

F. Karimi Pirmoosaei

M.Sc of Civil Engineering
Department, Lahijan Branch,
Islamic Azad University,
Lahijan, Iran.

e-mail: faridekarimy70@gmail.com

A. R. Mardookhpour*

Civil Engineering Department,
Engineering Faculty, Islamic
Azad University of Lahijan,
Lahijan, Iran.

e-mail: alireza.mardookhpour@liau.ac.ir

Numerical Simulation of Cavitation Phenomenon in the Stepped Spillway With Fluent Software

In the present research, the effects of different turbulence models and cavitation phenomenon in the stepped spillway of Siah Bisheh dam was investigated using the FLUENT model. Three standard K-Epsilon, Renormalization Group (RNG) K-Epsilon, and K-Omega turbulence models were employed for minimum, maximum, and flood discharge flows of 150, 170, and 203 cm³/s, respectively. The numerical method was validated by simulating a laboratory spillway, by which an appropriate consistency was observed. Also, the results showed that the probability of the cavitation phenomenon was more likely for a discharge flow of 203 cm³/s downstream of the stepped spillway area of the Siah Bisheh dam. Therefore, an appropriate aeration system can be utilized in suitable locations to reduce the probability of cavitation by decreasing velocity in the desired areas. Moreover, the cavitation index changed at each point of the spillway by changing the turbulence model type. Therefore, choosing the turbulence model to investigate the cavitation is of great importance. For example, the maximum velocities created in the investigated models with a discharge flow of 150 cm³/s for standard K-Epsilon, RNG K-Epsilon, and K-Omega turbulence models were 1.34, 2.32, and 1.32 m/s, respectively. The standard K-Epsilon and K-Omega models were very similar in all discharge flows and the results of the RNG K-Epsilon turbulence model were different from the other two models.

Keywords: Cavitation phenomenon, Turbulence Models, stepped spillway Siah bisheh Spillway.

* Corresponding author

Received 21 October 2020, Revised 01 February 2021, Accepted 04 February 2020.

DOI: 10.22091/cer.2021.6104.1216

شبیه‌سازی عددی پدیده کاویتاسیون در سرریز پلکانی

به کمک نرم‌افزار Fluent

در مطالعه‌ی حاضر به بررسی تأثیر انواع مدل‌های آشفتگی و پدیده کاویتاسیون در سرریز پلکانی سد سیاه بیشه با نرم‌افزار Fluent پرداخته شده است. سه مدل آشفتگی $K-\epsilon$ با مدل‌های استاندارد و RNG و $K-\omega$ و سه دبی (دبی حداقل و حداکثر به ترتیب معادل ۱۵۰ و ۱۷۰ مترمکعب بر ثانیه و دبی سیلاب معادل ۲۰۳ مترمکعب بر ثانیه) در نظر گرفته شدند. اعتبار سنجی روش عددی با شبیه‌سازی یک سرریز آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت و تطابق مناسبی مشاهده شد. نتایج نشان داد که در سرریز سد سیاه بیشه با دبی ۲۰۳ مترمکعب بر ثانیه در ناحیه‌ی پایین دست سرریز پلکانی، احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون محتمل‌تر است. از این رو می‌توان در مکان‌های مناسب، از سیستم هوادهی مناسب استفاده کرد تا با کاهش سرعت در نواحی مورد نظر، احتمال وقوع کاویتاسیون کاهش یابد. همچنین با تغییر در نوع مدل آشفتگی، شاخص کاویتاسیون در هر نقطه از سرریز دچار تغییر می‌شود، بنابراین انتخاب مدل آشفتگی به منظور بررسی کاویتاسیون از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به طوریکه به عنوان مثال مقدار بیشینه سرعت ایجاد شده در مدل‌های مورد بررسی با دبی ۱۵۰ مترمکعب بر ثانیه برای مدل آشفتگی $K-\epsilon$ با مدل استاندارد برابر ۱/۳۴ متر بر ثانیه، برای مدل آشفتگی $K-\epsilon$ و مدل RNG برابر ۲/۳۲ متر بر ثانیه و برای مدل آشفتگی $K-\omega$ برابر ۱/۳۲ متر بر ثانیه شد. مدل‌های $K-\epsilon$ استاندارد و $K-\omega$ در تمامی دبی‌ها بسیار نزدیک به هم بوده و استفاده از مدل آشفتگی $K-\epsilon$ و مدل RNG نسبت به دو مدل دیگر تفاوت داشته است.

واژگان کلیدی: پدیده کاویتاسیون، آشفتگی، سرریزهای پلکانی، سرریز سد سیاه بیشه.

فریده کریمی پیرموسائی

کارشناس ارشد گروه عمران،
دانشگاه آزاد اسلامی واحد
لاهیجان، لاهیجان، ایران.

پست الکترونیک:

faridekarimy70@gmail.com

علیرضا مردوخ پور*

گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی
واحد لاهیجان، لاهیجان، ایران.

پست الکترونیک:

alireza.mardookhpour@liau.ac.ir

۱- مقدمه

این سرریزها به‌عنوان یک گزینه برتر در سدهای بتن غلطکی مطرح هستند، زیرا علاوه بر مزایای ذکر شده، همخوانی تکنولوژی ساخت سدهای بتن غلطکی با روش ساخت سرریزهای پلکانی مزید بر علت شده و امروزه به طور معمول سدهای بتن غلطکی به سرریز پلکانی مجهز می‌شوند [۲].

کاویتاسیون فرآیندی است که معمولاً با خراب شدگی سطوح همراه بوده و یا با ایجاد یک صدای شدید مشخص می‌شود. به طور کلی، کاویتاسیون به صورت رخداد شکل‌گیری حباب یا حفره در یک مایع تعریف می‌شود. در جریان آب اگر این حفرات با بخار آب پر شده

امروزه استفاده از سرریزهای پلکانی در نقاط مختلف دنیا به علت توانایی فوق‌العاده آنها در استهلاک انرژی جریان و در نتیجه کاهش ابعاد حوضچه آرامش و همچنین کنترل و کاهش پدیده خلاءزایی در سرریز، رواج گسترده‌ای یافته است [۱].

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۳۰، بازنگری ۱۳۹۹/۱۱/۱۳، پذیرش ۱۳۹۹/۱۱/۱۶.
DOI: 10.22091/cer.2021.6104.1216 شناسه دیجیتال

یک سرشت و همکاران (۲۰۱۳) با بهره‌گیری از تعدادی مدل‌های آشفتگی مختلف، جریان آب بر روی سرریزهای پلکانی ساده و سرریز پلکانی پله حوضچه‌ای را مورد بررسی قرار دادند [۹].

پارسایی و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی پدیده کاویتاسیون روی پرتابه سرریز سد بالا رود به کمک مدل عددی پرداختند. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان داد که وقوع کاویتاسیون براساس شاخص کاویتاسیون بحرانی ۰/۲۵ در طول سرریز و پرتابه سد بالا رود امکان‌پذیر نیست [۱۰].

زمانی و موسوی (۲۰۱۶)، به بررسی عددی احتمال رخداد کاویتاسیون در سرریز سد سیمره پرداختند. در این مطالعه با بررسی اثرات برای مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار Fluent استفاده شده که توانایی بالایی در مدل‌سازی جریان از روی سرریز دارد و به وسیله این نرم‌افزار می‌توان پارامترهای مربوط به جریان را در حد مطلوبی به دست آورد که از طرفی نتایج تحلیل عددی جریان بر روی سرریز استاندارد انطباق خوب و نزدیکی با نتایج حاصل از مدل‌های آزمایشگاهی دارد [۱۱].

انصاری و اسماعیل‌پور (۲۰۱۷)، به مقایسه مدل‌های دو سیالی و حجم سیال در شبیه‌سازی عددی جریان دوفازی سرریزهای پلکانی در شرایط باهوا دهی و بدون هوا دهی پرداختند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد در دی‌های کم جریان، مدل VOF نسبت به مدل دو سیالی نتایج دقیق‌تری ارائه می‌دهد [۱۲].

رنجبر و قدم‌پور (۲۰۱۷)، به بررسی احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون در سرریز پلکانی دنداندار پرداختند. در این مطالعه، مدل‌سازی هیدرولیکی سرریز پلکانی دنداندار به صورت سیستم جریان دو فازی انجام پذیرفت. با بررسی پارامترهای مربوط به پدیده کاویتاسیون و تعیین شاخص کاویتاسیون و غلظت هوا بالای ۸ درصد مشخص گردید که به دلیل شکل خاص دندانها که باعث ایجاد اختلاط بیشتر آب و هوا و افزایش درصد غلظت هوا شده،

باشند، کاویتاسیون بخاری و اگر با گاز دیگری پر شده باشند، کاویتاسیون گازی صورت می‌گیرد [۳]. از سوی دیگر، سال‌های زیادی است که حوادث مربوط به پدیده کاویتاسیون ذهن مهندسان را در نقاط مختلف جهان به خود معطوف ساخته است [۴].

کاروالیو و مارتینز^۱ (۲۰۰۹)، پرش هیدرولیکی در سرریزهای پلکانی را به صورت تحلیلی، فیزیکی و عددی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با استفاده از فرمول‌های کلاسیک پرش هیدرولیکی، نمونه اصلی را به صورت تئوری طراحی کردند [۵].

فلدر و چانسون^۲ (۲۰۱۰) با انجام مطالعات آزمایشگاهی بر روی سرریزهای پلکانی نشان دادند که هواگیری جریان بر طراحی ارتفاع دیوارهای جانبی و پتانسیل کاویتاسیون تأثیرگذار است و میزان استهلاک انرژی، پارامتر اصلی برای طراحی سازه مستهلک‌کننده انرژی در پایاب می‌باشد [۶].

فریزل^۳ و همکاران (۲۰۱۳)، به بررسی پدیده کاویتاسیون در سرریزهای پلکانی پرداختند. در نهایت، یک رابطه بین شاخص کاویتاسیون بحرانی و فاکتور اصطکاک معمول نشان داده شد. از سوی دیگر، مشاهده شد پدیده کاویتاسیون در سرریزهای پلکانی حالت بحرانی‌تری دارد [۷].

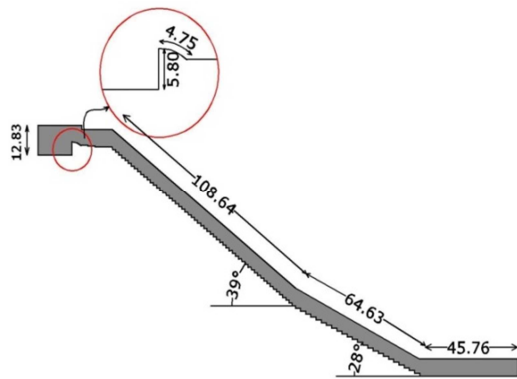
محققان در سال ۲۰۱۳، به بررسی تأثیر حضور سرریزهای پلکانی گابیونی و سرریزهای سنگی بر الگوی جریان و آبشستگی پایین دست سرریز، فرآیند آبشستگی، انواع پرش هیدرولیکی، ریخت‌شناسی حوضچه آرامش و الگوی جریان را مورد بررسی قرار دادند. بررسی‌ها نشان داد که نوع رژیم جریان بستگی شدیدی به فرآیند آبشستگی دارد و عمق آبشستگی زمانی که جریان غیرریزشی است سریعاً افزایش می‌یابد [۸].

¹- Carvalho and Martins

²- Felder and Chanson

³- Frizell

۹ حالت، بررسی تأثیر مدل‌های آشفتگی مختلف در مشخصات جریان و تأثیر مشخصات جریان بر عدد کاویتاسیون می‌باشد. برای این منظور، سرریز سد سیاه بیشه با سه مدل آشفتگی K-ε با مدل‌های استاندارد و RNG و K-ω و سه دبی شامل میانگین دبی حداقل (۱۵۰ مترمکعب بر ثانیه)، میانگین دبی حداکثر (۱۷۰ مترمکعب بر ثانیه) و دبی سیلاب (۲۰۳ مترمکعب بر ثانیه) در نظر گرفته شده‌اند. در نهایت، پس از تجزیه و تحلیل، خروجی‌هایی نظیر توزیع فشار، توزیع سرعت، نمودار فشار، نمودار سرعت و نمودار شاخص کاویتاسیون، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند (شکل ۱). حالت‌های اشاره شده در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱- مشخصات هندسی سرریز سد سیاه بیشه

امکان تشکیل پدیده کاویتاسیون در این نوع سرریزها کاهش می‌یابد [۱۳].

پژوهشگران به مطالعه عددی و تحلیلی پدیده کاویتاسیون در سرریزها با سرعت سیال بالا پرداختند. در این مطالعه راه حلی جهت کاهش پدیده کاویتاسیون ارائه شد [۱۴].

به دلیل پیچیدگی جریان و نیز شرایط مرزی در سرریزهای پلکانی، مطالعات عددی در این زمینه بسیار محدود بوده است. در تحقیق حاضر سعی شده با استفاده از مدل‌سازی سه بعدی ویژگی‌های اصلی جریان و انواع مدل آشفتگی و عدد کاویتاسیون در سرریز پلکانی سد سیاه بیشه تعیین و پیش‌بینی گردد. همچنین مدل آشفتگی مناسب در سرریز سد پلکانی سیاه بیشه معرفی شده است.

۲- مواد و روش‌ها

در مطالعه حاضر، به منظور بررسی مقایسه‌ای انواع مدل‌های آشفتگی مختلف و پدیده کاویتاسیون در سرریزهای پلکانی در ابتدا سرریز سد سیاه بیشه در ۹ حالت مختلف با استفاده از بسته نرم‌افزاری Fluent به صورت سه بعدی شبیه‌سازی شد. هدف از شبیه‌سازی این

جدول ۱- پارامترهای مورد بررسی

شماره	مدل آشفتگی	دبی (m ³ /s)
۱	K-ε-Standard	۱۵۰
۲	K-ε-Standard	۱۷۰
۳	K-ε-Standard	۲۰۳
۴	K-ε-RNG	۱۵۰
۵	K-ε-RNG	۱۷۰
۶	K-ε-RNG	۲۰۳
۷	K-ω	۱۵۰
۸	K-ω	۱۷۰
۹	K-ω	۲۰۳

مرکز تحقیقات آب وزارت نیرو در سال ۱۳۸۳ ساخت مدل فیزیکی سد سیاه بیشه را در دو مدل تخلیه

۳- مشخصات عمومی سرریز سد سیاه بیشه

نوع سنگریزه‌ای با روکش بتنی، با ارتفاع ۱۰۲ متر، پهنای سد در پی ۳۸۲ متر، حجم مفید مخزن ۳/۸ میلیون مترمکعب، حوزه آبریز ۹۳/۸ کیلومترمربع، متوسط دبی سالانه ۴۹/۲ میلیون مترمکعب، نوع سرریز آزاد پلکانی واقع در جناح چپ می‌باشد (شکل ۲).

سد بالا و پایین در مقیاس یک پانزدهم و یک بیستم شروع کرد. سد بالا از نوع سنگریزه‌ای با روکش بتنی، با ارتفاع ۸۲/۵ متر، پهنای سد در پی ۲۱۵ متر، حجم مفید مخزن ۳/۶ میلیون مترمکعب، حوزه آبریز ۱۹/۳ کیلومترمربع، متوسط دبی سالانه ۱۳/۵ میلیون مترمکعب، نوع سرریز آزاد پلکانی واقع در جناح چپ، سد پایین از



(ب)

(الف)

شکل ۲- نمایی از (الف) سد و (ب) سرریز سیاه بیشه

سرریز برابر ۳۰ متر و از تراز ۱۸۹۹/۹۶ متر شروع و به تراز ۱۸۰۲ متر به بستر حوضچه آرامش منتهی می‌گردد.

۴- شبیه‌سازی احجام محدود

به منظور مدل‌سازی سرریز مورد بررسی در ابتدا هندسه و مش‌بندی مدل در نرم‌افزار Gambit ایجاد شد و پس از آن در نرم‌افزار Fluent فراخوانی گردید. در این بخش، توضیحاتی پیرامون نحوه شبیه‌سازی سرریز توسط نرم‌افزارهای اشاره شده، ارائه گردیده است.

۴-۱- تعیین محدوده هندسی مدل

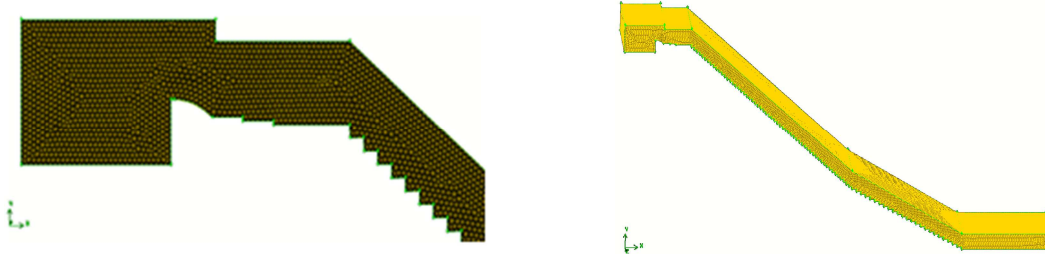
محدوده هندسی سرریز مورد مطالعه در محیط اتوکد با توجه به نقشه‌های موجود از سرریز سد سیاه بیشه به صورت سه‌بعدی ترسیم گردید. سپس فایل ترسیم شده در محیط اتوکد برای شبکه‌بندی و تعیین شرایط مرزی، در محیط Gambit فراخوانده شد.

۴-۲- شبکه‌بندی مدل

نرم‌افزار Gambit قادر به انجام شبکه‌بندی‌های مختلف از قبیل شبکه‌هایی با المان‌های مثلثی و

سیستم تخلیه سیلاب در جناح چپ دریاچه قرار دارد و شامل کانال ورودی، سرریز، تنداب پلکانی، حوضچه آرامش، کانال رابط و تنداب پلکانی منتهی به رودخانه است. تنداب پلکانی پس از تندابی کم شیب در پایین دست سرریز اوجی قرار دارد پله اول به ارتفاع ۰/۳۴ متر و عرض سطح پله ۳/۲۰ متر و بقیه پله‌ها به ارتفاع ۰/۷ متر و عرض کف پله ۲/۱۰ متر می‌باشند. سیلاب حداکثر محتمل برابر ۲۰۳ مترمکعب بر ثانیه و ارتفاع آب روی سرریز برای سیلاب حداکثر محتمل ۲/۹ متر می‌باشد. در تنداب آزاد افت انرژی جریان عبوری در اثر مقاومت ناشی از نیرو یا اصطکاک می‌باشد. با طرح پلکانی بستر تنداب، پله بعنوان زبری باعث تقویت جریان چرخشی می‌شود. الگوی جریان و مکانیسم افت انرژی بر روی تنداب پلکانی نسبت به تنداب‌های معمولی اختلاف اساسی دارد. تنداب پلکانی در ثابت ماندن عمق آب و سرعت در طول تنداب، استهلاک، کاهش انرژی و تأثیرگذاری در مشخصات سازه پایاب تنداب (حوضچه آرامش) بسیار مؤثر می‌باشد. تنداب پلکانی سرریز سد سیاه بیشه پائین هم عرض

استفاده شد. شکل ۳، مدل شبکه‌بندی شده سرریز مورد نظر را با ۴۶۹۴۸۹ تعداد نقطه و ابعاد برابر ۰/۵ متر را در محیط Gambit نشان می‌دهد.



شکل ۳- نمایش شبکه‌بندی مدل سرریز سیاه بیشه

۵- فعال سازی مدل در نرم افزار Fluent

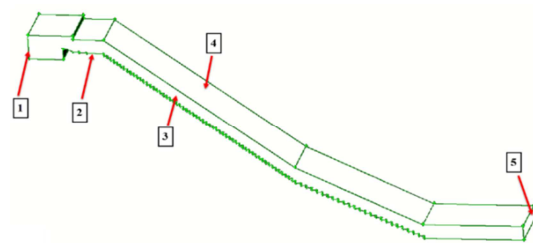
با توجه به اینکه در تحلیل، هدف بررسی جریان چندفازی روی سرریز می‌باشد، بنابراین از مدل مخلوط استفاده شده است و گزینه Slip Velocity غیرفعال گردید. مدل مخلوط یک مدل چندفازی ساده است که می‌تواند به روش‌های مختلف استفاده شود. این مدل را می‌توان در مدل جریان‌های چندفازی که در آن‌ها فازها با سرعت‌های متفاوت حرکت می‌کنند، اما فرض تعادل محلی در طول‌های کوتاه حجمی برقرار است، به کار برد. مدل مخلوط را می‌توان در مدل جریان‌های چندفازی همگن با جفت بسیار قوی و فازهای در حال حرکت با سرعت یکسان استفاده کرد. در این جریان، مقدار بالای تلاطم مانع از رشد بالای حباب‌ها می‌شود، بنابراین جاذبه اهمیتی ندارد و حل برای سرعت لغزشی لازم نیست. چون در این مطالعه سه فاز آب، هوا و بخار می‌بایست معرفی شود، تعداد فازها در بخش مدل ۳ فاز وارد شد. همچنین برای محاسبات چندفازی باید از حل‌کننده مبتنی بر فشار استفاده نمود (FLUENT, 2006). در زمان شروع جریان (زمان صفر) مخزن مدل دارای آب می‌باشد، سپس با توجه به گام زمانی تعریف شده حل معادله جریان به صورت غیرماندگار و تکراری شروع می‌شود تا جریان به حالت ماندگار برسد. انتخاب گام زمانی کوچک باعث طولانی شدن و انتخاب گام زمانی بزرگ باعث واگرا شدن

چهارضلعی (برای هندسه‌های دوبعدی) و چهاروجهی، شش وجهی، هرمی یا گوه‌ای (برای هندسه‌های سه‌بعدی) می‌باشد. برای شبکه‌بندی مدل از المان‌های چهارگوشه

در تحلیل احجام محدود این مطالعه، ابتدا مدل‌ها با المان‌های درشت (تعداد کم المان‌ها) تحلیل شدند و یکی از کمیت‌های خروجی مثلاً مقدار حداکثر فشار ایجاد شده در یک نقطه دلخواه از مدل یادداشت شد. سپس المان‌ها ریزتر شدند و مسئله مجدداً تحلیل شد. فرآیند ریزتر کردن المان‌ها را تا جایی ادامه یافت که اختلاف میان نتایج بسیار کم شود. مش‌بندی یا شبکه‌بندی که به نمایندگی از مدل مورد مطالعه قرار گرفت، به اندازه کافی خوب می‌باشد به طوری که این اطمینان را به وجود می‌آورد که نیروهای اعمال شده به طور دقیق محاسبه شده‌اند.

۴-۳- شرایط مرزی مدل

یکی از مراحل مهم پس از شبکه‌بندی مدل تعیین نوع شرایط مرزی می‌باشد. با توجه به شکل ۴، شرایط مرزی در نرم‌افزار Gambit شامل شرط مرزی ورودی، شرط مرزی خروجی، شرط مرزی دیواره، شرط مرزی فشار معلوم، شرط مرزی تقارن، شرط مرزی تکراری می‌باشد.



شکل ۴- شرایط مرزی در محیط Gambit

نمی‌باشد. به طور معمول برای موارد پیچیده‌تر با افت فشار شدید یا نسبت چگالی مایع- بخار بالا، ضرایب زیر تخفیف باید بین ۰/۲ تا ۰/۱ کاهش پیدا کند. همچنین در بخش Monitor Residual ترسیم باقیمانده در حین محاسبه فعال گردید و مقدار 1×10^{-5} وارد شد. در قسمت Iterate و Number of Iterate تعداد ۵۰۰ مرتبه تکرار برای محاسبه اعمال و تحلیل گردید.

۶- اعتبارسنجی مدل عددی

اعتبارسنجی روش شبیه‌سازی مورد استفاده، به کمک مطالعه آزمایشگاهی و عددی بومباردلی^۴ و همکاران (۲۰۱۰) انجام شد [۲]. مدل آزمایشگاهی سرریز برای شبیه‌سازی نیمرخ سطح آب، از روش دوفازی VOF با دو مدل آشفتگی K-ε با مدل‌های استاندارد و RNG به کار رفت. ارتفاع تندآب سرریز برابر ۲/۹ متر با شیب ۱ عمودی و ۰/۷۵ افقی (زاویه نسبت به افق برابر ۵۳ درجه)، عرض سرریز برابر ۱ متر و طول حوضچه برابر ۵ متر و مقدار دبی عبوری برابر ۰/۱۸ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. در شکل ۵ مدل فیزیکی سرریز سد و در شکل ۶ ابعاد و هندسه سرریز مشاهده می‌گردد.



شکل ۵- مدل آزمایشگاهی سرریز [۲]

به منظور تهیه هندسه میدان جریان و مش‌بندی از نرم‌افزار Gambit و به منظور مدل‌سازی هیدرولیکی از نرم‌افزار Fluent استفاده شده است. در ضمن، جزئیات مربوط به روند مدل‌سازی مورد استفاده به‌طور کامل در بخش ۴ ارائه شد. مدل مورد بررسی در مطالعه اشاره شده

4- Bombardelli

جواب‌ها می‌شود. برای تعیین کمیت‌های آشفته از مدل‌های توربولانس K-ε استاندارد و RNG و K-ω همراه با توابع دیواره‌ای استاندارد استفاده گردید که این توابع برای مسائل اختلاط کاملاً اثربخش خواهد بود.

۵-۱- مشخصات مصالح و فازبندی

در بخش مشخصات مصالح به معرفی مصالح آب، هوا و بخار آب جهت شبیه‌سازی پدیده کاویتاسیون پرداخته شد. فاز هوا به صورت پیش فرض معرفی شده اما فاز آب و بخار آب تعریف گردید. جهت تعریف آب از گزینه Water liquid و جهت تعریف بخار آب از گزینه Water Vapor استفاده شد. آب به عنوان فاز اول و هوا و بخار آب به عنوان فاز دوم انتخاب شدند. جهت فعال کردن کاویتاسیون از گزینه Interaction استفاده شد و سپس گزینه کاویتاسیون فعال گردید. فشار بخار مایع جهت اعمال کاویتاسیون برای دمای ۲۰ درجه که مقدار آن برابر ۲۳۳۸/۸ پاسکال می‌باشد در نظر گرفته شد.

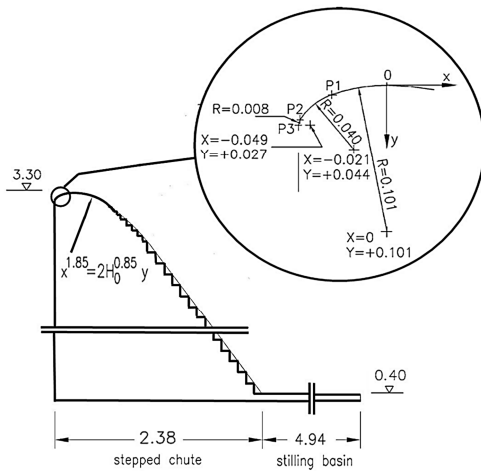
۵-۲- شرایط مرزی

به منظور اعمال شرایط مرزی مدل اختلاط چندفازی، باید شرایط را برای مخلوط (شرایطی که کلیه فازها اعمال می‌شود) تنظیم کرد. همچنین شرایطی که مخصوص فازهای اولیه و ثانویه است نیز باید اعمال شود. در این مساله، شرایط مرزی فقط برای اختلاط و فاز ثانویه دو مرز لازم است. در بخش ورودی سرریز از ورودی سرعت استفاده گردید که میزان سرعت‌های ۰/۳۹، ۰/۴۴۲ و ۰/۵۲۸ متر بر ثانیه در این بخش وارد شد.

۵-۳ الگوریتم‌های حل مسئله

الگوریتم‌های حل هم‌زمان سرعت- فشار (PISO و SIMPLE) استفاده شد. به‌کاربردن روش SIMPLE و PISO با توجه به اینکه زمان محاسبات بیشتری نسبت به روش SIMPLE به‌ویژه در تحقیق حاضر که به فضای محاسبات بزرگ و پیچیده‌ای احتیاج دارند، مقرون به‌صرفه

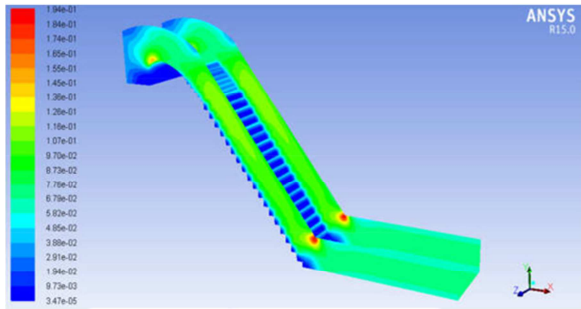
می‌گیرد، نسبت به نتایج آزمایشگاهی از تطابق نسبتاً خوب و قابل قبولی برخوردار می‌باشد.



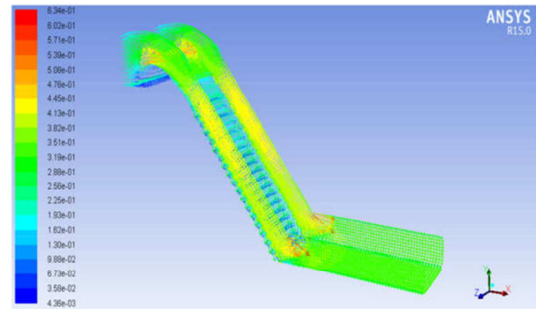
شکل ۶- مشخصات هندسی سرریز [۲]

با توجه به مشخصاتی که به آن‌ها اشاره شد، با استفاده از روش عددی به‌کاربرده شده در مطالعه حاضر شبیه‌سازی گردید و خروجی آن که شامل نمودار سرعت در سه طول ۰/۷۴، ۰/۸۴ و ۱/۳۴ متر از سرریز می‌باشد، استخراج گردید. در شکل ۷ مقدار توزیع فشار و سرعت در طول سرریز نشان داده شده است.

با توجه به نمودار سرعت نشان داده شده در شکل ۸ و مقایسه مدل آزمایشگاهی و مدل عددی شبیه‌سازی شده توسط نرم افزار Fluent، مشاهده می‌شود که نتایج آزمایشگاهی نزدیک به نمودار استخراج شده از نرم‌افزار می‌باشد؛ در مجموع نتایج حاصل از روش مورد استفاده در این پژوهش که با استفاده از نرم‌افزار Fluent انجام

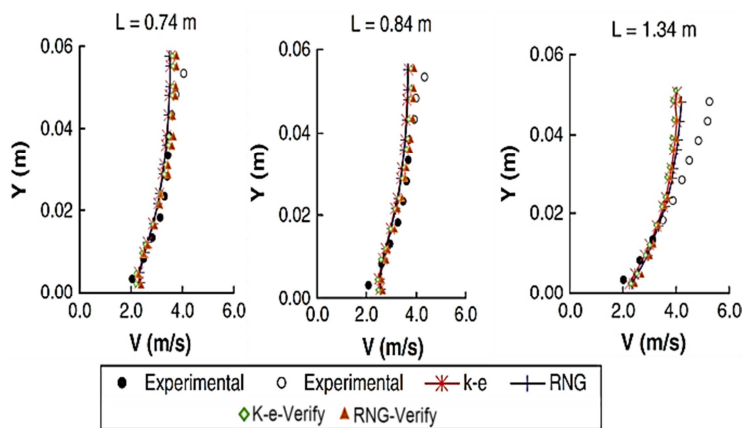


(ب)



(الف)

شکل ۷- توزیع (الف) سرعت و (ب) فشار در مدل شبیه‌سازی شده



شکل ۸- مقایسه نمودار سرعت در مدل شبیه‌سازی شده برای مدل‌سازی آزمایشگاهی و عددی

در پایان نیز مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهند گرفت. در این نمودارها فشار برحسب پاسکال و سرعت برحسب متر بر ثانیه نشان داده شده است. لازم به توضیح است در نمودار شاخص کاویتاسیون مقدار مجاز، مطابق توصیه

۶- نتایج مطالعات پارامتریک

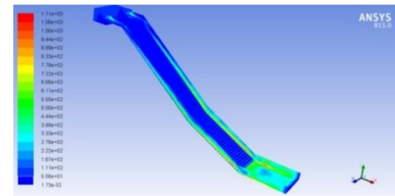
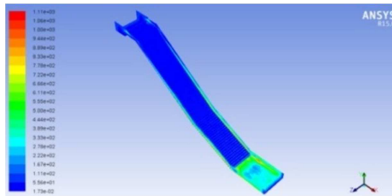
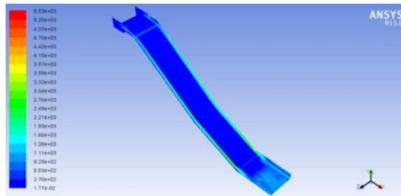
خروجی‌های حاصل از تحلیل در قالب توزیع فشار، توزیع سرعت و شاخص کاویتاسیون برای هریک از مدل‌ها به صورت جداگانه در شکل‌های ۹ تا ۱۱، ارائه شده است و

مراجع علمی با خط قرمز نشان داده شده است که مقدار مجاز آن برابر ۰/۲ می‌باشد.

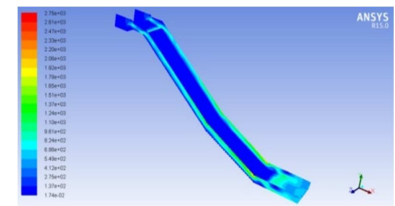
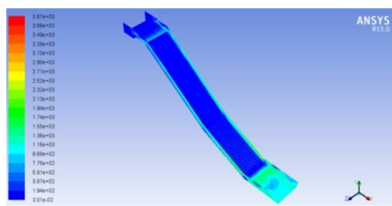
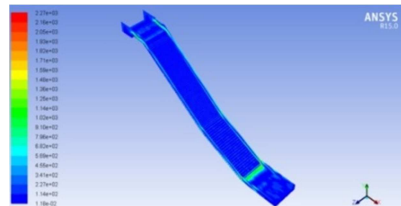
دبی ۲۰۳ مترمکعب بر ثانیه

دبی ۱۷۰ مترمکعب بر ثانیه

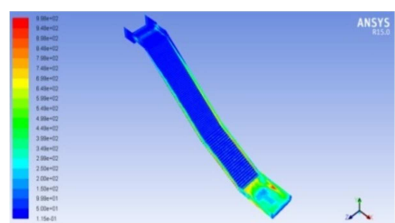
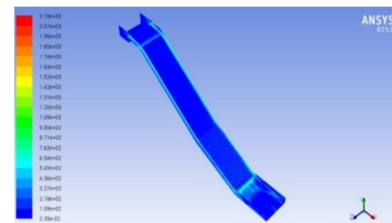
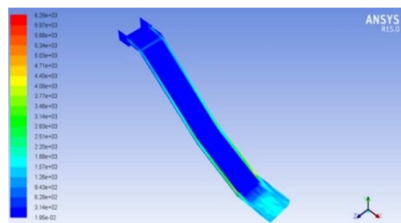
دبی ۱۵۰ مترمکعب بر ثانیه



مدل آشفتگی K-ε Standard



مدل آشفتگی K-ε RNG



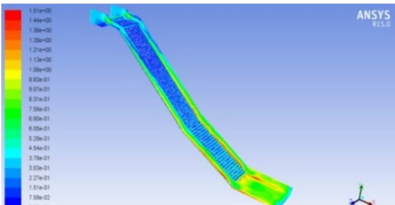
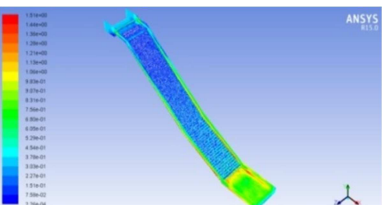
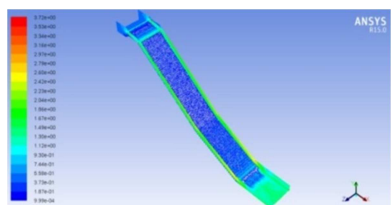
مدل آشفتگی K-ω

شکل ۹- توزیع فشار ایجاد شده در طول سرریز با مدل‌های مختلف آشفتگی

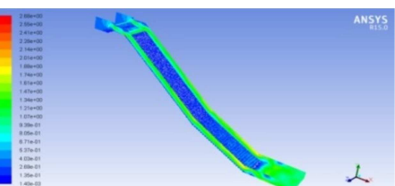
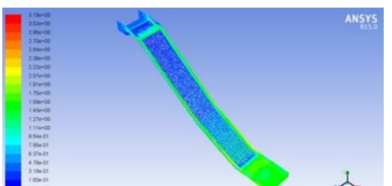
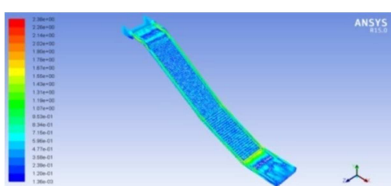
دبی ۲۰۳ مترمکعب بر ثانیه

دبی ۱۷۰ مترمکعب بر ثانیه

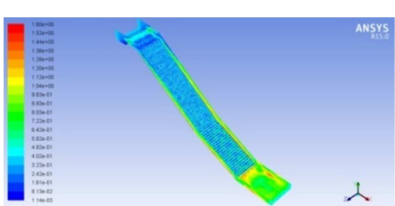
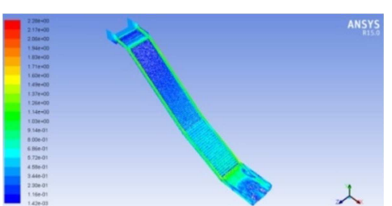
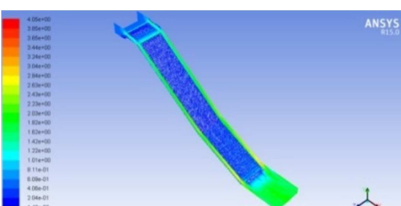
دبی ۱۵۰ مترمکعب بر ثانیه



مدل آشفتگی K-ε Standard

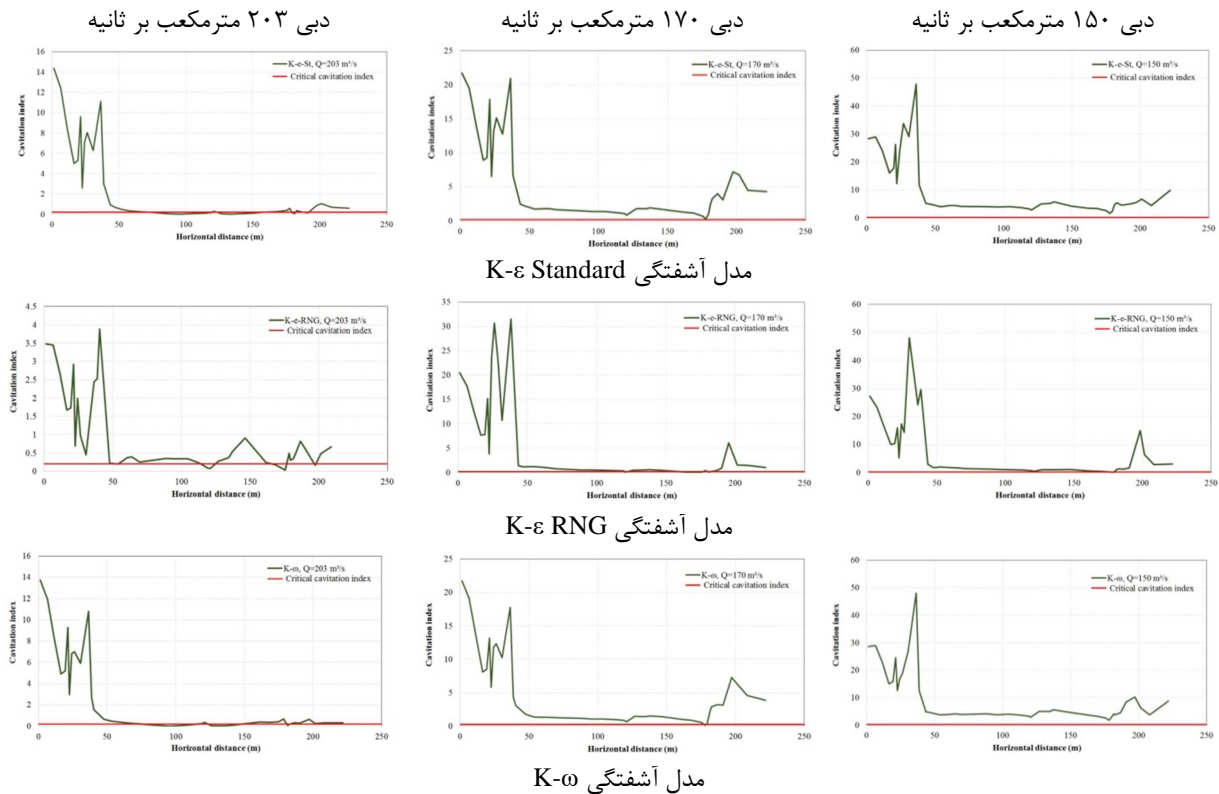


مدل آشفتگی K-ε RNG



مدل آشفتگی K-ω

شکل ۱۰- توزیع سرعت جریان ایجاد شده در طول سرریز با مدل‌های مختلف آشفتگی



شکل ۱۱- شاخص کاویتاسیون در طول سرریز با مدل‌های مختلف آشفتگی

۸- تفسیر نتایج

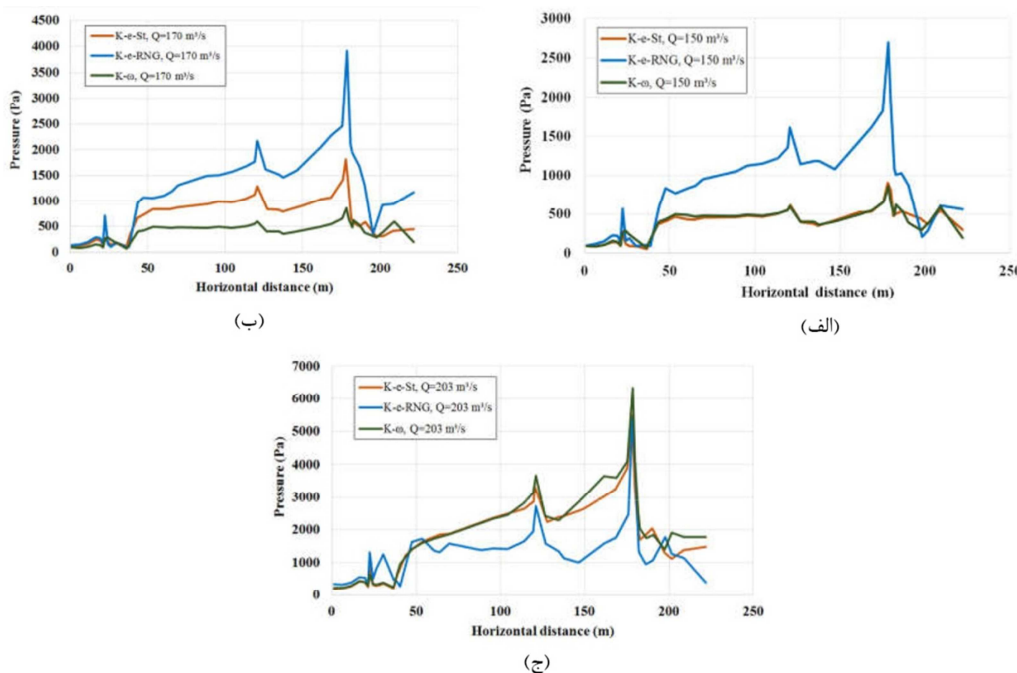
زیادی بر میزان تغییرات فشار وارد بر طول سرریز داشته است. از میان مدل‌های آشفتگی انتخاب شده مدل آشفتگی K-ε استاندارد و K-ω در بیشتر حالت‌ها بسیار نزدیک به هم بوده و تغییرات فشار مدل آشفتگی K-ε با مدل RNG از نتیجه کار دور بوده است.

از سوی دیگر با توجه به خروجی‌های کانتور فشار ارائه شده در بخش قبل این نتیجه حاصل می‌شود که مدل آشفتگی K-ε استاندارد و K-ω، وجود حفره‌های هوا در کنج پله‌ها را به خوبی مدل کرده است؛ این در حالی است که در مدل آشفتگی K-ε با مدل RNG قادر به دیدن هوا در این نقاط نبوده است. قابل ذکر است که در این مطالعه از مدل تنش رینولدز نیز در محاسبات استفاده گردید. اما در این مدل‌ها، این مدل آشفتگی جوابگو نبوده و به حالت واگرایی رسیده است. همچنین بیشترین مقدار فشار وارد بر سرریز در بخش انتهایی سرریز و محل برخورد آخرین پله با حوضچه می‌باشد.

پس از ارائه خروجی‌های حاصل از تحلیل مدل‌های عددی سرریز مورد بررسی، در این بخش به تجزیه و تحلیل نتایج حاصل پرداخته شده است. به منظور مقایسه رفتار سرریز در ۹ حالت تعریف شده، از معیار تغییرات فشار، سرعت و شاخص کاویتاسیون استفاده می‌گردد که در ادامه به مقایسه هریک از این خروجی‌ها پرداخته شده است.

۸-۱- مقایسه مقادیر فشار

در شکل‌های ۱۹ تا ۲۱ به مقایسه مقادیر فشار ایجاد شده در مدل‌های عددی سرریز سد مورد بررسی، با توجه به خروجی‌های ارائه شده برای سه مدل آشفتگی K-ε استاندارد، RNG و K-ω و برای سه دبی ۱۷۰، ۱۵۰ و ۲۰۳ مترمکعب بر ثانیه با هدف مقایسه کلی تغییرات فشار ایجاد شده در ۴۱ نقطه پرداخته شده است. همانطور که مشاهده می‌شود انتخاب نوع مدل‌های آشفتگی تأثیر

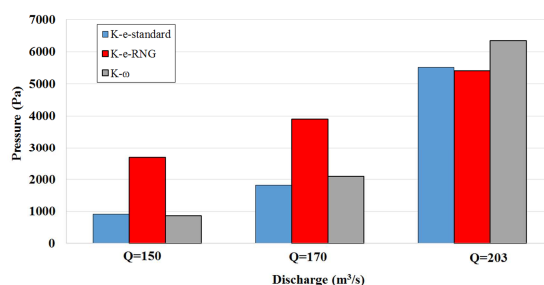


شکل ۱۲- مقایسه تغییرات فشار در سرریز با هدف تغییر در مدل آشفتگی با دبی (الف) ۱۵۰، (ب) ۱۷۰ و (ج) ۲۰۳ مترمکعب بر ثانیه

۲-۸- مقایسه مقادیر سرعت

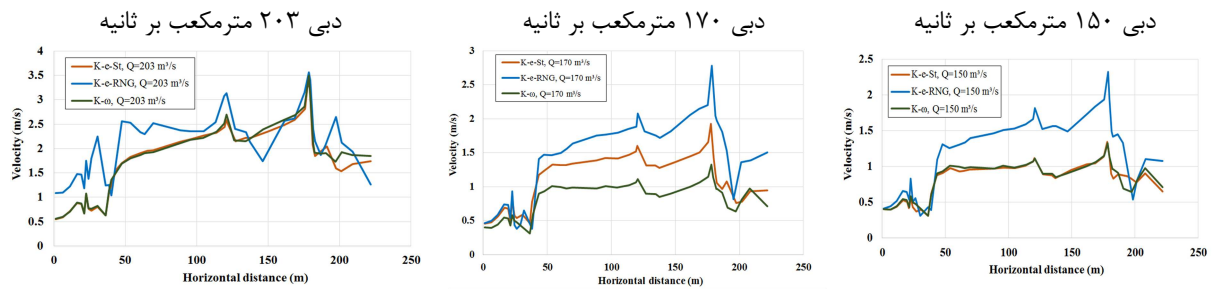
در شکل ۱۴ به مقایسه مقادیر سرعت ایجاد شده در طول سرریز مورد بررسی برای ۹ حالت مختلف پرداخته شده است. با توجه به خروجی‌های ارائه شده، مقدار سرعت آب در طول سرریز با انتخاب سه مدل آشفتگی K-ε استاندارد و RNG و K-ω برای حالت‌های مختلف، متفاوت می‌باشد. در سرعت‌های مورد بررسی، مدل‌های K-ε استاندارد و K-ω در تمامی دبی‌ها بسیار نزدیک به هم بوده و استفاده از مدل آشفتگی K-ε و مدل RNG نسبت به دو مدل دیگر تفاوت داشته است. این تفاوت در کانتور سرعت که در بخش ۵ ارائه گردید، قابل مشاهده است. بدین صورت که مدل‌های آشفتگی K-ε استاندارد و K-ω جریان آب بر روی سرریز را به خوبی نشان داده، اما مدل آشفتگی K-ε و مدل RNG قادر به مشاهده این جریان‌ها بر روی سرریز نمی‌باشد. از مقایسه نتایج می‌توان دریافت که مدل‌های آشفتگی K-ε استاندارد و K-ω شباهت زیادی به واقعیت داشته و جریان‌های گردابی ایجاد شده در داخل پله‌ها را به خوبی

در شکل ۱۳، به مقایسه مقادیر بیشینه فشار ایجاد شده در حالت‌های مختلف پرداخته شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش میزان دبی، میزان فشار وارد بر سرریز نیز افزایش می‌یابد. به طوری که میزان فشار در حالت با مدل آشفتگی K-ε استاندارد با دبی ۲۰۳ مترمکعب بر ثانیه نسبت به دبی‌های ۱۷۰ و ۱۵۰ به ترتیب حدوداً به میزان ۳ و ۶ برابر افزایش یافته است. همچنین میزان فشار برای مدل آشفتگی K-ε با مدل RNG و با دبی ۲۰۳ مترمکعب بر ثانیه نسبت به دبی‌های ۱۷۰ و ۱۵۰ به ترتیب حدوداً به میزان ۱/۳ و ۲ برابر بیشتر شده است. میزان فشار برای مدل آشفتگی K-ω با دبی ۲۰۳ مترمکعب بر ثانیه نسبت به دبی‌های ۱۷۰ و ۱۵۰ به ترتیب حدوداً به میزان ۳ و ۷/۳ برابر افزایش یافته است.



شکل ۱۳- نمودار میله‌ای بیشینه فشار ایجاد شده در مدل‌های عددی سرریز سد مورد مطالعه

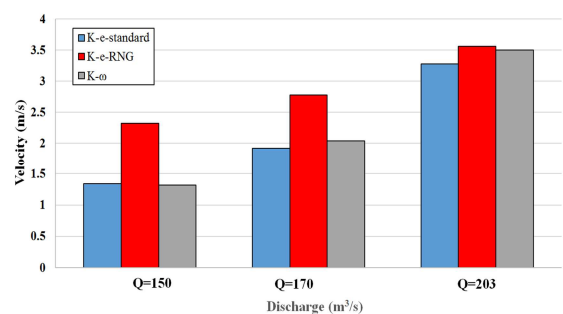
نمایش می‌دهد. همچنین بیشترین مقدار سرعت در طول سرریز به خصوص در بخش انتهایی سرریز می‌باشد.



شکل ۱۴- مقایسه تغییرات سرعت در سرریز با هدف تغییر در مدل آشفتگی مختلف

در شکل ۱۶ به مقایسه مقادیر شاخص کاویتاسیون به دست آمده در ۴۱ نقطه مختلف سرریز سد مورد مطالعه پرداخته شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با تغییر در نوع مدل آشفتگی، میزان شاخص کاویتاسیون در هر نقطه از سرریز دچار تغییر می‌شود، بنابراین انتخاب مدل آشفتگی به منظور بررسی کاویتاسیون از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. همانطور که مشاهده می‌شود، مدل‌های K-ε استاندارد و K-ω در تمامی دبی‌ها بسیار نزدیک به هم بوده و استفاده از مدل آشفتگی K-ε و مدل RNG نسبت به دو مدل دیگر تفاوت داشته است. همچنین با توجه به نمودارها، شاخص کاویتاسیون در بیشتر نقاط از حد بحرانی تجاوز نموده که بیانگر این می‌باشد در این نقاط پدیده کاویتاسیون اتفاق می‌افتد. در سرریز سد سیاه بیشه با انتخاب مدل‌های آشفتگی K-ε استاندارد و K-ω برای دبی‌های ۱۵۰ و ۱۷۰ مترمکعب بر ثانیه پدیده کاویتاسیون اتفاق نیفتاد، اما با اعمال دبی سیلاب (۲۰۳ مترمکعب بر ثانیه) شاخص کاویتاسیون از حد مجاز کمتر شد و شاهد این پدیده در طول سرریز بودیم. پدیده کاویتاسیون الزاماً در مکان‌های با سرعت بالا رخ نمی‌دهد؛ با وجود آنکه در فاصله ۱۷۸ متری سرریز، حداکثر سرعت اتفاق افتاده است، لیکن به دلیل افزایش فشار در این محدوده، کاویتاسیون حالت بحرانی دارد. بنابراین مکان‌هایی که در معرض کاویتاسیون قرار دارند در پایین دست تاج سرریز و در محدوده ۱۷۶ متری می‌باشد. شاخص کاویتاسیون از مقدار بحرانی ۰/۲ کمتر شده است.

به منظور بررسی دقیق‌تر اثر مدل‌های آشفتگی و دبی‌های مختلف در سرریز در نمودار مقایسه‌ای شکل ۱۵ مقادیر حداکثر سرعت ایجاد شده در طول سرریز با یکدیگر مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود افزایش میزان دبی، افزایش سرعت در طول سرریز را به دنبال خواهد داشت. به طوری که میزان سرعت در حالت با مدل آشفتگی K-ε استاندارد با دبی ۲۰۳ مترمکعب بر ثانیه نسبت به دبی‌های ۱۷۰ و ۱۵۰ به ترتیب حدوداً به میزان ۱/۷ و ۲/۴ برابر افزایش یافته است. همچنین میزان سرعت برای مدل آشفتگی K-ε با مدل RNG و با دبی ۲۰۳ مترمکعب بر ثانیه نسبت به دبی‌های ۱۷۰ و ۱۵۰ به ترتیب حدوداً به میزان ۱/۲ و ۱/۵ برابر بیشتر شده است. میزان سرعت برای مدل آشفتگی K-ω با دبی ۲۰۳ مترمکعب بر ثانیه نسبت به دبی‌های ۱۷۰ و ۱۵۰ به ترتیب حدوداً به میزان ۱/۷ و ۲/۶ برابر افزایش یافته است.

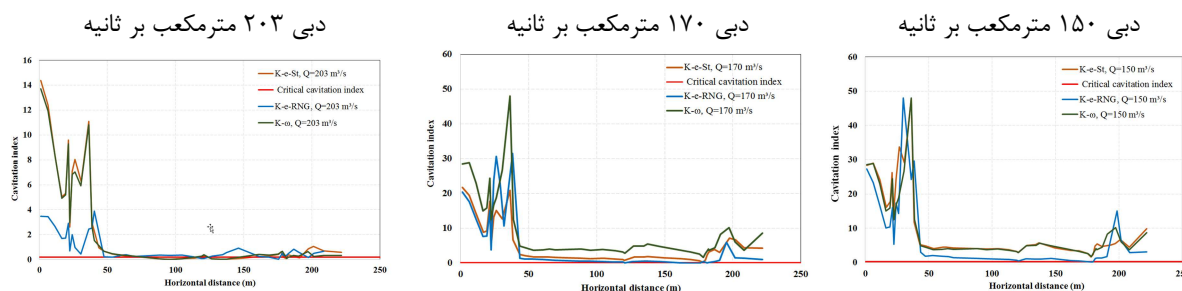


شکل ۱۵- مقایسه بیشینه سرعت در مدل‌های عددی سرریز سد مورد مطالعه

۸-۳- مقایسه مقادیر شاخص کاویتاسیون

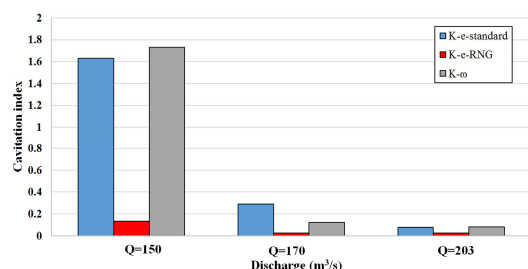
می‌شود در نقاط مستعد بروز کاویتاسیون باید تلاش شود این نواحی با انحنای کمتری طراحی شوند.

لذا با توجه به معیار فالوی لازم است راهکارهایی جهت جلوگیری از پدیده کاویتاسیون در این محدوده پیش‌بینی گردد. با توجه به تغییرات محسوس فشار و سرعت توصیه



شکل ۱۶- مقایسه تغییرات شاخص کاویتاسیون در سرریز با هدف تغییر در مدل آشفتگی مختلف

افزایش دبی احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون بیشتر می‌شود. در کنار احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون محدوده احتمال وقوع کاویتاسیون نیز بیشتر شده است. با افزایش دبی، شاخص کاویتاسیون کاهش یافته و احتمال وقوع خوردگی با افزایش دبی نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۱۷- مقایسه حداقل شاخص کاویتاسیون در مدل‌های عددی سرریز سد مورد مطالعه

۹- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

با توجه به مجموع نتایج به‌دست آمده از مدل‌های عددی شبیه‌سازی شده در سرریز سد سیاه بیشه با دبی ۲۰۳ مترمکعب بر ثانیه در ناحیه پایین‌دست سرریز پلکانی احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون محتمل‌تر و بحرانی‌تر است. با دانستن این نکته می‌توان در مکان‌های مناسب از سیستم هوادهی مناسب استفاده کرد تا با کاهش سرعت در نواحی مورد نظر، احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون را کاهش دهند. همچنین روش‌های عددی نشان می‌دهد که برای ارزیابی مجدد یک سد در زمانی که سرریز بخواهد سیلاب‌های بیشتری را از خود عبور دهد

میزان حداقل شاخص کاویتاسیون برای دبی ۱۵۰ مترمکعب بر ثانیه و برای حالت با مدل آشفتگی K-ε استاندارد برابر ۱/۶۳، برای مدل آشفتگی K-ε با مدل RNG برابر ۰/۱۳۳ و مدل آشفتگی K-ω به ترتیب برابر ۱/۷۳ می‌باشد. میزان حداقل شاخص کاویتاسیون برای دبی ۱۷۰ مترمکعب بر ثانیه و برای حالت با مدل آشفتگی K-ε استاندارد برابر ۰/۲۸۹، برای مدل آشفتگی K-ε با مدل RNG برابر ۰/۰۲۵۹ و مدل آشفتگی K-ω برابر ۰/۱۲۴ می‌باشد و میزان حداقل شاخص کاویتاسیون برای دبی ۲۰۳ مترمکعب بر ثانیه و برای حالت با مدل آشفتگی K-ε استاندارد برابر ۰/۰۷۹، برای مدل آشفتگی K-ε با مدل RNG برابر ۰/۰۲۶۹ و مدل آشفتگی K-ω برابر ۰/۰۸۷ می‌باشد.

به منظور بررسی دقیق‌تر اثر افزایش میزان دبی و تغییر در مدل آشفتگی مختلف بر سرریز در نمودار شکل ۱۷، مقادیر حداقل شاخص کاویتاسیون ایجاد شده در طول سرریز با یکدیگر مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد در حالت دبی سیلاب (۲۰۳ مترمکعب بر ثانیه) دارای شاخص کاویتاسیون بحرانی می‌باشد. همچنین میزان شاخص کاویتاسیون برای مدل آشفتگی K-ε استاندارد دارای مقادیر بحرانی‌تری نسبت به مدل‌های آشفتگی K-ε با مدل RNG و K-ω دارد. بنابراین با افزایش دبی، فشار مثبت افزایش و فشار منفی کاهش می‌یابد و کاهش فشار منفی بیانگر این است که با

کاویتاسیون الزاماً در مکان‌های با سرعت بالا رخ نمی‌دهد؛ با وجود آنکه در فاصله ۱۷۸ متری سرریز، حداکثر سرعت اتفاق افتاده است، لیکن به دلیل افزایش فشار در این محدوده، کاویتاسیون حالت بحرانی دارد.

۴- مکان‌هایی که در معرض کاویتاسیون قرار دارند در پایین‌دست تاج سرریز و در محدوده ۱۷۶ متری می‌باشد. شاخص کاویتاسیون از مقدار بحرانی $0/2$ کمتر شده است. لذا با توجه به معیار فالوی لازم است راهکارهایی جهت جلوگیری از پدیده کاویتاسیون در این محدوده پیش‌بینی گردد. با توجه به تغییرات محسوس فشار و سرعت توصیه می‌شود در نقاط مستعد بروز کاویتاسیون باید تلاش شود این نواحی با انحنای کمتری طراحی شوند.

۵- در حالت دبی سیلاب (۲۰۳ مترمکعب بر ثانیه) دارای شاخص کاویتاسیون بحرانی می‌باشد. همچنین میزان شاخص کاویتاسیون برای مدل آشفتگی $K-\varepsilon$ استاندارد دارای مقادیر بحرانی‌تری نسبت به مدل‌های آشفتگی $K-\varepsilon$ با مدل RNG و $K-\omega$ دارد. بنابراین با افزایش دبی، فشار مثبت افزایش و فشار منفی کاهش می‌یابد و کاهش فشار منفی بیانگر این است که با افزایش دبی احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون بیشتر می‌شود. در کنار احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون محدوده احتمال وقوع کاویتاسیون نیز بیشتر شده است. با افزایش دبی، شاخص کاویتاسیون کاهش یافته و احتمال وقوع خوردگی با افزایش دبی نیز افزایش می‌یابد.

می‌تواند بهتر از روش‌های آزمایشگاهی و مدل‌های فیزیکی از لحاظ صرفه‌جویی در وقت و هزینه به‌کار رود. در این قسمت به مهمترین نتایج حاصل از تحلیل در مطالعه حاضر ارائه می‌گردند:

۱- انتخاب نوع مدل‌های آشفتگی تأثیر زیادی بر میزان تغییرات فشار وارد بر طول سرریز داشته است. از میان مدل‌های آشفتگی انتخاب شده مدل آشفتگی $K-\varepsilon$ استاندارد و $K-\omega$ در بیشتر حالت‌ها بسیار نزدیک به هم بوده و تغییرات فشار مدل آشفتگی $K-\varepsilon$ با مدل RNG از نتیجه کار دور بوده است.

۲- با تغییر در نوع مدل آشفتگی، میزان شاخص کاویتاسیون در هر نقطه از سرریز دچار تغییر می‌شود، بنابراین انتخاب مدل آشفتگی به منظور بررسی کاویتاسیون از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. همانطور که مشاهده می‌شود، مدل‌های $K-\varepsilon$ استاندارد و $K-\omega$ در تمامی دبی‌ها بسیار نزدیک به هم بوده و استفاده از مدل آشفتگی $K-\varepsilon$ و مدل RNG نسبت به دو مدل دیگر تفاوت داشته است.

۳- شاخص کاویتاسیون در بیشتر نقاط از حد بحرانی تجاوز نموده که بیانگر این می‌باشد در این نقاط پدیده کاویتاسیون اتفاق می‌افتد. در سرریز سد سیاه بیشه با انتخاب مدل‌های آشفتگی $K-\varepsilon$ استاندارد و $K-\omega$ برای دبی‌های ۱۵۰ و ۱۷۰ مترمکعب بر ثانیه پدیده کاویتاسیون اتفاق نیفتاد اما با اعمال دبی سیلاب (۲۰۳ مترمکعب بر ثانیه) شاخص کاویتاسیون از حد مجاز کمتر شد و شاهد این پدیده در طول سرریز بودیم. پدیده

مراجع

- [1] Chanson, H. (2010). *The Hydraulics of Stepped Chutes and Spillways*, Balkema, Lisse, ISBN 9058093522 (hard back).
- [2] Shoja, F., Nikpour, M. R., & Sadeghi, H. (2013). "Determination of Energy Dissipation in stepped spillways Using Finite Element and Finite Volume Methods", *Journal of Civil Engineering and Urbanism*, 3(4), 150-155.
- [3] Bombardelli, F. A., Meireles, I., & Matos, J. (2011). "Laboratory measurements and multi-block numerical simulations of the mean flow and turbulence in the non-aerated skimming flow region of steep stepped spillways", *Environmental Fluid Mechanics*, 11(3), 263-288.
- [4] Asadsangabi, F., Talebbeydokhti, N., & Rahnavard, M. (2014). "Two phase flow modeling in shaft spillways using volume of fluid (VOF) method. IJST", *Transactions of Civil Engineering*, 38(C1), 99-109.
- [5] Carvalho, R. F., & Martins, R. (2009). "Stepped spillway with hydraulic jumps: Application of a numerical model to a scale model of a conceptual prototype", *J. Hydraul Eng*, 135(7), 615-619.
- [6] Felder, S., & Chanson, H. (2016). "Simple design criterion for residual energy on embankment dam stepped spillways", *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(4), 04015062.
- [7] Frizell, K. W., Renna, F. M., & Matos, J. (2013). "Cavitation potential of flow on stepped spillways", *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(6), 630-636.
- [8] Pagliara, S., & Palermo, M. (2013). "Rock Grade Control Structures and Stepped Gabion Weirs: Scour Analysis and Flow Features", *Acta Geophysical. J*, 61(1), 126-150.
- [9] Nikseresht, A. H., Talebbeydokhti, N., & Rezaei, M. J. (2013). "Numerical simulation of two-phase flow on step-pool spillways", *Journal of Sharif University of Technology*, 20(2), 1026-3098.
- [10] Parsaie, A., Dehdar Behbahani, S., & Haghiabi, A. H. (2016). "Numerical modeling of cavitation on spillway's flip bucket", *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 10(4), 438-444.
- [11] Zamani, K. H., & Mousavi, S. M. (2016), "Numerical study of the probability of cavitation in the peak overflow of Seymareh dam", *First National Conference on Applied Research in Civil Engineering (Structural Engineering and Construction Management)*.
- [12] Ansari, M., & Esmaeilpour, M. (2017). "Comparison of two-fluid models and fluid volume in numerical simulation of two-phase flow of stepped spillways in aerated and non-aerated conditions", *Mechanical Engineering Instructor*, 255-265.
- [13] Ranjbar, M., & Ghadampour, Z. (2017). "Investigation of the possibility of cavitation in serrated stepped overflow", *Second National Conference on Civil Engineering and Sustainable Development*.
- [14] Wan, W., Liu, B., & Raza, A. (2018). "Numerical prediction and risk analysis of hydraulic cavitation damage in a high-speed-flow spillway", *Shock and Vibration*, <https://doi.org/10.1155/2018/1817307>.
- [15] FLUENT INC. (2006). *FLUENT 6.3. Users and Tutorial Guide Manual*, Lebanon, USA