

شبیه سازی عددی تأثیر رمپ هواده در کف و داکت در دیواره سرریز بر شاخص خلاءزایی سرریزها با استفاده از مدل Flow 3D

ابراهیم نوحانی^{۱*}، سهراب نصرالهی^۲، ادريس معروفی نیا^۳ و یوسف حسن زاده^۴

*- نویسنده مسئول: استادیار گروه عمران، سازه های هیدرولیکی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دزفول، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، دزفول، ایران. nohani_e@yahoo.com

۲- کارشناس ارشد عمران، سازه های هیدرولیکی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دزفول، دزفول، ایران.

۳- کارشناس ارشد عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مهاباد، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، مهاباد، ایران.

۴- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تبریز، ایران.

تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۱/۴

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۲/۱۱

چکیده

با افزایش جمعیت دنیا و لزوم کنترل و مدیریت منابع آب شیرین ساخت سدهای بزرگ گسترش یافته است. سرریز از اجزای مهم سد است و یکی از مهم ترین خطراتی که آن را تهدید می کند، خلاءزایی می باشد. یکی از راه های بررسی این مشکل و دیگر مسائل سرریزها ساخت مدل آزمایشگاهی است، اما با توجه به پیشرفت علم رایانه در عصر حاضر نرم افزارهایی برای مدل سازی جریان به صورت عددی تهیه شده که در کنار ساخت مدل های آزمایشگاهی برای بررسی رفتارسیالات مفید می باشند. رایج ترین راه مقابله با خسارت های ناشی از خلاءزایی، ساخت انواع هواده در مسیر جریان می باشد. هواده با ایجاد تغییرات در خصوصیات جریان و وارد کردن هوا به داخل آن سبب کاهش و از بین رفتن خسارت های ناشی از این پدیده می شود. در این پژوهش جریان روی سرریز سد آزاد به صورت سه بعدی در نرم افزار Flow-3D مدل و سپس صحت نتایج نرم افزار با توجه به نتایج مدل فیزیکی بررسی شده و در ادامه تأثیر انواع رمپ هواده بر فاکتورهای مؤثر بر خلاءزایی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شاخص خلاءزایی و غلظت هوای موجود در جریان نشان می دهد که سرریز با رمپ در کف و داکت در دیواره، در رمپ اول ۲۲ درصد و در رمپ دوم به ترتیب ۲۲ و ۱۹ درصد شاخص خلاءزایی را افزایش دهد و با افزایش غلظت هوای داخل جریان در بدترین حالت به بیش از هفت درصد، به خوبی می تواند مانع ایجاد خسارت های ناشی از خلاءزایی در سرریز شود.

کلیدواژه ها: سرریز، خلاءزایی، رمپ هواده، غلظت هوای ورودی به جریان، Flow-3D.

مقدمه

با ساخت سدهای بزرگ و مرتفع با دبی سیلابی زیاد بررسی مسائل طراحی و پایداری این سازه اهمیت ویژه ای پیدا کرده است. یکی از مهمترین اجزای یک سد، سرریز آن می باشد. پس از عدم برآورد دقیق ظرفیت سرریزها، خلاءزایی مهمترین عامل تهدید کننده پایداری سرریزها می باشد (Zandi, 2014). در مکان هایی که سرعت جریان سیال بالا می باشد، بر اثر ناهموازی های کف سرریز خطوط جریان از کف بستر جدا شده و در ناحیه زیرین جریان کاهش فشار رخ داده و فشار به حد فشار بخار آب می رسد، در نتیجه حباب های کوییتی در این ناحیه شکل گرفته و این حباب ها پس از انتقال به قسمت هایی با فشار بیشتر منفجر شده و چون سطح تماس حباب ها با بستر کوچک می باشد نیروی فوق العاده ای به بستر وارد شده که تکرار این مسئله سبب آسیب و نهایتاً تخریب کف سرریز می شود (Raisey, 2011). سازه هایی که باعث می شوند غلظت هوای داخل جریان افزایش یابد به شکل ها و ابعاد مختلفی طراحی و ساخته می شوند که رایج ترین شکل آن احداث رمپ در کف و داکت در دیواره می باشد. در این مدل هواده، رمپ باعث جدا شدن هوا از کف شده و داکت هوا را به زیر پرش انتقال می دهد که به این وسیله تغییراتی در شریط جریان ایجاد شده و غلظت هوای داخل جریان بالا می رود که سبب کاهش و از بین رفتن خسارت های ناشی از خلاءزایی می شود. (Vosoughifar et al., 2005). Johnson (1963) نشان داد، در صورتی که خلاءزایی، درون هسته گردابه ها شکل گیرد، عدد خلاءزایی مقدماتی باید کمتر یا برابر یک باشد. Katz و O'hern (1986) در تحقیقات خود نشان دادند، شروع خلاءزایی مقدماتی در ساختمان سه بعدی و درون هسته جدا شده می باشد و نه در هسته گردابه ها. Tabbara et al. (2005) از نرم افزار ADINA برای پیش بینی عددی خصوصیات مهم جریان استفاده کرده و با استفاده از مدل K-ε یک فرآیند دو مرحله ای را برای بهینه ساختن شبیه سازی استفاده کردند که نتایج نشان از توانمندی مدل عددی در پیش بینی خصوصیات مهم جریان داشت. Johnson و Savage (2006) با مقایسه مدل عددی و فیزیکی جریان روی سرریز اوجی با در نظر گرفتن پایاب دریافتند مدل

با ساخت سدهای بزرگ و مرتفع با دبی سیلابی زیاد بررسی مسائل طراحی و پایداری این سازه اهمیت ویژه ای پیدا کرده است. یکی از مهمترین اجزای یک سد، سرریز آن می باشد. پس از عدم برآورد دقیق ظرفیت سرریزها، خلاءزایی مهمترین عامل تهدید کننده پایداری سرریزها می باشد (Zandi, 2014). در مکان هایی که سرعت جریان سیال بالا می باشد، بر اثر ناهموازی های کف سرریز خطوط جریان از کف بستر جدا شده و در ناحیه زیرین جریان کاهش فشار رخ داده و فشار به حد فشار بخار آب می رسد، در نتیجه حباب های کوییتی در این ناحیه شکل گرفته و این حباب ها پس از انتقال به قسمت هایی با فشار بیشتر منفجر شده و چون سطح تماس حباب ها با بستر کوچک می باشد نیروی فوق العاده ای به بستر وارد شده که تکرار این مسئله سبب آسیب و نهایتاً تخریب کف سرریز می شود (Raisey, 2011). سازه هایی که باعث می شوند غلظت هوای داخل جریان افزایش یابد به شکل ها و ابعاد مختلفی طراحی و ساخته می شوند که رایج ترین

خسارت شدید در پایین سرریز را نشان دادند. با این وجود شاخص کاویتاسیون پیش بینی بهتری از سطح کاویتاسیون ارائه می دهد. روش های آماری، تجربی، شبکه عصبی و ترکیبی فازی - عصبی در برآورد هوای مورد نیاز هواده سرریز پرداختند. پس از برآورد دبی هوای مورد نیاز هواده سرریز با استفاده از روش های ذکر شده، خطای روش های مختلف محاسبه گردید و عملکرد آن ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که روش ترکیبی عصبی فازی بهترین عملکرد را دارا می باشد. هدف از انجام این تحقیق بررسی اثر چند نوع هواده در جلوگیری از کاویتاسیون می باشد. در این تحقیق فاکتورهای مؤثر بر شاخص کاویتاسیون یعنی سرعت، فشار و همچنین میزان هوای وارد شده به جریان در پنج حالت بدون هواده، با رمپ در کف، با رمپ کف و داکت در دیواره، با رمپ در دیواره و همچنین با وجود رمپ در کف و دیواره مورد بررسی قرار گرفته تا کارایی هر کدام از این هواده ها در سرریز مشخص شود و سپس تعیین شود کدام یک از این سیستم های هواده می تواند برای جلوگیری از کاویتاسیون در سرریزها مفیدتر باشد.

مواد و روش ها

سد مورد مطالعه

سد مخزنی آزاد در شمال غربی ایران در استان کردستان، شهرستان مریوان در مسیر رودخانه چم گوره از سرشاخه های مهم رودخانه آزاد در مختصات جغرافیایی ۳۵ درجه و ۲۰ دقیقه عرض شمالی و ۴۶ درجه و ۳۲ دقیقه طولی در فاصله ۸۱ کیلومتری شهر سنندج در نزدیکی روستای بنیدر قرار گرفته است. نوع سد خاکی با هسته نفوذ ناپذیر رسی بوده که البته در مرحله اجرا، مصالح بدنه سد تغییر داده شده و سد به صورت سنگریزه ای با هسته رسی اجرا شده است. تراز آستانه سد ۱۴۸۰ متر بالاتر از سطح دریا و تراز بستر رودخانه ۱۳۶۲ متر بالاتر از سطح دریا قرار دارد. ارتفاع سد از بستر رودخانه ۱۱۸ متر، عرض آستانه سد ۱۴ متر و طول آستانه سد ۵۹۸ متر می باشد. سیستم تخلیه سیلاب شامل کانال ورودی، سرریز دریاچه دار، تندآب، پرتاب کننده و پایاب پرتاب کننده می باشد که در سمت چپ بدنه سد جانمایی گردیده است، تراز آستانه سرریز ۱۴۶۵ متر بالاتر از سطح دریا می باشد. عرض ناخالص سرریز ۳۰ متر و عرض خالص آن ۲۴ متر است که با دو دیواره ای جدا کننده میانی و دیواره های کناری سرریز به سه قطعه هشت متری تقسیم شده است. دبی ورودی به وسیله سه دریاچه ای که در ابتدای هر قطعه قرار دارد کنترل می شود. تندآب این سرریز مستطیل شکل با عرض ثابت ۳۰ متر ساخته شده، شیب ابتدای تندآب ۵ درصد و شیب بخش اصلی ۳۶٫۴ درصد می باشد که این دو قطعه بوسیله کمی برابر ۱۷٫۱ درجه از دایره ای به شعاع ۱۰۰ متر به هم متصل شده اند. تراز کف و انتهای پرتاب کننده به ترتیب ۱۳۸۳٫۴۰ و ۱۳۸۴٫۵۰ متر بالاتر از سطح دریا

عدد برای تعیین دبی و فشار جریان مفید می باشد. Aydin و Ozturk (2009) به بررسی عددی هواده دیواره و کف با مدل عددی پرداخته و نتایج را با نتایج مدل فیزیکی مقایسه و از اعتبار مدل عددی دفاع کرده و همچنین اشاره کردند به منظور اعتبار مدل فیزیکی لازم است مقیاس مدل به دقت انتخاب شود. Zhang و Wu، Dong (2010) با کمک مدل ساخته شده در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه ژيجانگ چین به تأثیر غلظت هوا مخلوط در جریان بر فشار کف و خلاءزایی پرداخته اند و به تأثیر مثبت غلظت هوا اشاره کرده اند. Parhizgar و Khosrojerdy (2012) به بررسی تأثیر ابعاد رمپ هواده بر روی کاویتاسیون در سرریز شوت سدهای سیازاخ و گاوشان پرداختند. در تحقیق فوق پدیده کاویتاسیون و نحوه تأثیر سیستم های هواده برای جلوگیری از این پدیده بر روی سرریز دو سد سیازاخ و گاوشان کشور ایران از طریق مدل فیزیکی آن ها بررسی گردید. نتایج حاصل از تحقیق فوق نشان داد که در سرریز سد سیازاخ، تک سیستم هواده در نظر گرفته شده گزینه مناسبی در افزایش ضریب کاویتاسیون بوده و در سرریز سد گاوشان استفاده از تک سیستم هواده چندان تأثیری بر کاهش خطرات کاویتاسیون نداشته است. همچنین تحقیقات محققین فوق نشان داد که هرچه ارتفاع رمپ هواده فاصله افقی رمپ هواده تا ابتدای سرریز نسبت ارتفاع به طول افقی رمپ هواده اختلاف ارتفاع بین ابتدا و انتهای سرریز و طول افقی سرریز کمتر باشد عملکرد سیستم هواده مناسب تر خواهد بود. DehdarBehbahani et al. (2011) به صورت عددی به کمک نرم افزار Flow-3D پدیده خلاءزایی را در سرریز سد بالارود مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که نتایج نرم افزار با نتایج مدل فیزیکی نزدیک بوده و اختلاف موجود ناشی از تفاوت در پارامترهای سرعت بوده که در مدل فیزیکی سرعت در عمق ۰/۲ متری به وسیله میکرومولینه اندازه گیری شده و در نرم افزار متوسط سرعت در راستای عمود بر جریان می باشد. و NasrEsfahani و ShafaiBajestan (2014) به بررسی پدیده کاویتاسیون در حوضچه آرامش با بستر زبر و پله ناگهانی پرداختند. در تحقیق فوق با استفاده از مدل فیزیکی به بررسی خصوصیات پرش هیدرولیکی بر پله معکوس با بستر زبر پرداخته شد. نتایج تحقیق فوق نشان داد پیزومترهایی که در معرض برخورد مستقیم با جت آب قرار داشتند، دارای کمترین فشار و حتی فشارهای منفی هستند. Erfanain-Azmoudeh و Kamanbedast (2013) با نرم افزار Flow-3D روی محل نصب هواده در سرریز گتوند کار کردند که نتایج نشان داد، نرم افزار توافق خوبی با نتایج مدل آزمایشگاهی دارد و چهار کانال هواده ای راست و چپ برای پیشگیری از خلاءزایی در سرریز گتوند کافی است. Kermani et al. (2013) برای بررسی کاویتاسیون در مطالعه موردی روی سد شهید عباسپور، با استفاده از دو پارامتر عدد کاویتاسیون و سرعت جریان، میزان خسارت را در پنج سطح از بدون خسارت تا خسارت عمده دسته بندی نمودند. هردو روش،

مدل این دبی در مدل آزمایشگاهی، برابر ۳۵۷ لیتر بر ثانیه است. یکی دیگر از مشخصه‌های مهم جریان که در طراحی سازه مورد نیاز است، سرعت جریان می‌باشد که در ۰/۶ عمق آب از سطح، عمود بر سطح تندآب، با استفاده از لوله پیتو اندازه‌گیری شد. عمق آب نیز بوسیله‌ی مدرج کردن دیواره‌ی سازه و خط‌کش اندازه‌گیری شد. نوسانات فشار (فشار دینامیکی) بوسیله‌ی پردازش اطلاعات پیژومتریک بوسیله‌ی رایانه انجام گردید. دبی مدل، به‌وسیله‌ی دو دستگاه پمپ از منابع ذخیره‌ی آب سالن هیدرولیک تامین گردید. اندازه‌گیری دبی در پایاب مدل با استفاده از سرریز مستطیلی انجام پذیرفت.

معادله پیوستگی

برای جریان تراکم پذیر داریم:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho' u_i') \quad (1)$$

برای جریان تراکم ناپذیر از آنجایی که $\rho' = 0$ می‌باشد، معادله فوق به صورت رابطه (۲) در خواهد آمد:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

معادلات مومنتوم

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + (\bar{u}_j) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + g_{xi} + \frac{\partial}{\partial x_j} [v \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{U'_i U'_j}] \quad (3)$$

در روابط فوق، \bar{u}_i : تنش رینولدز، U : سرعت جریان، t : زمان، v : ویسکوزیته مولکولی، P : فشار، ρ : چگالی سیال و δ_{ij} : دلتای کرونکر می‌باشند.

می‌باشد. تراز پایاب نیز ۱۳۸۰ متر بالاتر از سطح دریا واقع شده و تراز بستر رودخانه در ۱۳۶۲ متری بالای سطح دریا قرار گرفته است.

مدل آزمایشگاهی سرریز مورد مطالعه

مدل هیدرولیکی سد، با با مقیاس سه درصد ابعاد واقعی ۱:۳۳/۳۳ ساخته شده است. مدل هیدرولیکی سیستم تخلیه‌ی سیلاب سد مخزنی آزاد توسط موسسه تحقیقات آب با مقیاس ۱:۳۳/۳۳ ($\frac{3}{100}$) ساخته شده است. دو سیستم هواده مشابه در فواصل ۱۶۵ متر و ۲۱۰ متر اجرا شده است. ارتفاع رمپ بکار رفته ۰/۵ متر و دارای زاویه ۷ درجه می‌باشد. رمپ دارای طول افقی ۳/۷۵ متر است. این مدل از سه قسمت تشکیل شده که عبارتند از:

- ۱- مخزن بالا: متشکل از جزئی از دریاچه، بدنه سد و کانال ورودی
- ۲- اجزاء تخلیه سیلاب: متشکل از سرریز دریاچه‌دار، تندآب و پرتاب کننده
- ۳- مخزن پایاب: متشکل از آبراهه‌ی پایاب و قسمتی از رودخانه مدل از تراز حداقل، ۱۳۴۰ متر بالاتر از سطح دریا، منطبق بر کف سالن هیدرولیک تا تراز آستانه سد ۱۴۸۰ متری از سطح دریا با مقیاس ۱:۳۳/۳۳ اجرا گردیده است. ابعاد سرریز و اجزای آن مضربی از یک بوده چراکه اگر ابعاد مش‌بندی مضربی از یک نباشد باعث می‌شود شکل سرریز بعد از مش‌بندی غیر واقعی شود. شکل (۱) تصاویری از مدل ساخته شده از سد مذکور در مرکز تحقیقات آب در حالتی که رمپ هواده و داکت مدل شده رانشان می‌دهد. در سرریز اولیه آزمایش برای دبی‌های معادل ۵۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰، ۱۲۲۶، ۱۵۴۵ و ۱۸۰۰ مترمکعب برثانیه‌ی سرریز واقعی، انجام گرفته ولی بعد از اجرای هواده به جای دبی ۱۸۰۰ مترمکعب برثانیه دبی ۲۲۹۰ مترمکعب برثانیه به عنوان حداکثر دبی، مورد آزمایش قرار گرفته است. لازم به ذکر است با توجه به مقیاس



شکل ۱- تصاویری از مدل فیزیکی سرریز سد آزاد

مدل آشفتگی RNG

مدل RNG منظور مدل کردن حرکت در مقیاس‌های کوچکتر و تأثرات آنها به وسیله نرمال‌سازی مجدد معادله‌ها ناویروستوکس گسترش داده شده است. در مدل استاندارد K-ε، لزجت گردابی به‌وسیله یه مقیاس طول آشفتگی منفرد تعیین می‌شود، بنابراین پخش آشفتگی محاسبه شده تنها در مقیاس‌های مخصوصی اتفاق می‌افتد. در حالی که در واقعیت، همه مقیاس‌های حرکت در پخش آشفتگی شرکت دارند. روش RNG یک ابزار ریاضی برای استخراج مدل آشفتگی شبیه به مدل K-ε است، منجر به یک قالب اصطلاح شده از معادلات اپسیلون میشود که برای محاسبه مقیاس‌های متفاوت حرکت، از طریق تغییرات در عبارت‌های معادله اپسیلون مورد استفاده قرار می‌گیرد.

روابط ورود هوا

مدل انتقال آشفتگی بر اساس انرژی جنبشی آشفتگی، q و تابع استهلاک D طبقه‌بندی می‌شوند. طول مشخصه گردابه‌های آشفتگی با رابطه (۷) به‌دست می‌آید:

$$L_t = \frac{cnu\sqrt{1.5q^3}}{D} \quad (7)$$

از این مقیاس برای مشخص کردن آشفتگی‌های سطحی استفاده می‌شود. انرژی جنبشی آشفتگی بر واحد سطح به همراه المان سیال که تا ارتفاع L_t با استفاده از رابطه بالا به‌دست می‌آید (رابطه ۸).

$$P_d = \rho g_n L_t - \frac{\sigma}{L_t} \quad (8)$$

که در آن چگالی سیال، σ ضریب تنش سطحی و g_n مولفه‌ی شتاب گرانش در جهت عمود بر سطح آزاد می‌باشد، برای اینکه هوا وارد جریان شود، می‌بایست انرژی جنبشی آشفتگی در واحد حجم، از P_d بیشتر باشد، یعنی نیروی آشفتگی برای غلبه بر نیروی تعادل سطحی، به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد. حجم هوای وارد شده در واحد زمان δV ، می‌بایست متناسب با مساحت سطح سیال A_s و ارتفاع سیال بر روی تراز متوسط سطح جریان باشد. برای این منظور:

$$\delta V = C_{air} \cdot A_s \cdot \left(\frac{2(P_t - P_d)}{\rho} \right)^{0.5} \quad (9)$$

که در این رابطه، C_{air} یک ضریب نسبت می‌باشد. اگر P_t کمتر از P_d باشد، δV برابر صفر خواهد بود. انتظار می‌رود که ضریب C_{air} کمتر از واحد باشد، زیرا قسمتی از حجم آشفتگی که به سطح رسیده است؛ توسط هوا اشغال می‌شود.

شاخص کاویتاسیون

شاخص کاویتاسیون نسبت افت فشار لازم برای تبخیر آب، به پتانسیل کاهش فشار جریان از طریق انرژی جنبشی است و به‌صورت رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$\sigma = \frac{P - P_v}{\frac{1}{2} \rho U^2} = \frac{P - P_v}{\frac{\rho v^2}{2g}} \quad (4)$$

که در این رابطه P_v : فشار بخار سیال عبوری از سریز در دمای محیط یا ارتفاع معادل فشار بخار آب (برابر با ۰/۲۳ متر)، ρ : جرم حجمی سیال، U : سرعت متوسط جریان، v : سرعت جریان (متر بر ثانیه) و P : فشار محلی (ارتفاع معادل فشار مطلق جریان (متر در یک نقطه) است که از رابطه (۵) محاسبه می‌گردد:

$$P = P_0 + P_g \quad (5)$$

که در این رابطه P_0 : فشار اتمسفر و P_g : فشار پیرومتریک می‌باشد. طبق تحقیقات انجام گرفته و نتایج ارائه شده به وسیله USBR در صورتی که اندیس خللازیی بیشتر از ۰/۲۵ باشد پدیده‌ی خللازیی به وجود نمی‌آید، زمانی که اندیس خللازیی بین ۰/۲۰ تا ۰/۲۵ باشد، پدیده‌ی خللازیی خسارت اندکی خواهد داشت که در نظر گرفتن هواده الزامی نمی‌باشد و در نقاطی که این اندیس کمتر از ۰/۲ باشد، احتمال وقوع این پدیده زیاد است. تجربیات نشان داده اگر عدد خللازیی بین ۰/۱ تا ۰/۲ باشد وجود سیستم هواده که در ادامه شرح داده خواهد شد، برای جلوگیری از خسارت‌های احتمالی ضروری است و در صورتی که اندیس خللازیی کمتر از ۰/۱ باشد، تمهیداتی که در ادامه آورده خواهد شد برای جلوگیری از خسارت‌های ناشی از خللازیی کافی نبوده و سرریز نیاز به طراحی مجدد دارد. با توجه به داشتن سرعت و فشار از یکی از فرمول‌های ارائه شده برای به‌دست آوردن شاخص کاویتاسیون استفاده می‌شود:

$$\delta = \frac{H_a + H_o - H_v}{\frac{v_0^2}{2g}} \quad (6)$$

در رابطه (۶) داریم:

H_a : ارتفاع معادل فشار اتمسفر که طبق اطلاعات آورده شده در مدل آزمایشگاهی در اینجا برابر ۱۰/۳۳ متر ستون آب در نظر گرفته می‌شود.

H_o : ارتفاع معادل فشار پیرومتریک کف سرریز (زیر جریان) است.
 H_v : ارتفاع معادل فشار بخار آب که طبق اطلاعات آورده شده در مدل آزمایشگاهی در اینجا برابر ۰/۳۳ متر ستون آب در نظر گرفته می‌شود. v : سرعت جریان بر حسب متر بر ثانیه و g : شتاب ثقل که ۹/۸۱ در نظر گرفته می‌شود. پس از محاسبه شاخص کاویتاسیون از داده‌هایی که در اختیار داریم برای مدل آزمایشگاهی و مدل عددی مشاهده می‌شود.

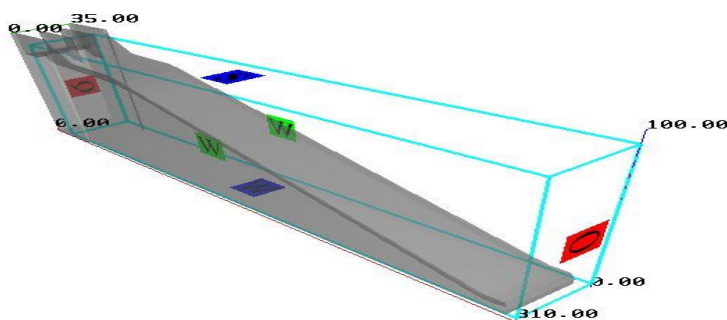
مدل عددی و معادلات حاکم بر جریان

FLOW-3D نرم‌افزاری قوی در زمینه‌ی دینامیک سیالات می‌باشد یکی از قابلیت‌های عمده‌ی این برنامه برای تحلیل‌های هیدرولیکی، توانایی مدل کردن جریان‌های با سطح آزاد به روش احجام محدود می‌باشد. FLOW-3D، از یک شبکه متشکل از سلول‌های مستطیلی استفاده می‌کند. این شبکه دارای مزایایی برای تولید آسان، منظم و مناسب برای بهبود بخشیدن به شبیه‌سازی عددی است که به کمترین ذخیره‌ی حافظه احتیاج دارد. FLOW-3D شامل الگوهای فیزیکی مختلفی می‌باشد که عبارتند از: آب‌های کم عمق، لزجت، خلاءزایی، آشفتگی، کشش سطحی و محیط‌های متخلخل. با توجه به شرایط مختلفی که برای کنترل شرایط مدل نرم افزار بررسی شد، زمانی که تنها یک بلوک برای مش‌بندی استفاده شود، نتایج دقیق‌تری حاصل می‌شود. بلوک مش‌بندی استفاده شده در راستای X، بین ۲۰ تا ۳۱۰، در راستای Y، بین ۰ تا ۳۵ و در راستای Z، بین ۳ تا ۹۴ واقع شده است. شرایط مرزی در راستای X_Min ورودی سیال (Volume flow rate)، در راستای X_Max خروجی سیال (Out flow)، در راستای Y_Min و Y_Max دیوار (Wall) و در راستای Z_Max تقارن یا همان ادامه سیال (Symmetry) در نظر گرفته شده است. شکل (۲) سرریز را همراه

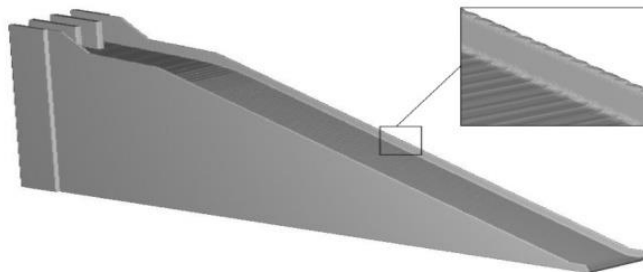
با بلوک مش‌بندی و شرایط مرزی در حالت سه‌بعدی نشان می‌دهد. ابعاد مش‌بندی در مدل ۰/۵ متری در نظر گرفته شده، زیرا زمانی که ابعاد مش ۰/۲۵ متر باشد، تعداد مش‌ها خیلی زیاد می‌شود و رایانه مورد استفاده قادر به اجرای برنامه نمی‌باشد و با توجه به اندازه اجزای سرریز مخصوصاً رمپ، استفاده از ابعاد مش ۰/۴۵، ۰/۴ و ۰/۳۵ متری نتایج مناسبی در برنداشته و شکل سرریز غیر واقعی‌تر از مش‌بندی ۰/۵ متر شد. با توجه به ابعاد مش‌بندی و اینکه خطوط سلول‌ها به علت تراکم، در تصویر سرریز قابل مشاهده نیست از آوردن تصویر سلول‌های مش‌بندی خودداری شده ولی شکل سرریز را در حالت FAVOR آورده شده است. شکل (۳) سرریز تشکیل شده در حالت FAVOR (شکلی از سرریز که با توجه به مش‌بندی در نرم‌افزار ساخته می‌شود) و جزئیات لبه سرریز را نشان می‌دهد.

سرریز با رمپ کف

مدل سرریز با رمپ در کف مانند سرریز اولیه است، به‌علاوه دو رمپ هواده که در کف قرار گرفته‌اند. زاویه رمپ نسبت به شیب کف سرریز هفت درجه می‌باشد، با توجه به اینکه فاصله نقطه شروع تا پایان رمپ ۳/۷۶ متر می‌باشد، اختلاف ارتفاع رمپ در نقطه پایانی ۰/۵ متر است.



شکل ۲- سرریز بلوک دار و مش‌بندی و شرایط مرزی

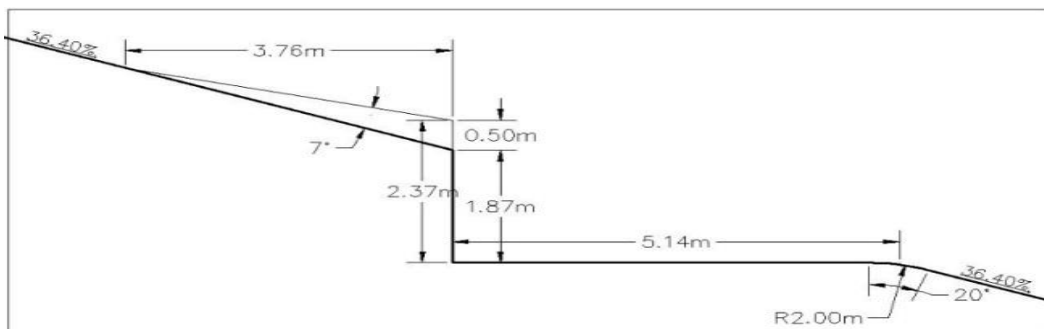


شکل ۳- سرریز تشکیل شده در حالت FAVOR

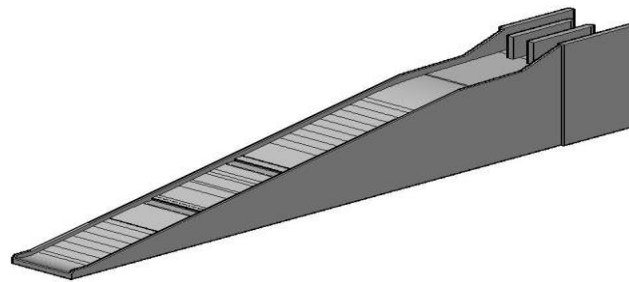
مدل سرریز با رمپ در کف و داکت در دیواره مانند سرریز با رمپ کف می‌باشد، اما در دیواره دو طرف سرریز، دو داکت (مجرا) برای رساندن هوا به بریدگی بعد از رمپ کف قرار داده شده است. شکل (۶) سرریز با رمپ در کف و داکت در دیواره را نشان می‌دهد. پس از محاسبه شاخص خلاءزایی از داده‌هایی که در اختیار داریم برای مدل آزمایشگاهی و مدل عددی مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از مدل عددی تناسب خوبی با نتایج مدل آزمایشگاهی داشته و حداکثر اختلاف آن‌ها مثبت ده درصد (+۱۰) و منهای پنج درصد (-۵) می‌باشد که تایید کننده صحت نتایج مدل عددی است. نتایج سرعت، فشار و شاخص خلاءزایی برای مدل آزمایشگاهی و مدل عددی سرریز، مورد مطالعه قرار گرفت و مقایسه شد. میزان عمق آب روی سرریز در نقاط مختلف در مدل آزمایشگاهی و مدل عددی در دی‌های مختلف نیز تطابق خوبی با هم داشته.

پس از اتمام رمپ پله‌ای وجود دارد که از کف سرریز ۱/۸۷ متر پایین‌تر است که با احتساب ارتفاع رمپ مجموع اختلاف ارتفاع روی رمپ تا کف پله ۲/۳۷ متر می‌باشد. کف پله به صورت افقی ادامه پیدا می‌کند تا سطح سرریز را قطع کند. طول افقی پله (بریدگی) ۵/۱۴ متر می‌باشد. انتهای پله با کماتی به طول ۲۰ درجه از دایره‌ای به شعاع دو متر به کف سرریز متصل شده است. شکل (۴) شکل رمپ و اندازه اجزای آن را نشان می‌دهد. این رمپ در دو نقطه از سرریز قرار گرفته که فاصله آن‌ها از شروع سرریز به ترتیب ۱۶۵ و ۲۱۰ متر و از نقطه صفر مدل برابر ۱۸۵ و ۲۳۰ متر می‌باشد. تصویر سرریز با رمپ در کف در شکل (۵) آورده شده است.

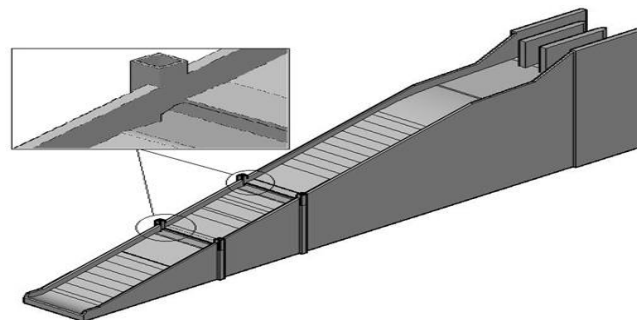
سرریز با رمپ در کف و داکت در دیواره



شکل ۴- رمپ و اندازه اجزای آن



شکل ۵- سرریز با رمپ در کف

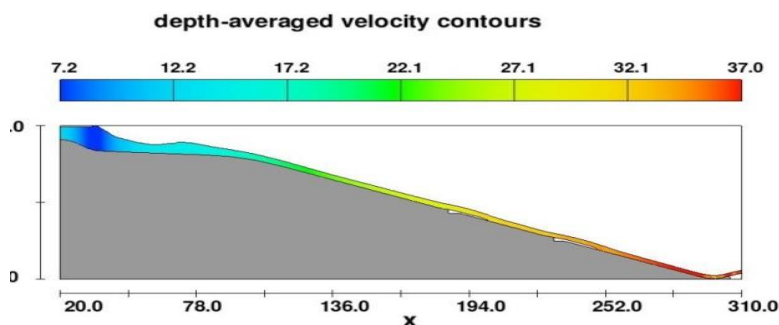


شکل ۶- سرریز با رمپ در کف و داکت در دیواره

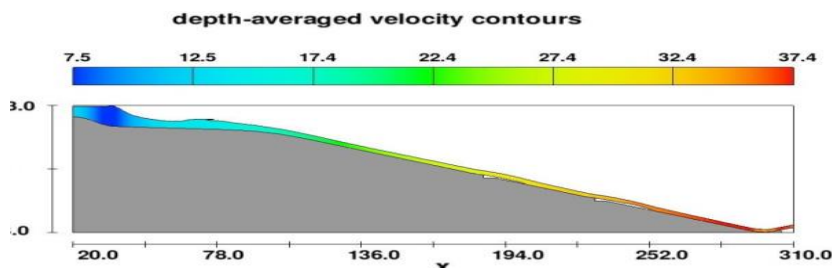
به داشتن سرعت و فشار در میانه سرریز در هشت نقطه در طول سرریز میزان شاخص خلأزایی محاسبه و در قالب شکل‌های در ادامه ارائه و در مدل‌های مختلف مورد مقایسه قرار گرفته است؛ در شکل (۱۱) مقایسه شاخص خلأزایی در مدل‌های مختلف در دبی ۲۲۹۰ مترمکعب بر ثانیه آورده شده است. در سرریزهایی که رمپ کف وجود دارد تصویر جزئیات هوای وارده در قسمت هواده نیز آورده شده است. با دقت در رنگ‌بندی مربوط به غلظت هوا، غلظت هوا در قسمت‌های مختلف هواده و نقاط ورود هوا قابل مشاهده می‌باشد. شکل (۱۲) غلظت هوای وارده برای سرریز با رمپ کف و در کف و دیواره آورده شده است. رمپ دیواره کمترین تأثیر را بر هوادهی جریان در میانهی سرریز داشته و رمپ کف زمانی که به همراه داکت یا رمپ در دیواره باشد، تأثیر بهتری بر هوادهی دارد. در قسمت بعدی، مقایسه غلظت هوای وارده شده به جریان در سرریزهای مختلف در دو دبی مورد بررسی به صورت گراف آورده شده؛ شکل‌های (۱۴) و (۱۵) غلظت هوای وارد شده به کف جریان در مقاطع عرضی در فاصله ۱۵۵ متری از صفر مدل برای انواع سرریز به ترتیب در دبی‌های ۱۵۴۵ و ۱۲۲۶ مترمکعب بر ثانیه را نشان داده است. هر چه دبی سرریز کمتر شود، با توجه به نکته بیان شده در بالا یعنی کاهش ضخامت جریان، هوای بیشتری از لایه رویی به عمق جریان نفوذ می‌کند و درصد هوای وارد شده به جریان بیشتر می‌شود این نکته نیز به صورت واضح در نمودارها قابل مشاهده است.

نتایج و بحث

نتایج مربوط به سرعت در سرریز که متوسط سرعت در راستای عمود بر جریان در میانه سرریز در راستای y می‌باشد، به صورت شکل و نمودار در هشت نقطه در طول سرریز در ادامه ارائه شده است. شکل (۷) سرعت در سرریز با رمپ در کف، شکل (۸) سرعت در سرریز با رمپ در کف و داکت در دیواره را که از نرم‌افزار برای دبی ۲۲۹۰ مترمکعب بر ثانیه در میانه سرریز در راستای y استخراج شده نشان می‌دهد. با توجه به رنگ‌بندی انجام شده می‌توان به تغییرات سرعت در قسمت‌های مختلف در راستای طولی سرریز پی‌برد. در ادامه در شکل (۹) مقایسه سرعت در مدل‌های مختلف در دبی ۲۲۹۰ و ۱۵۴۵ مترمکعب بر ثانیه آورده شده است. همان‌طور که در شکل‌های ارائه شده مشاهده می‌شود، ایجاد رمپ تأثیر چشمگیری بر سرعت نداشته اما با توجه به فرمول محاسبه شاخص خلأزایی همان تأثیر اندک هم در افزایش شاخص خلأزایی و کاهش احتمال خلأزایی مؤثر می‌باشد. با توجه به نتایج استخراج شده از نرم‌افزار سرریز با رمپ در کف و داکت در دیواره و سرریز با رمپ در کف و دیواره بیشترین تأثیر را بر کاهش سرعت در میانه سرریز دارند. با توجه به بحرانی بودن خلأزایی در میانه سرریز، فشار در راستای y در میانه سرریز و در راستای طولی در هشت نقطه مورد بررسی قرار گرفته و نتایج مربوط به فشار در کف سرریز (زیر جریان) به صورت نمودار در ادامه آورده شده است. شکل (۱۰) مقایسه فشار در مدل‌های مختلف در دبی ۲۲۹۰ مترمکعب بر ثانیه را نشان می‌دهد. با توجه

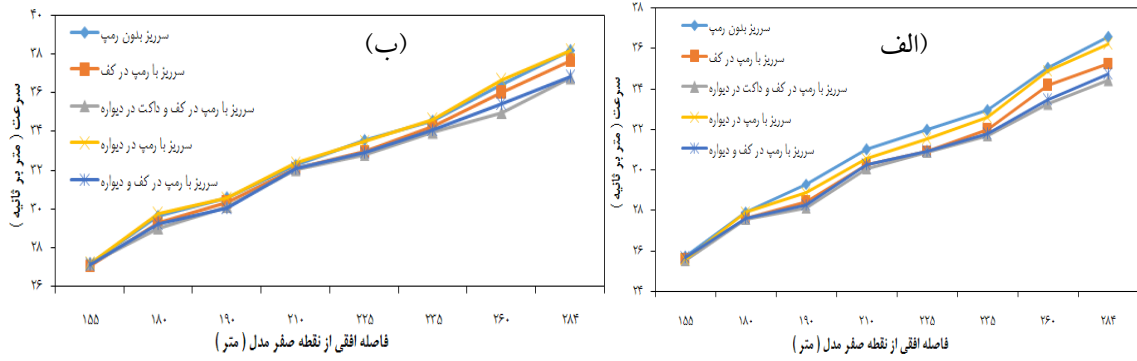


شکل ۷- سرعت در سرریز با رمپ در کف در دبی ۲۲۹۰ مترمکعب بر ثانیه

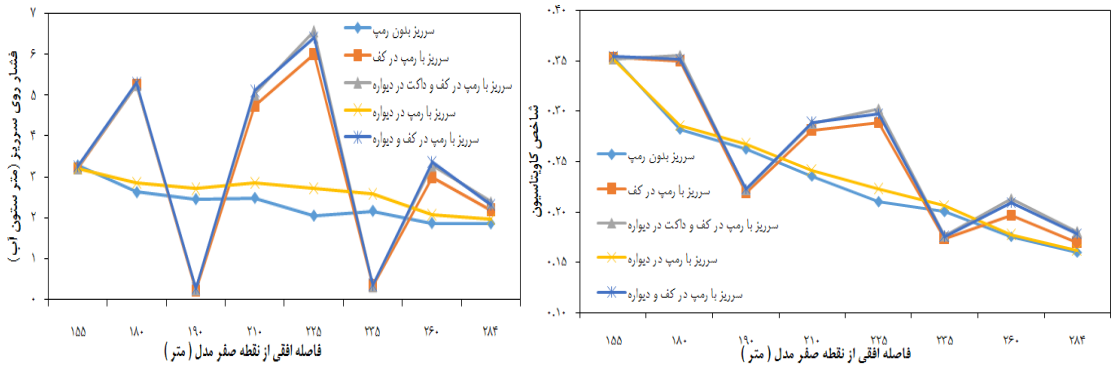


شکل ۸- سرعت در سرریز با رمپ در کف و داکت در دیواره در دبی ۲۲۹۰ مترمکعب بر ثانیه

نوحانی و همکاران: شبیه سازی عددی تأثیر رمپ هواده در کف و...

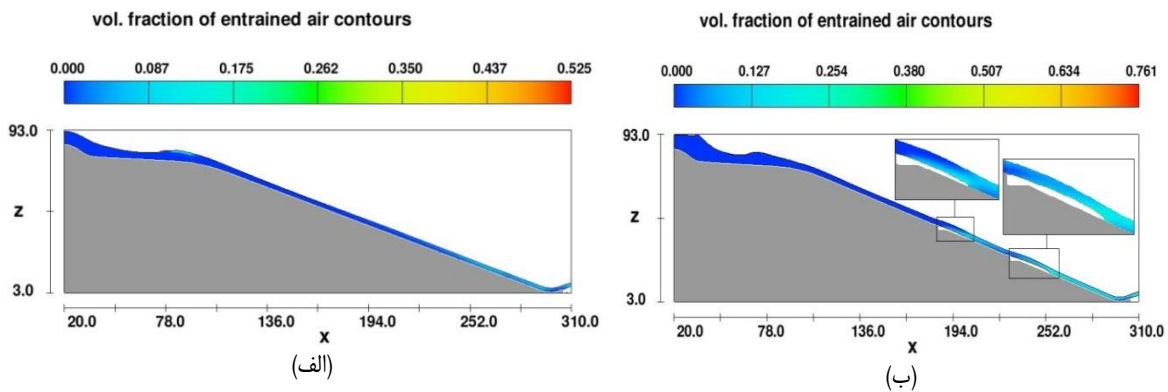


شکل ۹- مقایسه سرعت در مدل های مختلف در دبی: (الف) ۱۵۴۵ مترمکعب بر ثانیه؛ (ب) ۲۲۹۰ مترمکعب بر ثانیه

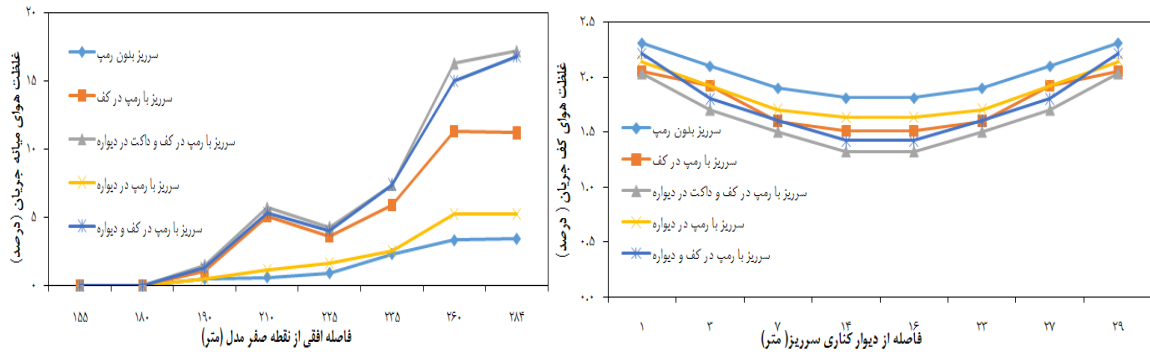


شکل ۱۱- مقایسه شاخص خلأزایی در دبی $\frac{m^3}{s}$ ۲۲۹۰

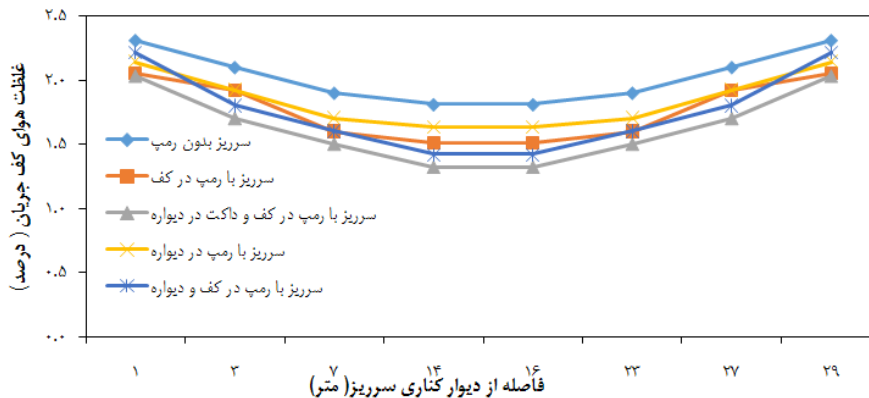
شکل ۱۰- مقایسه فشار در دبی $\frac{m^3}{s}$ ۲۲۹۰



شکل ۱۲- غلظت هوای وارد شده به جریان در (الف) با رمپ در دیواره و (ب) سوریز با رمپ در کف و دیواره



شکل ۱۳- غلظت هوای وارده به جریان در دبی $\frac{m^3}{s}$ ۲۲۹۰ شکل ۱۴- غلظت هوای کف جریان در دبی $\frac{m^3}{s}$ ۱۵۴۵



شکل ۱۵- غلظت هوای کف جریان در مقاطع عرضی در دبی ۱۲۲۶ مترمکعب بر ثانیه در ۱۵۵ متری از صفر مدل

داده می‌شود. با توجه به اینکه با کاهش دبی ضخامت جریان کاهش پیدا می‌کند و نفوذ هوا به داخل سیال راحت‌تر انجام می‌شود، در نتیجه با کاهش دبی تأثیر رمپ هواده بر افزایش غلظت هوای داخل جریان نسبت به حالت بدون رمپ کاهش می‌یابد. با در نظر گرفتن این نکته که در قسمتی که رمپ اول واقع شده، نفوذ طبیعی هوا به داخل جریان نسبت به مقطعی که رمپ دوم قرار دارد، کمتر است؛ تأثیر رمپ اول بیش از رمپ دوم بوده و در افزایش غلظت هوا نسبت به سرریز بدون رمپ موفق‌تر است. بررسی پروفیل عرضی غلظت هوای وارد شده به جریان نشان می‌دهد، سرریز با رمپ در دیواره برای سرریزهای کم عرض می‌تواند مفید باشد. در اینجا به نظر می‌رسد این عرض ۸ تا ۱۰ برابر اندازه بیرون زدگی رمپ می‌باشد. که البته نتیجه‌گیری قطعی در مورد آن نیاز به بررسی بیشتر دارد. سرریز با رمپ در کف و دیواره در نقاط نزدیک به رمپ با توجه به اغتشاشی که رمپ دیواره در جریان ایجاد می‌کند، در نفوذ هوا به داخل جریان عملکرد مطلوب‌تری نسبت به سرریز با رمپ در کف و داکت در دیواره دارد، اما با فاصله گرفتن از رمپ‌ها با توجه به عدم یکنواختی توزیع هوا، غلظت کاهش پیدا کرده و در مجموع عملکرد سرریز با داکت در دیواره بهتر می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق جریان روی سرریز سد آزاد به صورت سه‌بعدی در نرم افزار Flow-3D مدل و سپس صحت نتایج نرم‌افزار با توجه به نتایج مدل فیزیکی بررسی شد، سپس تأثیر انواع رمپ هواده بر فاکتورهای مؤثر بر خلا‌زایی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که سرریز با رمپ در کف و داکت در دیواره در نقطه بعد از رمپ اول میزان هوای داخل لایه زیرین جریان را ۲۲ برابر و در نقطه بعد رمپ دوم ۶/۵ برابر سرریز بدون رمپ بالا برده است. سرریز با رمپ در کف و دیواره در رمپ اول غلظت هوا در لایه زیرین را ۱۸/۵ برابر و بعد از رمپ دوم ۵/۷ برابر کرده است. سرریز با رمپ در کف، در محل بررسی شده بعد از رمپ اول ۱۸ برابر و در محل مورد بررسی، بعد از رمپ دوم ۵/۴ برابر غلظت هوا را نسبت به حالت بدون رمپ بالا برده است که البته شاید این دو مقدار بیش از مقدار واقعی باشد، زیرا ابعاد مش‌بندی طوری است که سطح کف و دیواره یکنواخت مدل نشده و باعث می‌شود، در مدل عددی هوا از دیواره به زیر رمپ وارد شود.

در این مدل (رمپ کف) که در حالت واقعی هیچ فضایی برای انتقال هوا به کف وجود ندارد، در این مدل مقداری هوا از کناره دیواره به کف وارد شده و غلظت هوا بیش از مقدار واقعی نشان

منابع

- 1- Aydin, M.C. and Ozturk, M., 2009. Verification and validation of a computational fluid dynamics (CFD) model for air entrainment at spillway aerators. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 36(5), pp.826-836.
- 2- DehdarBehbahani, p., FathiMoghaddam, M., Hosseini, h. and Fazelipour, Sh., 2011. Investigation of the Cavitation phenomenon during a jet projectile using a FLOW-3D model. *10th Iranian Hydraulic Conference. University of Guilan, Guilan, Iran.* (In Persian) .
- 3- Dong, Z., Wu, Y. and Zhang, D., 2010. Cavitation characteristics of offset-into-flow and effect of aeration. *Journal of hydraulic research*, 48(1), pp.74-80.
- 4- Erfanain-Azmoudeh, M.H. and Kamanbedast, A.A., 2013. Determine the appropriate location of aerator system on Gotvandoliadam's spillway using Flow 3D. *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences*, 13(3), pp.378-383.

- 5- Johnson, M.C. and Savage, B.M., 2006. Physical and numerical comparison of flow over ogee spillway in the presence of tailwater. *Journal of hydraulic engineering*, 132(12), pp.1353-1357.
- 6- Johnson, V., 1963. Mechanics of cavitation. *Journal of the Hydraulics Division*, 89(3), pp.251-275.
- 7- Katz, J. and O'hern, T.J., 1986. Cavitation in large scale shear flows. *Journal of fluids engineering*, 108(3), pp.373-376.
- 8- Kermani, E.F., Barani, G.A. and Ghaeini-Hessaroeeyeh, M., 2013. Investigation of cavitation damage levels on spillways. *World Applied Sciences Journal*, 21(1), pp.73-78.
- 9- Khosrojerdy, A. And Parhizgar, V.Z., 2012. Investigating the Effect of Away Ramp Dimension on the Negative Impact of Shaft Overflow of Siahaz and Dagashan Dam. In *11th Iranian Hydraulic Conference, University of Orumieh, Orumieh, Iran*. (In Persian) .
- 10- Mahdavi Meymand, A., Ahadiyan, J. 2015. Evaluation of Statistical, Empirical, Neural Networks and Neural – Fuzzy Techniques for Estimation of Spillway Aerators. *Irrigation Sciences and Engineering*, 38(3), pp. 51-61. (In Persian) .
- 11- Nasr Esfahani, M., Shafai-Bajestan, M. 2014. Investigation of Cavitation at the Roughened Bed of Abrupt Drop Stilling Basin. *Journal of Hydraulics*, 8(2), pp. 29-40. (In Persian).
- 12- Raisey, Z., 2011. *The phenomenon of Cavitation*. Zagros-Tehran. (In Persian) .
- 13- Tabbara, M., Chatila, J. and Awwad, R., 2005. Computational simulation of flow over stepped spillways. *Computers & structures*, 83(27), pp.2215-2224.
- 14- Vosoughifar, H., Abdollahi, R., Shabanipour, Z., 2005. *Location of cavitation in the weir heights*. Aria-Zamin. (In Persian) .
- 15- Zandi, Y., 2014. *Cavitation in overflow*. Islamic Azad University-Tabriz. (In Persian)