیون، P_0 فشار استاتیک، P_v فشار بخار به ازای دمای هوای و ρ وزن مخصوص آب است.

همچنین مطالعاتی در زمینه کاربرد مدل های عددی در برآورد میزان کاویتاسیون وجود دارد. از جمله اولین پیشگامان در این زمینه می توان به مطالعات (۹ و ۲) اشاره کرد. لازم به ذکر است، در پژوهش های یاد شده، سطح خطر کاویتاسیون با در نظر گرفتن فشار استاتیک و سرعت محاسبه شده و محدوده های عدد کاویتاسیون و سطح خطر آنها نمایش داده شده است. در این پژوهش از این مرزهای سطح خطر ارایه شده در جدول ۱، استفاده شده است.

دریچه تحتانی مورد مطالعه

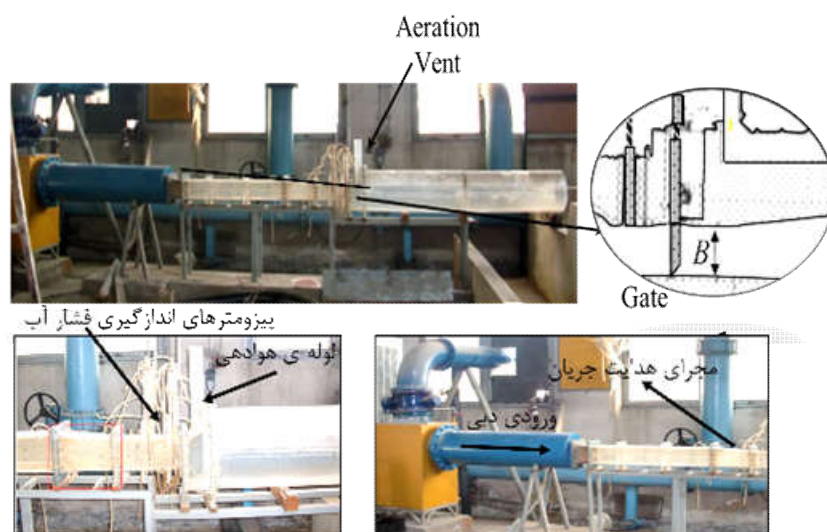
در این مطالعه از دریچه تحتانی سد نسا واقع در استان کرمان استفاده شد. اطلاعات جغرافیایی و محل قرارگیری این سد در شکل ۱ نمایش داده شده است. همچنین اطلاعات هیدرولیکی این سد همراه با دریچه تحتانی اش در



شکل ۱. مشخصات جغرافیایی دریچه مورد مطالعه (رنگی در نسخه الکترونیکی)

جدول ۲. اطلاعات هیدرولیکی سد نسا واقع در استان کرمان

شهر نزدیک	بم
نوع سد	خاکی
ارتفاع سد	۱۱۱ متر
طول تاج	۵۹۰ متر
عرض تاج	۱۰ متر
تعداد دریچه‌های تحتانی	۲
طول دریچه‌های تحتانی	۱۲۴۵ متر
دبی خروجی دریچه تحتانی	۸۵ m ³ /s
حجم سد	۱۶۸ million cube



شکل ۲. مشخصات هیدرولیکی مدل آزمایشگاهی دریچه تحتانی سد نسا (رنگی در نسخه الکترونیکی)

در این رابطه‌ها، u و u' به ترتیب سرعت درجهت طولی و نوسانات سرعت طولی می‌باشند. همچنین $\overline{\rho u_i u_j}$ به صورت تانسور تنش رینولدز تعریف می‌شود. باید توجه داشت که نرم‌افزار انسیس با بکارگیری تکنیک‌های محاسباتی المان محدود، مقادیر فشار و سرعت را با حل عددی معادلات (۲) و (۳) در منحنی دوبعدی یا سه بعدی مختصات، با در نظر گرفتن شرایط مرزی تعریف شده (در این پژوهش ارتفاع و دبی بالادست و پایین‌دست دریچه) را بدست می‌آورد. این معادلات به‌ازای شرایط مختلف اولیه حل می‌شوند. در مدل‌سازی، مدل دریچه تحتانی سد نشاء، جریان در حالت تراکم ناپذیر در نظر گرفته شد.

در مدل انسیس با مشخص کردن نوع سیال که آب ۲۵ درجه است می‌توان نوع سیال را مشخص کرد. مراحل حل معادلات یاد شده، توسط سازنده نرم‌افزار که با حل مسئله بر پایه برنامه نویسی صورت می‌پذیرد. باید در نظر داشت که این قسمت از دید تکنسینی یا اشخاصی که با نرم‌افزار کار می‌کنند کاملاً مجزا بوده و در نهایت نتایج گرافیکی و اطلاعات جدولی برای فشار، سرعت و دیگر پارامترها در دسترس قرار گرفت. لازم به ذکر است، این معادلات نیازمند شرایط پیش فرض اولیه هستند که به صورت مرزهای اولیه برای این معادلات تعریف می‌شود. همچنین، برای شبیه‌سازی پدیده‌های هیدرولیکی مدل‌های از پیش تعیین شده‌ای در نرم‌افزار وجود دارد. اختلاف این مدل‌ها به شرایط و ضوابط مختلف برای مدل‌سازی جریان‌های آشفته مرتبط می‌شود. در حالت کلی مدل K به شدت انرژی جنبشی حاصل از آشفتگی و ε به نرخ اتلاف انرژی اطلاق می‌شود. به خاطر اینکه مدل $K-\varepsilon$ موارد زیر را در بر می‌گیرد. می‌تواند مدل مناسبی برای مدلسازی مدل آشفتگی در نرم‌افزار در نظر گرفته شود (۲۰). لازم به ذکر است، i و j مقصود بردارهای یکه در جهات منحنی مختصات در مدل دو بعدی آشفتگی می‌باشد.

آنالیز مش

در این پژوهش در قسمت ابزار مش، از مش با تعداد ۵۲۴۰۰ المنت و ۴۸۱۵۰ گره استفاده شد. بررسی‌های اولیه نشان داد،

شده در طول شفت افقی برداشت شد. در شکل ۲، مدل آزمایشگاهی دریچه تحتانی سد نسا، نمایش داده شده است. مدل مجرای تخلیه کننده عمقی سد نسا در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه باهنر کرمان ساخته شده است. اجزا دریچه تحتانی شامل دریچه تعمیراتی، پوشش فلزی با مقطع مستطیلی، ورودی مجرا، شیار دریچه، مجرای میانی، دریچه اضطراری، اتاقت دریچه اضطراری، شیارهای آن، دریچه سرویس، هواده بین دو دریچه و همچنین کل مجرای پایین دست دریچه سرویس بوده که با جزئیات کامل مطابق نقشه‌های ارائه شده بوسیله مهندس مشاور طرح، با مقیاس ۱:۱۵ از جنس ورق شفاف (پلکسی گلاس) و در قسمت‌هایی از فلز ساخته شده است

به‌منظور تأمین ارتفاع آب لازم و دبی مورد نیاز، از یک مخزن استوانه ای با ارتفاع حدود ۱۸ متر که به وسیله دو پمپ به ظرفیت هر یک ۱۰۰ لیتر بر ثانیه تغذیه می‌شد، استفاده شده است. لازم به ذکر است، مقایسه‌های خطا با دبی ۸۵ لیتر بر ثانیه انجام پذیرفت. نتایج داده‌های پیرومتری این آزمایش‌ها در شکل ۴ نمایش داده شده است. همچنین برای بررسی دیگر پارامترها و برآورد میزان دقت مدل عددی با داده‌های آزمایشگاهی به‌ازای هد بالادست دریچه مقادیر دبی در دو مدل آزمایشگاهی و عددی با هم مورد مقایسه قرار داده شدند. نتایج این مقایسه‌ها در جدول ۳ نمایش داده شده است.

معادلات حاکم

به صورت کلی حل عددی انسیس معادلات پیوستگی و معادله مومنتوم را حل می‌کند. این معادلات به صورت ساده شده معادلات ناویراستوکس هستند. معادلات شماره (۲) و (۳) معادله پیوستگی و مومنتوم می‌باشد.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x_j} \quad (3)$$

$$\left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-\rho \overline{u_i' u_j'} \right]$$

جدول ۳. اطلاعات آزمایشگاهی و مدل عددی

L	b	B	L/B	ضریب آبگذری		Fr		دبی	
				مدل عددی	مدل آزمایشگاهی	مدل عددی	مدل آزمایشگاهی	مدل عددی	مدل آزمایشگاهی
۱/۱	۰/۱۲	۰/۱۵	۰/۸	۰/۷۸	۰/۸	۱/۰	۱۰	۹۰/۸	۹۴/۱
۱/۲	۰/۰۹	۰/۱۵	۰/۶	۰/۷۶	۰/۷۸	۹/۸۹	۱۱/۵	۶۸/۸	۷۸/۰۴
۱/۲	۰/۰۴۵	۰/۱۵	۰/۳	۰/۷۳	۰/۷۴	۱۳/۷	۱۶/۵	۳۴/۴۳	۴۰

مختلف آشفتگی نشان داد، کمترین خطا بین داده‌های عددی و داده‌های آزمایشگاهی به مدل $k-\epsilon$ تعلق می‌گیرد. از این رو، در این تحقیق از این مدل آشفتگی استفاده شد. نتایج این مقایسه در شکل ۴ نمایش داده شده است.

به خاطر وجود جریان آشفتگی در محدوده‌ی خروجی جت از دریچه، مقادیر برآوردی از مدل عددی با مدل آزمایشگاهی در این محدوده تفاوت زیادی دارد. درحالی که برآورد مقادیر فشار در محدوده‌های خارج از پرش هیدرولیکی در محدوده قابل قبول هستند.

همانطور که در شکل ۴ مشخص شده است، به ازای کاهش اندازه مش‌بندی در مدل نرم‌افزاری، میزان خطا کاهش پیدا می‌کند و با ریزتر شدن مش‌بندی مقادیر برآورد فشار با نتایج آزمایشگاهی همخوانی بیشتری پیدا می‌کند.

$$Er_{ave}(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n |(P_n)_i - (P_e)_i|}{\sum_{i=1}^n |(P_e)_i|} \times 100 \quad (4)$$

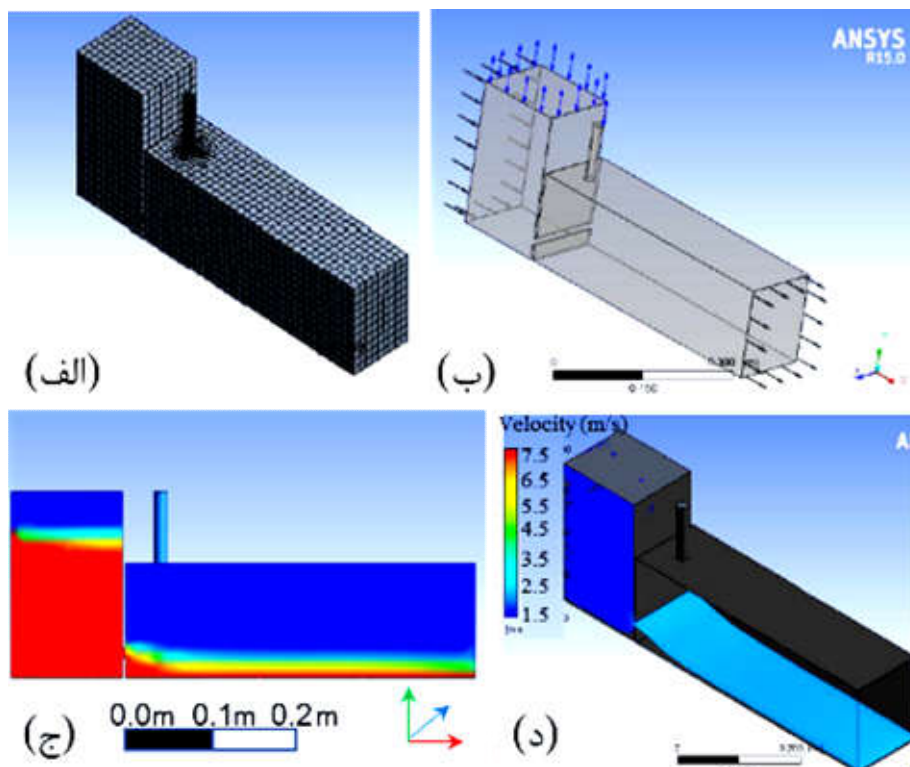
نتایج و بحث

نتایج و بحث حاصل از این پژوهش، در بخش‌های از جمله شاخص هوادهی، سرعت، فشار و درنهایت عدد کاویتاسیون تقسیم‌بندی شده است. در ابتدا شاخص هوادهی محاسبه شده در دریچه تختانی سد نسا با مطالعات گذشته براساس عدد فرود دریچه، مورد مقایسه و ارزیابی قرار داده می‌شود. لازم به

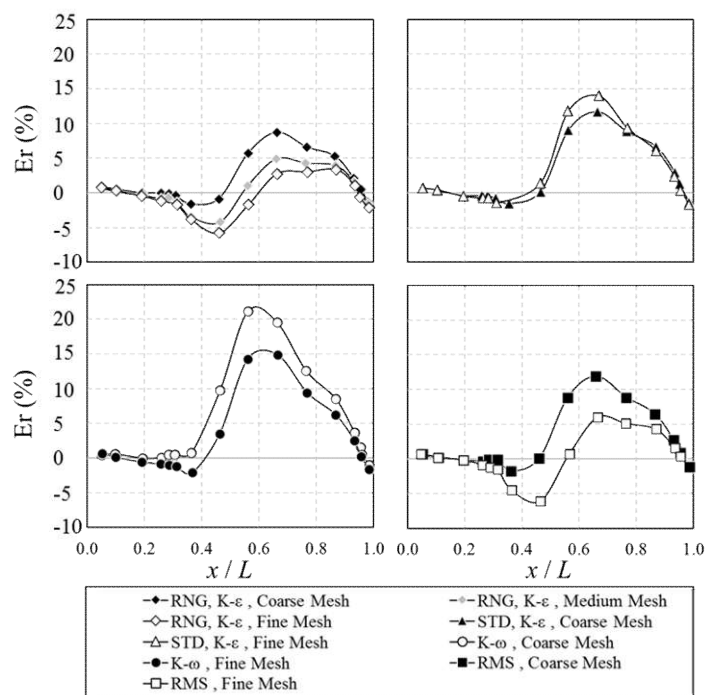
بهبه‌ترین مقادیر مش به‌ازای جهت طولی، عرضی و ارتفاعی برابر با $40 \times 20 \times 150$ می‌باشد. همچنین، برای کاهش تأثیر هوا در مرز جدایی بین هوا و آب باید ارتفاع آب سه برابر ارتفاع هوای در نظر گرفته شده در بالای دو محیط فازی باشد (۱۶). در شکل (۳-ب) شرایط اولیه در مدل نرم‌افزاری را در بالادست و پایین دست دریچه تختانی، همراه با مشخصات آن نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که عمق آب و دبی ورودی در بالادست به‌عنوان شرایط اولیه در نظر گرفته شد، همچنین در پایین‌دست شرایط جریان آزاد بدون انسداد در انتهای دریچه تختانی در مدل نرم‌افزاری فراهم شد. شایان ذکر است به‌ازای شرایط مختلف مقادیر دبی و ارتفاع آب در بالادست دریچه تختانی در شبیه‌سازهای مختلف و با توجه (۳) تغییر داده شد.

مدل آشفتگی

برای تعیین بهترین مدل آشفتگی در نرم‌افزار انسیس، به‌ازای دبی حداکثری میزان فشار در کف دریچه تختانی با استفاده از پیرومترهای تعبیه شده، اندازه‌گیری شد. با مقایسه داده‌های خروجی نرم‌افزار انسیس با داده‌های واقعی ناشی از آزمایشگاه، خطای این نرم‌افزار، به ازای مدل‌های مختلف آشفتگی بدست آمد. از رابطه (۴) برای محاسبه میزان خطا استفاده شد. مقایسه‌ها بین مدل‌های



شکل ۳. مدل نرم‌افزاری، (الف) مشخصات مش‌بندی، (ب) شرایط مرزی اعمال شده، شرایط جریان در مدل نرم‌افزاری و (د) سطح جریان خروجی از دریچه تحتانی (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۴. مقایسه بین مدل‌های آشفتگی با اندازه مش‌های مختلف

روابط تأثیرگذار بر کسر هوادهی با توجه به پژوهش‌های گذشته مانند پژوهش شارما (۱۴) در نظر گرفته شد. در این پژوهش، میزان هوادهی برای جلوگیری از پدیده کاویتاسیون محاسبه شد. لازم به ذکر است، میزان شاخص هوادهی به ازای سطح خطر کاویتاسیون محاسبه شد. در شکل ۶، مقایسه بین شاخص هوادهی محاسبه شده از حل عددی با دیگر پژوهش‌ها نمایش داده شده است. نتایج حاصل از این ضریب نشان داد که نتایج بدست آمده از حل عددی همخوانی مناسبی با رابطه کالینوسکی و رابردون (۱۱) دارد.

سرعت طولی

برای محاسبه عدد کاویتاسیون، مقدار سرعت در جهت طولی یکی از پارامترهای تعیین‌کننده مقدار عدد کاویتاسیون است. مقدار عدد کاویتاسیون با توجه به رابطه (۱) رابطه مستقیم با سرعت دارد و به‌ازای افزایش سرعت، میزان عدد کاویتاسیون افزایش پیدا خواهد کرد. در شکل ۷، به‌ازای بازشدگی دریچه تحتانی و ارتفاع آب در مخزن بالادست، میزان سرعت در کف جت خروجی دریچه تحتانی، استخراج شد. لازم به ذکر است، به‌ازای افزایش نسبت ارتفاع آب در مخزن بالادست به بازشدگی دریچه، میزان سرعت به صورت افزایشی تغییر وضعیت می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش عمق آب در بالادست دریچه تحتانی میزان مقادیر سرعت در کف حوضچه دریچه در ابتدای جت خروجی افزایش پیدا می‌کند. این پدیده می‌تواند خطر افزایش کاویتاسیون در این محدوده را افزایش دهد.

فشار استاتیک

در شکل ۸، مقدار فشار استاتیک در کف، وسط جریان و بالای سطح آب با استفاده از داده‌های حل عددی استخراج شد و در طول کف درجه تحتانی نمایش داده شده است.

ذکر است که از داده‌های عددی برای محاسبه ضریب هوادهی استفاده شد. همچنین، در ادامه رابطه‌ای بر پایه رگرسیون غیرخطی برای برآورد شاخص هوادهی ارائه شد. برای محاسبه عدد کاویتاسیون و مشخص کردن سطح خطر کاویتاسیون از رابطه (۱) مقادیر سرعت و فشار استاتیک در حل عددی به‌ازای ماکزیمم ارتفاع آب درون مخزن بالادست محاسبه شد.

شاخص هوادهی

در این بخش به‌ازای بازشدگی دریچه تحتانی میزان هوادهی مناسب جهت جلوگیری از کاویتاسیون محاسبه شد. برای بدست آوردن مقدار نسبت دبی جریان به دبی هوا پس از تعیین مدل آشفتگی مورد استفاده در مدل عددی، مقادیر دبی هوا و ارتفاع آب در بالادست دریچه به‌ازای بازشدگی مختلف دریچه، محاسبه شدند و در نهایت داده‌های استخراج شده در شکل (۵-الف) ترسیم شدند. در ادامه، با استفاده از تکنیک رگرسیون غیرخطی و فرود هوای ورودی از شیر تغذیه هوا در بالای ورودی دریچه تحتانی، رابطه‌ای در جهت تخمین شاخص هوادهی ارائه شد. این رابطه در قالب رابطه (۵) در زیر نمایش داده شده است.

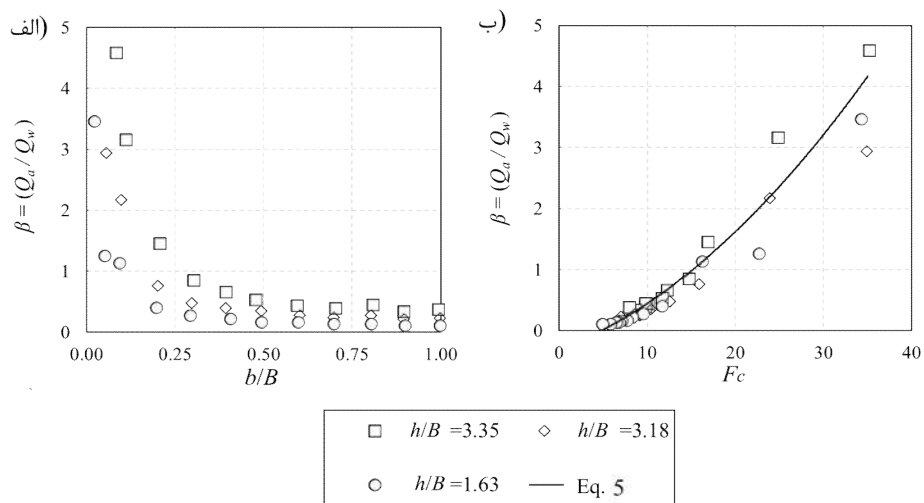
$$\beta = 0.0021Fc^2 + 0.054Fc - 0.3 \rightarrow R^2 = 0.89 \quad (5)$$

در رابطه بالا Fc میزان عدد فرود محاسبه شده در ورودی شیر ورودی هوا دریچه‌ی تحتانی و β ضریب هوادهی میباشند. پارامتر R در رابطه ۵، خطای میانگین مربعات بین داده‌های بدست آمده از مدل نرم‌افزاری و مقادیر متناظر پیش‌بینی شده با رابطه را نمایش می‌دهد.

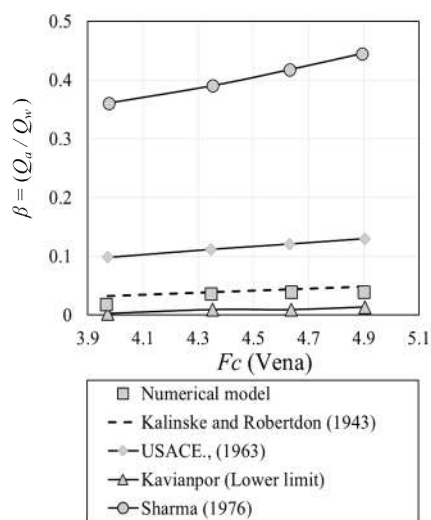
لازم به ذکر است که در رابطه (۵) را با در نظر گرفتن آنالیز ابعادی بین پارامترهای شرکت کننده در میزان β می‌توان بیان کرد:

$$\beta = f\left(\frac{b}{B}, Fc, h/B\right) \quad (6)$$

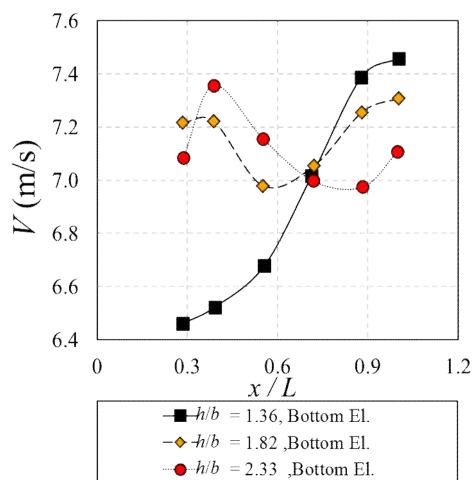
تأثیر پارامترهای استفاده شد در رابطه (۶) در شکل (۵) و (۶) نمایش داده شده است. همچنین، باید در نظر داشت



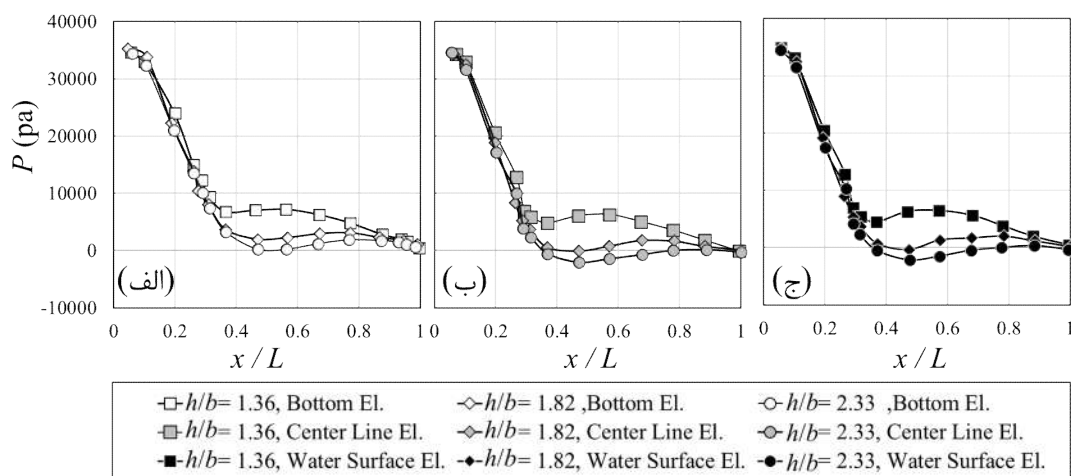
شکل ۵. ضریب هوادهی ارائه شده



شکل ۶. مقایسه شاخص هوای اندازه گیری شده با دیگر مطالعات



شکل ۷. سرعت در کف دریاچه تحتانی در مدل عددی



شکل ۸. فشار استاتیک محاسبه‌شده در طول ساختمان دریچه تحتانی بر اساس نتایج مدل عددی

سطوح پایین‌تر و نزدیک به کف ساختمان دریچه تحتانی باشد.

شاخص کاویتاسیون

برای مشخص کردن نقاط روبه‌رو شده با خطر کاویتاسیون در طول ساختمان دریچه تحتانی سد نسا، از داده‌های سرعت و فشار استاتیک حل عددی استفاده شد. برای بدست‌آوردن این شاخص با جایگذاری سرعت و فشار به‌ازای موقعیت مکانی، میزان عدد کاویتاسیون از رابطه (۱) محاسبه شد. طول دریچه تحتانی براساس مقادیر عدد کاویتاسیون و رفتار آن به سه منطقه تقسیم‌بندی شد. منطقه اول به ازای $0.3 < x/L < 0.4$ است. این منطقه دارای سطح خطر امکان کاویتاسیون با توجه به جدول ۱ می‌باشد. به خاطر اینکه در این محدوده فشار مثبت است، سرعت بالا به نواحی تعیین‌کننده میزان عدد کاویتاسیون می‌باشد. از طرفی سرعت جریان، تابع مستقیم ارتفاع آب درون مخزن است. از این‌رو، پیش‌بینی می‌شود عدد کاویتاسیون در این محدوده تابعی از ارتفاع درون مخزن باشد و به‌ازای افزایش ارتفاع آب درون مخزن امکان افزایش سطح خطر کاویتاسیون از "امکان خطر" به "خطر کاویتاسیون" تغییر وضعیت دهد. در منطقه دوم، اگرچه سطوح کف دریچه تحتانی فشار منفی را

به ازای نقاطی در کف دریچه تحتانی جریان فشار منفی را تجربه می‌کند. این نقاط به‌عنوان نقاط با احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون می‌تواند مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرند. همچنین، مقایسه‌های بین مدل‌های با نسبت ارتفاع آب در مخزن به بازشدگی دریچه مختلف نشان می‌دهد که به ازای افزایش این نسبت، فشار منفی در کف دریچه تحتانی افزایش پیدا می‌کند. در شکل (۸-ج) این مورد کاملاً مشهود است. همچنین مقایسه‌ها نشان می‌دهد به‌ازای تمامی نسبت‌های b/h سطح جریان در جت خروجی دریچه تحتانی با فشار منفی روبه‌رو نمی‌شود. این درحالی است که با فاصله گرفتن از سطح جریان به سمت کف دریچه تحتانی، ایجاد فشار منفی محتمل‌تر می‌شود. به نظر می‌رسد که نقاط با ارتفاعات کمتر و نزدیک به کف جریان محتمل‌ترین نقاط در برخورد با پدیده کاویتاسیون هستند. از این‌رو اعمال تمهیداتی برای ایجاد فشار مثبت در این محدوده می‌تواند اثرگذاری فراوانی بر کاهش خطر کاویتاسیون در این نقاط باشد. همچنین، به خاطر شیر تغذیه هوا در بالای سازه دریچه تحتانی، پیش‌بینی می‌شود، علت ایجاد فشار مثبت در سطح از اثرات شیر تغذیه هوا باشد. درحالی که نقاط پایین و نزدیک به کف دریچه تحتانی نیازمند تمهیداتی از جمله تغذیه هوا در جریان در

برآورد می‌شود که برای مدل‌سازی عددی با استفاده از مدل‌های مختلف آشفتگی، مدل معرفی شده بهترین مدل برای شبیه‌سازی جریان در ساختمان دریچه تحتانی باشد. بنابراین، توصیه می‌شود در شبیه‌سازی جریان با استفاده از مدل‌های عددی در این سازه از این مدل آشفتگی استفاده شود.

۲- برای تعیین تأثیر فاکتورهای مؤثر در برآورد عدد کاویتاسیون فاصله طولی ساختمان دریچه تحتانی سد نسا به سه منطقه تقسیم‌بندی شد. در این مناطق اثربخشی فشار منفی توأم با سرعت خیلی زیاد در برابر تغییرات عدد کاویتاسیون مورد بررسی قرار داده شد. نتایج نشان داد که در منطقه اول، $0.3 < x/L < 0.4$ عدد کاویتاسیون در محدوده امکان خطر کاویتاسیون است. همچنین، می‌توان بیان داشت که این میزان عدد کاویتاسیون بیشتر پارامتر سرعت می‌باشد تا فشار منفی. چراکه در این منطقه مقادیر فشار مثبت است و عدد کاویتاسیون بیشتر تابع سرعت جریان در جت خروجی دریچه تحتانی است. در رابطه با منطقه دوم، $0.4 < x/L < 0.9$ سطح خطر کاویتاسیون در محدوده خطر کاویتاسیون می‌باشد. این سطح از خطر تابع فشار منفی در این ناحیه است. همچنین، بررسی مقادیر فشار در سطوح مختلف ارتفاع آب نشان می‌دهد که فشار منفی ایجاد شده در نزدیکی کف ساختمان دریچه تحتانی رخ خواهد داد و به نحوی هوادهی در سطح جریان می‌تواند تا حد قابل قبولی از ایجاد خطر کاویتاسیون در سطح جریان بکاهد. درحالی که سطوح پایینی جریان آب و نزدیک به کف، همچنان نیازمند تمهیداتی برای از بین بردن فشار منفی در این محدوده است. شایان ذکر است که سطح خطر کاویتاسیون در این منطقه متأثر از فشار منفی می‌باشد و سرعت بالا نقش کم‌رنگتری در خطر وجود آوردن کاویتاسیون، ایفا می‌کند. همچنین، به‌ازای منطقه سوم، $x/L > 0.9$ ، وجود فشار کمتر (منفی‌تر) در این منطقه، سطح خطر کاویتاسیون را در محدوده‌ی "خطر جدی" کاویتاسیون قرار می‌دهد. از این‌رو احتمال تخریب کف بتنی در این ناحیه بدلیل وقوع کاویتاسیون وجود دارد و

تجربه می‌کنند. ولی همچنان به خاطر کم‌بودن فشار منفی، خطر کاویتاسیون منوط بر سرعت بالای جریان می‌شود. در این منطقه که $0.4 < x/L < 0.9$ می‌باشد، اگر چه خطر ایجاد کاویتاسیون در این منطقه نسبت به منطقه یک بیشتر است (به دلیل وجود فشار منفی در این منطقه) افزایش سرعت می‌تواند به صورت چشمگیری احتمال بالقوه کاویتاسیون را از سطح خطر به محدوده "خطر جدی" تبدیل کند. بنابراین، پیش‌بینی می‌شود، به‌ازای سرعت‌های بالاتر از ۱۶ متر بر ثانیه، در جهت کاهش خطر بالقوه کاویتاسیون، تمهیداتی برای مثبت‌کردن فشار منفی در کف سازه دریچه تحتانی صورت پذیرد. از جمله این تمهیدات می‌توان به تغذیه‌ی حباب‌های هوا در این محدوده اشاره کرد.

در منطقه سوم $x/L < 0.9$ ، ایجاد فشار منفی بالاتر محتمل‌ترین عامل برای افزایش خطر کاویتاسیون است. مقادیر عدد کاویتاسیون در این منطقه تابعی از فشار منفی در این محدوده می‌باشد. پیش‌بینی می‌شود، ایجاد فشار منفی بیشتر در این محدوده باعث خرابی جبران‌ناپذیر در این محدوده شود و سطح خطر را تا محدود "خرابی فراوان حاصل از کاویتاسیون" افزایش دهد.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، با استفاده از مدل نرم‌افزاری انسیس، دریچه‌ی تحتانی سد نسا در سه حالت ارتفاع آب در بالادست دریچه شبیه‌سازی شد. در جهت صحت‌سنجی داده‌های مدل عددی، از مدل آزمایشگاهی مدل دریچه‌ی تحتانی سد نسا استفاده شد. در موارد زیر به نتایج حاصل از این شبیه‌سازی اشاره شده است.

۱- مقایسه بین مدل آزمایشگاهی و حل عددی نشان داد، به‌ازای استفاده از مدل‌های آشفتگی مختلف در نرم‌افزار، میزان خطای بین فشار استاتیک اندازه‌گیری شده در مدل آزمایشگاهی با حل عددی خطایی وجود دارد. نتایج استفاده از مدل‌های مختلف آشفتگی در شبیه‌سازی عددی انسیس بیان داشت، به‌ازای مدل K-ε در حالت استفاده از مش ریز، کمترین خطا بین داده‌های فشار اندازه‌گیری شده در مدل آزمایشگاهی و حل عددی وجود خواهد داشت. از این‌رو

معرفی شد. مقایسه بین نتایج رابطه ارائه شده و مطالعات گذشته نشان داد که رابطه تخمین مناسب و قابل قبولی برای تخمین این نسبت ارائه می‌دهد.

بنابراین برای حفاظت از این منطقه تمهیدات مقاوم‌سازی توصیه می‌شود.

۳- رابطه‌ای برای برآورد نسبت دبی هوادهی که به‌عنوان نسبتی از دبی هوای ورودی از شیر تعبیه‌شده در بالای ساختمان دریچه تحتانی به دبی کل جریان بدست می‌آید،

منابع مورد استفاده

1. Alfatlawi, T. J. and H. I. Alshaikhli. 2015. Prediction the coefficient of discharge for stepped morning glory spillway using ANN and MNLr approaches. *International Journal of Civil and Environmental Engineering* 37(2): 1701-8285.
2. Betts, P. L. 1979. A variation principle in terms of stream function for free-surface flows and its application to the finite element method. *Computers and Fluids* 7(2): 145-153.
3. Campbell, F. B. and B. Guyton. 1953. Air demand in gated outlet works. *In: Proceeding 5th International Association for Hydraulic Research, American Society of Civil Engineers (ASCE) Joint, Reston, VA, USA.*
4. Dettmers, D. 1953. Beitrag zur Frage der Belüftung von Tiefschützen (A Contribution to the Aeration of High-head Gates). Hannover, Germany: Franzius-Institut Technische Hochschule Hannover.
5. Douma, H. 1955. Hydraulic design criteria for reservoir outlets. *In: Proceeding. 6th International Association for Hydraulic Research, American Society of Civil Engineers (ASCE) Joint, Reston, VA, USA.*
6. Falvey, H. T. 1980. Air-water hydraulic flow in structures. A book from United States Departments of the Interior. Denver: Water and Power Resources Service.
7. Gessler, D. 2005. CFD modeling of spillway performance. World Water and Environmental Resources Congress, United States.
8. Hohermuth, B. 2019. Aeration and two-phase flow characteristics of low-level outlets. ETH Publication, Zurich, Switzerland.
9. Hohermut, B., L. Schmocker and R. M. Boes. 2020. Air demand of low-level outlets for large dams. *Journal of Hydraulic Engineering* 146(8): 04020055.
10. Ikegawa, M. and K. Washizu. 1973. Finite element method applied to analysis of flow over a spillway crest. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 6(2): 179-189.
11. Kalinske, A. A. and J. M. Robertson. 1943. Closed conduit flow. *American Society of Civil Engineers Journal* 108 (1): 1435-1447.
12. Liu, Z. P., X. L. Guo, Q. F. Xia, H. Fu, T. Wang and X. L. Dong. 2018. Experimental and numerical investigation of flow in a newly developed vortex drop shaft spillway. *Journal of Hydraulic Engineering* 144(5): 04018014.
13. Savage, B. M. and M. C. Johnson. 2001. Flow over ogee spillway: Physical and numerical model case study. *Journal of Hydraulic Engineering* 127(8): 640-649.
14. Sharma, H. R. 1973. Air demand for high head gated conduits. Ph.D. thesis. River and Harbour Laboratory at the Technical University of Norway, Trondheim, Norway.
15. Speerli, J., W. H. Hager, M. G. Webby and J. S. Montes. 1999. Discussions and Closure: Irrotational flow and real fluid effects under planar sluice gates. *Journal of Hydraulic Engineering* 125(2): 208-213.
16. Sabeti, P., H. Karami and H. Sarkardeh. 2019. Analysis of the Impact of Effective Length of Morning Glory Spillway on Its Performance (Numerical Study). *Journal of Instrumentation Measure Metrology* 18(2): 211-221.
17. Sualaheldin, T. M., J. Imran and M. H. Chaudhry. 2004. Numerical modeling of three-dimensional flow field around circular piers. *Journal of Hydraulic Engineering* 130(2): 91-100.

18. USACE. 1964. Air Demand-Regulated Outlet Works. Hydraulic design criteria, sheet 050-1/2/3. Washington, DC: USACE.
19. Vischer, D. and W. H. Hager. 1998. Dam Hydraulics. Chi Chester, UK: Wiley.
20. Yakhot, V. and L. M. Smith. 1992. The renormalization group, the ε -expansion and derivation of turbulence models. *Journal of Scientific Computing* 7(1): 35-61.

Cavitation Risk through the Bottom Outlet of the Dam Using Numerical Solution of Ansys Model

A. Kasra, A. Khosrojerdi* and H. Babazadeh¹

(Received: February 7-2021; Accepted: June 23-2021)

Abstract

The objective of the present research was to investigate the flow properties through the bottom outlet of the Nesa dam based on numerical and experimental studies. 22 piezometers were employed to measure the static pressure through the experimental model. The bottom outlet section was divided into three blocks to measure the endangered region. The graph of cavitation numbers was plotted for different flow discharge and cavitation damage levels to compare with a safe zone to find out the areas with a high risk of cavitation. The results illustrate that block No. 1 cavitation index is located at the “possible cavitation” damage. The studies showed that the cavitation index is the dependent parameter with the height of the water at the upstream reservoir. Furthermore, for block No. 2, the level of cavitation ranged from $x/L = 0.44$ to 0.90 and the cavitation level is related to the velocity, and by increasing the velocity to 16 m/s, the threat of the cavitation and its consequences is raised, dramatically. Regarding block No.2 and 3, the cavitation through this block depends on the negative pressure since the negative values of the cavitation index is related to the negative static pressure and it is assumed that the negative pressure can reach the threat of major damage. Also, a comparison between different numerical turbulence models illustrates that the $k-\epsilon$ RNG with fine mesh showed less error with experimental values which causing the numerical model with this condition to reach an appropriate agreement between numerical and experimental simulations.

Keywords: Cavitation Number, Static Pressure, Discharge, Bottom outlet, Velocity

1. Department of Water Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad university, Tehran, Iran.

*: Corresponding author, Email: khosrojerdi@srbiau.ac.ir