



Zonation of cavitation hazard in the chute spillway of Surk dam with Nearest Neighbor Classification Algorithm

Amir Hossein Asadian¹, Seyed Shahab Emamzadeh^{2✉}

1. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran, Email:

amirhoseinasadian9@gmail.com

2. Corresponding Author, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran, Email:

shemamzadeh@khu.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: July. 5, 2022

Revised: Oct. 26, 2022

Accepted: Nov. 2, 2022

Published online: Dec. 22, 2022

Keywords:

Surk Dam,
Flow3D,
Cavitation,
Nearest Neighbor Classification
Algorithm,
Chute spillway.

ABSTRACT

Cavitation is one of the failure factors of spillways, which requires risk zoning to control this phenomenon. In this research, to obtain a method for zoning the risk of cavitation, the spillway information of Surk dam in Chaharmahal Bakhtiari province was used. In the modeling process, first, the geometric model of the overflow was constructed and after meshing and applying boundary conditions, flow analysis was done. The cavitation index was calculated in 18 sections according to the values of flow velocity and height, chute slope, and other necessary parameters. The results of Flow-3D software for qualitative assessment of the cavitation risk situation in Surk dam spillway are of appropriate accuracy; Thus, the RMSE error of pressure 0.26×10^{-2} pascal and velocity 0.23×10^{-2} m/s was obtained compared to the laboratory results. Also, parameters affecting the reduction of cavitation such as roughness and aeration were investigated. The results showed that there is a possibility of cavitation and damage caused at a distance of 70 to 95 meters from the crest of spillway. The results of the sensitivity analysis showed that the use of a uniform roughness of 2.5 mm and aeration during the chute increases the cavitation index. This roughness moves the cavitation areas to the downstream sections of the spillway. Also, by creating a roughness of 1.5 mm in two end sections 99.75 and 105 meters from the crest of spillway, the results of the nearest neighbor algorithm (NNA) showed a more critical state than the Flow-3D model. By applying a roughness of 2.5 mm, in the two end sections of 42 and 89.25 meters from the crest of spillway, the NNA showed a more critical state than the Flow-3D model, which means that these areas are more vulnerable to the cavitation phenomenon.

Cite this article: Asadian, A. H., Emamzadeh, S. Sh. (2022) Zonation of cavitation hazard in the chute spillway of Surk dam with Nearest Neighbor Classification Algorithm, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (10), 2445-2462. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.344417.669312>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.344417.669312>



پهنه‌بندی خطر کاویتاسیون در تنداب سرریز سد سورک با الگوریتم طبقه‌بندی نزدیک‌ترین همسایه

امیرحسین اسدیان^۱، سید شهاب امامزاده^۲۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران، ایمیل: amirhoseinasadian9@gmail.com۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران، ایمیل: shemamzadeh@khu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	کاویتاسیون یکی از عوامل خرابی تنداب سرریزها است که جهت کنترل این پدیده پهنه‌بندی خطر آن ضرورت دارد. در این تحقیق برای دستیابی به روشی جهت پهنه‌بندی خطر کاویتاسیون، از اطلاعات سرریز سد سورک در استان چهارمحال بختیاری استفاده شد. در روند مدل‌سازی ابتدا مدل هندسی سرریز ساخته شد و پس از شبکه‌بندی و اعمال شرایط مرزی، تحلیل جریان انجام شد. شاخص کاویتاسیون با توجه به مقادیر پارامترهای سرعت، ارتفاع جریان، شیب شوت و دیگر پارامترهای لازم، در ۱۸ مقطع محاسبه گردید. نتایج حاصله از نرم‌افزار Flow-3D برای سنجش کیفی وضعیت خطر کاویتاسیون در تنداب سرریز سد سورک از دقت مناسبی برخوردار است؛ به‌طوری‌که خطای RMSE فشار ۲-۱۰×۱۰/۲۶ پاسکال و سرعت ۲-۱۰×۰/۲۳ متر بر ثانیه نسبت به نتایج آزمایشگاهی بدست آمد. همچنین پارامترهای تاثیرگذار بر کاهش کاویتاسیون از قبیل زبری و هوادهی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌داد در فاصله ۷۰ تا ۹۵ متری از تاج سرریز احتمال وقوع کاویتاسیون و خسارات ناشی از آن وجود دارد. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که استفاده از زبری یکنواخت ۲/۵ میلی‌متری و هوادهی در طول شوت موجب افزایش شاخص کاویتاسیون می‌شود. در این زبری مناطق مستعد وقوع کاویتاسیون به مقاطع پایین دست شوت جابجا می‌شوند. در زبری یکنواخت ۱/۵ میلی‌متر در طول کل سرریز، نتایج الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی در دو مقطع پایانی ۹۹/۷۵ و ۱۰۵ متری و در زبری یکنواخت ۲/۵ میلی‌متر در طول کل سرریز در دو مقطع ۴۲ و ۸۹/۲۵ متری از تاج سرریز نسبت مدل Flow-3D بحرانی‌تر است که به معنی آسیب‌پذیری بیشتر این نواحی در مقابل پدیده کاویتاسیون است.
واژه‌های کلیدی: سد سورک، Flow-3D کاویتاسیون، الگوریتم طبقه‌بندی نزدیک‌ترین همسایگی، سرریز شوت	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۴/۱۴	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۸/۴	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۸/۱۱	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۰/۱	

استناد: اسدیان؛ امیرحسین، امامزاده؛ سید شهاب، (۱۴۰۱)، پهنه‌بندی خطر کاویتاسیون در تنداب سرریز سد سورک با الگوریتم طبقه‌بندی نزدیک‌ترین همسایه. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳ (۱۰)، ۲۴۴۵-۲۴۵۲. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.344417.669312>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.344417.669312>

مقدمه

سرریزهای شوت یکی از اجزای مهم جانبی در طرح یک سد هستند. این نوع سرریزها همواره در معرض خطر کاویتاسیون قرار داشته‌اند و حوادث زیادی در نقاط مختلف جهان در ارتباط با مسئله کاویتاسیون در سرریزهای سدهای بلند رخ داده است. این پدیده بیشتر در نواحی که سرعت جریان زیاد است به وقوع می‌پیوندد. به نظر می‌رسد که در طول سرریزهای شوت در اثر وجود زبری و ناهمواری‌های کف سرریز، خطوط جریان از بستر خود جدا و جریان‌های گردابی در زیر ناحیه جداشدگی جریان تشکیل شده و به دلیل بالا بودن سرعت جریان در سرریزهای شوت (سرعت بیش از ۲۰ m/s) کاهش فشار رخ داده و فشار در نقاط مختلف به فشار بخار آب برسد. در نتیجه رسیدن فشار، به فشار بخار، حباب‌هایی در منطقه کاهش فشار به وجود می‌آید، این حباب‌ها پس از انتقال به منطقه‌ای با فشار بیشتر، منفجر می‌شوند و یک چاله موضعی ایجاد می‌کنند. سیال موجود در ناحیه پرفشار محیط، با سرعت زیادی به سمت مرکز چاله حرکت و با برخورد به سطح بستر، نیروی فوق‌العاده‌ای به بستر سرریز وارد می‌کند که در نهایت باعث خرابی و خوردگی و جدایی اجزای بتن در نزدیکی سطح بتنی سرریز می‌شوند. در مطالعات اولیه در مورد دلایل این پدیده، اثر فشار آب بر روی خرابی کاویتاسیون شناسایی شد (Ramamurthy et al, 1984). پس از آن، مدل‌های تحلیلی-عددی و نیمه تجربی متنوعی برای شناخت بیشتر این پدیده ارائه گردید. در مطالعات مقدماتی (Falvey, 1990) برای اولین بار یک مدل عددی کاویتاسیونی را مطرح نمود که مورد توجه محققین قرار گرفت. پس از وی به منظور شناخت پدیده کاویتاسیون و روش‌های جلوگیری از خسارت آن مطالعات و تحقیقاتی به کمک مدل‌های آزمایشگاهی در مقیاس‌ها و شرایط مختلف انجام شد. برای مثال در مطالعه‌ای تاثیر زبری سطح در جلوگیری از کاویتاسیون بررسی گردید (Nie, 2001). حتی معادلات جریان‌های دوفازی برای بررسی این پدیده توسعه یافت (Yuan & Schnerr, 2003). قلوه‌کنی بتن به علت کاویتاسیون نیز طی آزمایش‌هایی بررسی گردید (Momber, 2004). در ایران نیز پس از خرابی سرریزهایی مانند سد کارون ۱ مطالعاتی جدیدی بر روی این پدیده انجام شد (Zandi, 2005; Ghazi et al 2019).

در ادامه این تحقیقات حرکت منطقه کاویتاسیون نشان داده شد (Bilusn et al. 2007). حتی خرابی این منطقه به روش عددی شبیه‌سازی شد (Dular & Coutier-Delgosha, 2009). در تحقیق دیگری تاثیر فشار بخصوص در سرعت‌های بالا نیز مطالعه شد (Dong et al, 2008). در ادامه وابستگی پدیده کاویتاسیون به زمان نیز در جریان‌های ناپایدار بررسی گردید (Suguo et al, 2011). با ابداع تکنولوژی هوادها، در تحقیقات دیگری روش هوادهی و تاثیر آن بر روی کاویتاسیون سرریزها نیز به صورت عددی بررسی شد (Luo et al. 2012). حتی در سرریزهای پلکانی نیز که تا حدودی سرعت کنترل می‌گردد احتمال وقوع کاویتاسیون توسط محققین مورد مطالعه قرار گرفته است (Terrier, 2022; Matos & Novakovski, 2022; Frizell et al, 2013).

در تمامی سازه‌هایی که سیال به سرعت بالا می‌رسد نظیر سرریز سد، باید پدیده کاویتاسیون مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد (Samani, 2015). روش‌های کنترل و پایش سازه‌ها می‌توانند در شناسایی نقاط مستعد آسیب‌دیدگی و یا در معرض آسیب‌دیدگی کمک شایانی کنند که در نهایت منجر به رفع عیوب و نقص‌های موجود قبل از تخریب سازه گردد. از این رو، بسیار مهم است که با استفاده از یک الگوریتم مناسب اقدام به شناسایی نقاط در معرض آسیب و آسیب‌دیده توسط کاویتاسیون در کوتاه‌ترین زمان نموده و اقدام به برطرف کردن این موارد پیش از خرابی کامل نمود. در این تحقیق به پایش سلامتی سرریز سدها در پدیده کاویتاسیون با استفاده از الگوریتم طبقه‌بندی نزدیک‌ترین همسایه ۱ پرداخته می‌شود. این الگوریتم در پیش‌بینی کاویتاسیون سد کارون ۱ استفاده شده است (Kermani, 2018). در تحقیقات دیگری ریسک وقوع کاویتاسیون بر روی سرریزها بررسی شد (Gabriel, 2021) و تحلیل ریسک خرابی تنداب سرریزها در سرعت‌های بالا ارائه گردید (Wan, 2018). و نهایتاً بحث قابلیت اعتماد سرریزها در برابر کاویتاسیون مطرح گردید (Azhdary Moghadam, 2020).

با مرور بر تحقیقات گذشته، مدل‌های عددی موجود قادر به پهنه‌بندی سطوح سرریز در برابر کاویتاسیون نیستند و نیاز به یک الگوریتم جانبی برای طبقه‌بندی رویه سرریز در برابر خطر کاویتاسیون دارند. با توجه به خرابی سرریزهایی که حتی توسط مدل‌های عددی تحلیل شده‌اند، پهنه‌بندی سرریز به مناطق مختلف از نظر ریسک خرابی در برابر کاویتاسیون ضروری به نظر می‌رسد تا بتوان نسبت به حفاظت آن و یا نصب سیستم‌های هواده اقدام نمود.

با توجه به آنچه گفته شد می‌توان به اهمیت پهنه‌بندی خطر کاویتاسیون با استفاده از روش‌های داده‌کاوی به منظور پیش‌بینی این

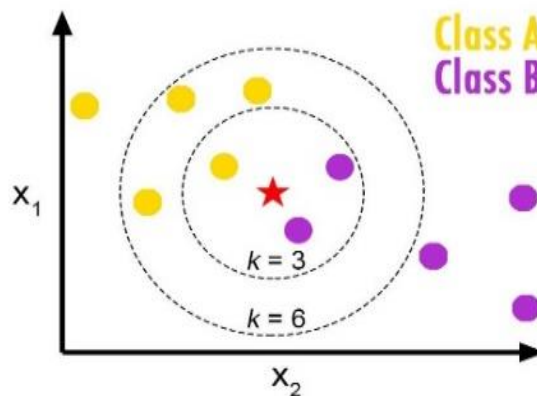
پدیده پی برد. هدف پژوهش حاضر مشخص کردن روشی برای چنین پهنه‌بندی در سرریزهای شوت و یافتن مدل طبقه‌بندی خطر مناسب برای پیش‌بینی شاخص کاویتاسیون در نقاط مختلف یک سرریز است.

مواد و روش‌ها

الگوریتم طبقه‌بندی نزدیک‌ترین همسایه

یکی از دلایل اصلی پرکاربرد بودن الگوریتم‌های طبقه‌بندی ۱ آن است که «تصمیم‌گیری» یکی از چالش‌های اساسی موجود در اغلب پروژه‌های تحلیلی است. برای مثال، تصمیم‌گیری درباره اینکه نقطه x از یک سرریز پتانسیل لازم برای مورد هدف قرار داده شدن در فرآیند کاویتاسیون را دارد یا خیر و یا اینکه آیا نقطه دیگر y مصون از این پدیده است یا نه از جمله مسائل تصمیم‌گیری در تجهیز یک سرریز به حساب می‌آیند که در فرآیند تحلیل طبقه‌بندی قصد پاسخ‌دهی به آن‌ها وجود دارد. نتایج این تحلیل‌ها بسیار تأمل‌برانگیز هستند و به‌طور مستقیم به پیاده‌سازی نقشه راه در طراحی یک سازه مهم مانند سرریز سد کمک می‌کنند. یکی از روش‌های پرکاربرد طبقه‌بندی، یعنی روش K نزدیک‌ترین همسایگی است. از مزایای این روش می‌توان گفت که هیچ پیش‌فرضی در مورد داده‌ها وجود ندارد. این الگوریتم ساده بوده و دقت نسبتاً بالایی دارد. همچنین این روش به‌صورت چندمنظوره در مسائل طبقه‌بندی و رگرسیون می‌تواند استفاده شود. البته این روش محدودیت‌هایی دارد از جمله اینکه نیاز به حافظه بالا دارد چرا که الگوریتم، تمام داده‌های قبلی را ذخیره می‌کند. همچنین مرحله پیش‌بینی در تعداد همسایگی‌های بزرگ (N) ممکن است کند باشد و اینکه این روش به ویژگی‌های نامناسب و مقیاس داده‌ها حساس است.

در الگوریتم طبقه‌بندی نزدیک‌ترین همسایه با استفاده از داده‌های معلومی که در همسایگی نقاط ناشناخته هستند، مشخصات این نقاط پیش‌بینی می‌شوند. همسایگی بر اساس نزدیک‌ترین فاصله و با استفاده از توابع پایه‌ای به دست می‌آید. داده‌های ورودی به این الگوریتم نیاز به نرمال‌سازی دارند تا این داده‌ها در یک محدوده مشخص قرار گیرند. این الگوریتم در طبقه‌بندی داده‌ها و برآورد مشخصات مجهول داده، با در نظر گرفتن تشابه حداکثری داده‌های مجهول با داده‌های معلومی که در نزدیکی آن‌ها قرار دارند، بکار برده می‌شود (Zavrel, 1997; Wu, 2009; Macleod et al, 1987).



شکل ۱- همسایه‌ها در الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی

داده‌های آزمایشی ۲ با در نظر گرفتن کمترین فاصله نسبت به داده‌های آموزشی ۳ طبقه‌بندی می‌شوند. بر این اساس در ابتدا با استفاده از فاصله اقلیدسی طبق رابطه (۱) فاصله بین داده‌های آزمایشی و آموزشی محاسبه شده و مبنای انتخاب بهترین فاصله در نظر گرفته می‌شود.

$$d(X, Y) = \left[\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2 \right]^{0.5} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این رابطه X مقدار داده‌های آزمایشی و Y مقدار داده‌های آموزشی است که با توجه به پارامترهای تأثیرگذار بر وضعیت شوت سد از لحاظ وقوع کاونتاسیون، تعداد و نوع داده‌های ورودی آموزشی متغیر خواهد بود. در گام بعدی با توجه به فاصله اقلیدسی به‌دست‌آمده برای هر سری داده ارزش‌گذاری کمی این سری داده‌ها انجام گرفته و با توجه به این ارزش‌گذاری، مجموع داده‌های در دسترس از کمترین فاصله (بیشترین ارزش) تا بیشترین فاصله (کمترین ارزش) طبقه‌بندی می‌شوند. تخمین تعداد همسایه‌های قابل‌پذیرش (K) از مهم‌ترین مراحل پیاده‌سازی این الگوریتم است، زیرا با بزرگ در نظر گرفتن این پارامتر امکان تداخل کلاس‌های طبقه‌بندی‌شده باهم وجود دارد و همین‌طور با کوچک در نظر گرفتن این پارامتر ممکن است که کلاس موردبررسی تنها بر اساس یک تک نقطه طبقه‌بندی شود، بنابراین در تخمین این پارامتر باید به نکات پایه‌ای در الگوریتم توجه کرد. یکی از راهکارهای تخمین پارامتر K روش اعتبارسنجی متقابل λ است که بر مبنای سنجش خطا، به دست می‌آید (Ferrer et al, 2003; Hastie et al, 2008).

روش استفاده‌شده در این مقاله یک فرآیند طبقه‌بندی است که بر اساس مدل عددی قطعی (غیر احتمالاتی) (λ) به هر نقطه از سرریز یک طبقه (پهنه) را اختصاص می‌دهد و بر اساس آن می‌توان راجع به حفاظت رویه سرریز در برابر کاونتاسیون تصمیم‌گیری نمود. بنابراین محاسبات اندیس کاونتاسیون توسط مدل عددی Flow-3D و به‌طور قطعی انجام می‌شود. اما این برنامه قادر به پهنه‌بندی یا طبقه‌بندی λ نیست لذا از الگوریتم KNN^4 برای پهنه‌بندی و تعیین اندیس کاونتاسیون در هر نقطه از سرریز یا هر محدوده‌ای از سرریز استفاده می‌شود.

مشخصات سرریز سد سورک

سد خاکی سورک در ۴۰ کیلومتری استان چهارمحال و بختیاری و در نزدیکی روستای سورک واقع شده است. این سد برای جلوگیری از خسارت سیل و تأمین آب آشامیدنی و آب موردنیاز کشاورزی منطقه در سال ۱۳۸۴ ساخت آن شروع و در سال ۱۳۹۴ به پایان رسید. سد سورک و دارای سرریز اوجی با تنداب است. تنداب این سد دارای دو شیب مجزا (۱۴ و ۲۸ درجه) بوده که تغییر شیب شوت در فاصله ۷۳ متری از شروع شوت صورت می‌گیرد (Samadi et al, 2020). به‌این‌ترتیب مشخصات فنی سد موردنظر در جدول ۱ ارائه شده است. اطلاعات سرریز سد سورک در استان چهارمحال بختیاری (۱۳۸۴-۱۳۹۴) از گزارشی از شرکت آب منطقه‌ای استان اخذ شده است. موقعیت جغرافیایی سد سورک در شکل ۲ ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات سد سورک

خاکی	نوع سد
۳۸/۴۹ m	ارتفاع سد
mcm۲۵	حجم مخزن
m۵۹۰	طول تاج
m۲۰	عرض شوت
m۲۱۲۰	تراز تاج سرریز
m۲۱۱۹/۸۴	تراز ورودی سرریز
m3/s۲۳۱	دبی طرح سیلاب
۱:۱	شیب بالادست
m۷۳	طول اولین قسمت شوت
۱۴	شیب اولین قسمت شوت (درجه)
۲۸	شیب دومین قسمت شوت (درجه)
$y = 0.216x1.748^*$	معادله اوجی سرریز

روش محاسبه اندیس کاونتاسیون

محاسبه احتمال وقوع پدیده کاونتاسیون از طریق مقایسه اندیس کاونتاسیون (σ) با اندیس بحرانی کاونتاسیون (σ_{cr}) امکان‌پذیر است. اندیس کاونتاسیون از طریق رابطه (λ) به دست می‌آید که در آن p_0 فشار سیال، p_v فشار بخار مایع در دمای محیط و v_0 سرعت سیال

۱ Cross-Validation

۲ Deterministic

۳ Classification

۴ K-Nearest Neighbors(KNN)

در محل موردنظر است (Falvey, 1990; Khatsuria, 2013).

$$\sigma = \frac{p_0 - p_v}{\frac{\rho v_0^2}{2}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این صورت اگر اندیس به دست آمده برابر یا کمتر از اندیس بحرانی باشد احتمال وقوع کاویتاسیون در نقطه مورد آزمایش بسیار زیاد است. اندیس کاویتاسیون در سرریزها با قوس قائم بر اساس رابطه (۳) به دست می آید.

$$\sigma = \frac{\frac{p_{atm}}{\gamma} - \frac{p_v}{\gamma} + h \cos \theta \pm \left(\frac{h v_0^2}{g r} \right)}{v_0^2 / 2g} \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن θ زاویه کف شوت نسبت به افق، r شعاع انحنای قوس قائم (علامت - در انحنای محدب و علامت + در انحنای مقعر)، $h \cos \theta$ عمق جریان عمود بر کف شوت، g شتاب ثقل و h ارتفاع فشار استاتیک است.



شکل ۲- موقعیت سد سورک

همانطور که ذکر شد، خطر کاویتاسیون هنگامی رخ می دهد که اندیس کاویتاسیون σ برابر و یا کوچک تر از اندیس بحرانی σ_{cr} شود. این مقدار بحرانی عمدتاً ناشی از هندسه جریان، شکل و ارتفاع ناهمواری های سطحی و موقعیت نقطه ای است که در آن، فشار و سرعت اندازه گیری شده اند.

هرچند اندیس کاویتاسیون شاخصی برای پیش بینی وقوع خلاء زایی در جریان سیالات است، اما به دلیل پیچیدگی مکانیزم وقوع کاویتاسیون، استفاده از این اندیس برای پیش بینی احتمال وقوع این پدیده به تنهایی کاربرد ندارد (Falvey, 1990; Jalili, 2011). جلیلی نشان داد که پارامترهای دیگری مانند سرعت جریان و زمان شروع کاویتاسیون نیز علاوه بر اندیس کاویتاسیون برای سنجش احتمال وقوع کاویتاسیون باید در نظر گرفته شود.

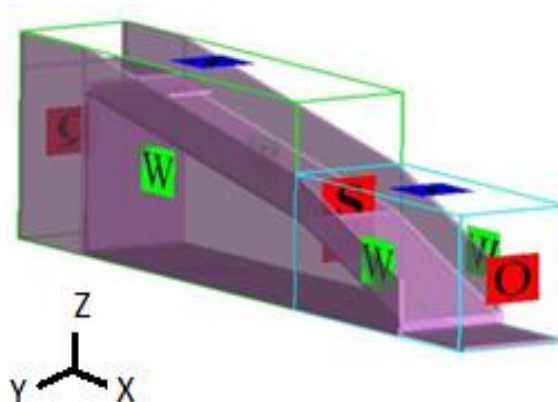
بر این اساس با توجه به اندیس کاویتاسیون، مقدار سرعت و فشار در نقاط مورد بررسی می توان از وقوع کاویتاسیون پیش گیری و یا زمان و منطقه وقوع آن را کنترل کرد. محدوده ای که اندیس کاویتاسیون نزدیک اندیس بحرانی باشد، به عنوان مقطع بحرانی در نظر گرفته می شود و باید طبق حدود اندیس کاویتاسیون طرح مناسب برای پیش گیری و کاهش خسارات احتمالی انجام گرفته شود. بنابراین با افزایش فشار و کاهش سرعت جریان در منطقه مورد نظر می توان اندیس کاویتاسیون را افزایش داد تا امکان وقوع کاویتاسیون کاهش یابد (Hamilton, 1984). علاوه بر سرعت و فشار که پارامترهای مهمی در کاویتاسیون هستند، با هوادهی در مقاطع مختلف شوت و همچنین ایجاد ناهمواری یکنواخت (افزایش زبری یکنواخت) در بستر شوت می توان از احتمال وقوع کاویتاسیون کاست. برخی از این موارد به عنوان روش های کاهش احتمال کاویتاسیون در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است.

مدل سازی عددی

در این تحقیق از نرم افزار Flow-3D برای شبیه سازی جریان روی شوت استفاده شده است. با توجه به اینکه شرایط جریان آشفتنه بر روی

سرریز شوت حاکم است از مدل RNG^۱ که از پرکاربردترین مدل‌های آشفتگی بوده استفاده شده است. در مدل‌سازی، ابتدا هندسه سرریز سد سورک با نرم‌افزار Autocad2014 ترسیم و سپس به نرم‌افزار Flow-3D وارد شد. فشار بخار برای آب ۲۵ درجه سانتی‌گراد برابر ۳/۳ کیلو پاسکال در نظر گرفته شد. در مرحله بعدی هندسه سرریز و شوت در قسمت شبکه‌بندی فراخوانی می‌شود. سپس ابعاد مورد استفاده در شبیه‌سازی و حدود اجزای شوت در سه جهت طولی X، عرضی Y و ارتفاعی Z کنترل شده و شبکه‌بندی موردنظر اعمال می‌گردد. به دلیل دو شبیه بودن شوت و طول نسبتاً زیاد آن، از شبکه‌بندی با سلول‌های مکعبی به ابعاد ۰/۵ متر استفاده شد. مطابق شکل ۳، شرط مرزی مقاطع Ymin، Ymax و Zmin در هر دو شیب به صورت شرط مرزی دیواره صلب (Wall) تعریف می‌گردد. همچنین در مقطع Zmax که سطح آزاد جریان است شرط مرزی تقارن (Symmetry) تعریف می‌گردد. همچنین برای Xmin و Xmax در تقاطع دو شیب شرط مرزی Symmetry تعیین می‌گردد. در صفحه Xmin و Xmax شرایط مرزی ورودی و خروجی جریان تعریف شده است. شرط مرزی دبی مشخص برای قسمت ورودی (Xmin) و شرط مرزی خروجی (Outflow) برای قسمت خروجی (Xmax) انتخاب گردید. ارتفاع آب پشت سرریز تا ۱ متر بالاتر از تاج سرریز در نظر گرفته شده است.

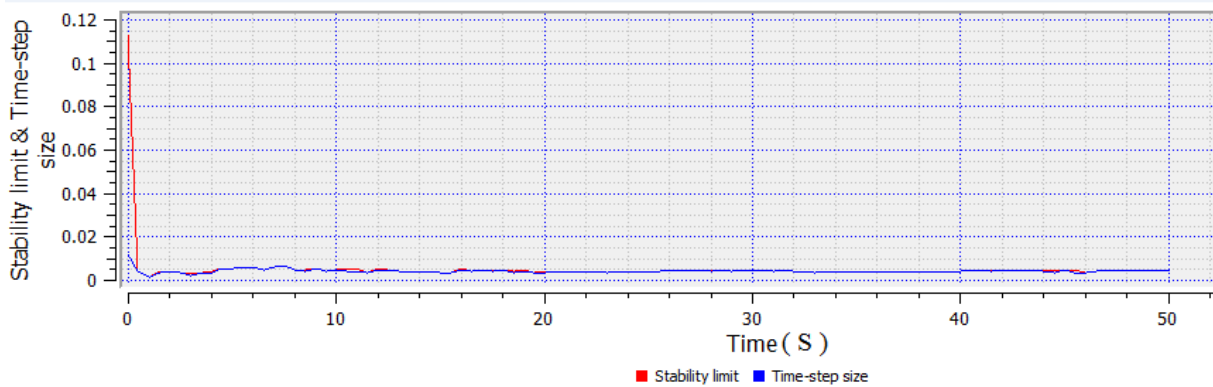
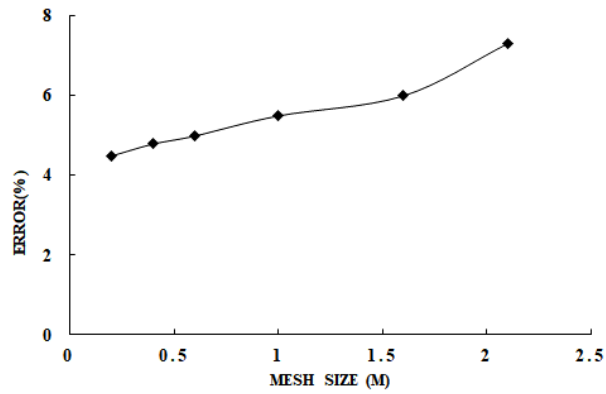
شروع
انتقال هندسه سرریز از اتوکد به نرم‌افزار SolidWorks
انتقال مدل SolidWorks به نرم‌افزار Flow-3D
تعیین شرایط مرزی
صحت‌سنجی ابعاد مش بندی و انتخاب مدل آشفتگی
پیش‌بینی به کمک الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی
پایان



شکل ۳- فلوچارت و شرایط مرزی مورد استفاده در شبیه‌سازی

بررسی نتایج

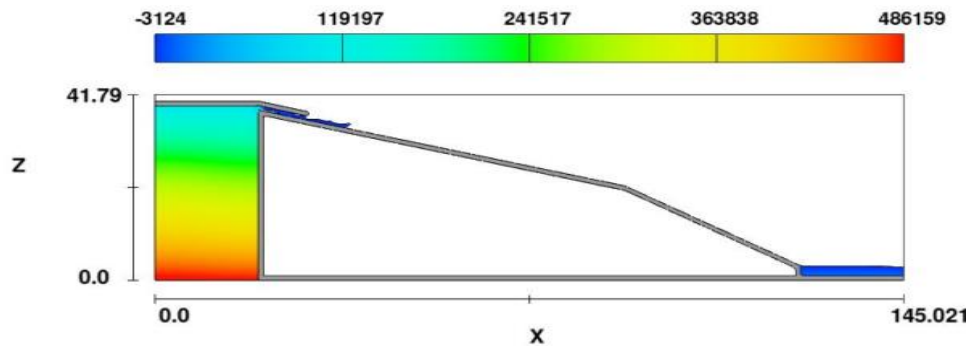
در روند شبیه‌سازی جریان روی شوت پس از ثابت شدن دبی عبوری از تاج سرریز باید به یک جریان پایدار رسید. در ابتدا با سعی و خطا، شبکه‌بندی مناسب برگزیده شد و زمانی حدودی ۳۰ تا ۵۰ ثانیه به‌عنوان زمان کافی برای رسیدن جریان به حالت پایدار تخمین زده شد و زمان شبیه‌سازی در بازه‌ی زمانی موردنظر تنظیم گردید. نتایج نشان از همگرایی تغییرات گام‌های زمانی در نرم‌افزار Flow-3D در این محدوده دارد که به این ترتیب زمان پایان شبیه‌سازی تعیین گردید. در شکل ۴ تحلیل عدم وابستگی جواب‌ها به اندازه شبکه و تغییرات حد پایداری و گام زمانی تا ۵۰ ثانیه پس از شبیه‌سازی موردنظر ارائه شده است که همواره گام زمانی کمتر از حد پایداری بوده و همگرایی مسئله تضمین خواهد شد. همچنین ابعاد شبکه پس از تحلیل حساسیت برابر ۰/۵ متر در نظر گرفته شد. در این راستا با ابعاد مختلف شبکه چندین اجرا از برنامه گرفته شد و مطابق شکل ۴ بهترین نتیجه ۰/۵ متر به دست آمد. البته می‌توان ابعاد شبکه را کمتر از ۰/۵ متر در نظر گرفت مثلاً ۰/۱ متر تا نتایج دقیق‌تر شود، ولی آنچه مهم است این بود که بتوان در کمترین زمان ممکن به بهترین نتیجه رسید.



■ Stability limit ■ Time-step size

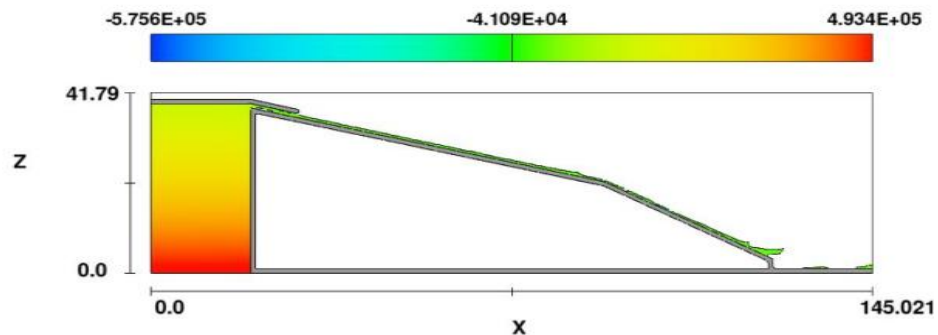
شکل ۴- تحلیل وابستگی به اندازه شبکه و تغییرات گام‌های زمانی در طول شبیه‌سازی

pressure contours



شکل ۵- توزیع فشار برحسب Pa در ابتدای شبیه‌سازی

pressure contours



شکل ۶- توزیع فشار برحسب Pa در انتهای شبیه‌سازی

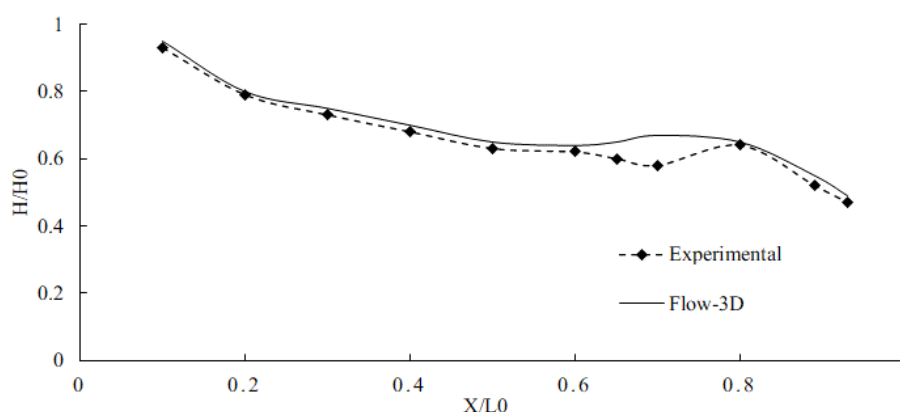
صحت‌سنجی مدل عددی

برای صحت‌سنجی مدل عددی و مدل آشفته‌گی انتخاب‌شده از نتایج مدل آزمایشگاهی مرجع (Samadi et al, 2020). استفاده شد. مدل فیزیکی سرریز سد سورک با مقیاس هندسی ۱:۵۰، در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد ساخته و نصب گردیده است. شاسی مدل از جنس فلز و خود مدل از جنس پلکسی‌گلس ساخته شد. جهت شکل‌دهی صفحه‌های پلکسی‌گلس در قسمت اوجی سرریز، از قالب چوبی استفاده شد. با اتمام مراحل ساخت، مدل در انتهای فلوم موجود در آزمایشگاه که دارای عرض و عمق ۶۰ سانتی‌متر و طول ۲۰ متر بود، نصب و راه‌اندازی گردید. سیستم پمپاژ و چرخش آب در این آزمایشگاه در بهترین راندمان قادر به تأمین ۷۰ لیتر بر ثانیه جریان در فلوم بود که برای ایجاد حداکثر دبی سیلاب طراحی سرریز سد سورک طبق مقیاس مدل، کفایت می‌کرد. برای اندازه‌گیری دبی جریان از سرریز مثلی واقع در انتهای فلوم استفاده شد. در طول مسیر جریان در سرریز از پیزومتر جهت اندازه‌گیری فشار، استفاده شد. شکل (۷) محل نصب پیزومترها را نشان می‌دهد. در مناطقی که تغییر ناگهانی شیب و رقوم کف وجود داشت، پیزومترها با فاصله کمتر نصب گردید. با برقراری پنج دبی مختلف در مدل نصب‌شده و با توجه به امکانات موجود در آزمایشگاه، سرعت به‌وسیله لوله پیتوت (با دقت ۰/۱ m/s)، فشار به‌وسیله پیزومتر (با دقت ۱ mm) و عمق جریان به کمک عمق‌سنج کولیس‌دار (با دقت ۰/۱ mm) اندازه‌گیری گردید.

در شکل ۸ با توجه به شرایط هیدرولیکی جریان، پروفیل سطح آب از تاج سرریز تا انتهای پای شوت در مدل عددی با مدل آزمایشگاهی برای دبی طراحی ۲۳۱ مترمکعب بر ثانیه مقایسه شده است. در این نمودار از نسبت بی‌بعد فاصله از تاج سرریز به طول شوت $(\frac{X}{L_0})$ در محور افقی و از نسبت بی‌بعد عمق جریان در راستای شوت به عمق جریان در تاج سرریز $(\frac{h}{h_0})$ در محور قائم استفاده می‌گردد. حداکثر خطای مدل عددی نسبت به مدل آزمایشگاهی در محل تغییر دو شیب برابر ۵ درصد به دست آمد.



شکل ۷- نمایی از مدل فیزیکی سرریز سد سورک و تابلوی پیزومترها (Samadi et al, 2020)



شکل ۸- مقایسه عمق جریان مدل آزمایشگاهی و مدل عددی در محور مرکزی کانال شوت

همان‌طور که مشخص است مدل عددی، پروفیل سطح آب در شوت سرریز را با دقت قابل قبولی برآورد کرده است. البته در مقطعی که شیب شوت تغییر می‌کند، عمق جریان مدل عددی بیشتر از عمق مدل آزمایشگاهی جریان است. به نظر می‌رسد اصطکاک و زبری اعمال‌شده در مدل عددی که بر مبنای جنس فلوم انتخاب شده است بیش از مقدار واقعی مدل آزمایشگاهی بوده و باعث آرام شدن جریان و افزایش عمق شده باشد. در سایر نقاط نتایج نشان از دقت قابل قبول مدل مورد استفاده می‌دهد. برای تعیین مقدار خطا در برآورد عمق جریان توسط نرم‌افزار از پارامترهای جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین مربعات خطا (MSE) و میانگین خطای مطلق (MAE)

استفاده می‌گردد که به ترتیب در روابط (۴)، (۵) و (۶) ارائه شده‌اند با توجه به این روابط، مقادیر به‌دست‌آمده خطای مربوط به مدل شبیه‌سازی شده در جدول ۲ ارائه شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_e - x_0)^2} \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_e - x_0)^2 \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_e - x_0| \quad \text{رابطه (۷)}$$

که در این روابط، n تعداد نمونه، x_0 مقدار گزارش شده در مدل واقعی و x_e مقدار برآورد شده توسط روش به‌کاررفته در محاسبات عددی است.

خطای مدل عددی نسبت به مدل آزمایشگاهی در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج به‌دست‌آمده، نشان‌دهنده دقت مدل عددی مورد استفاده در شبیه‌سازی جریان گذرنده از شوت سد سورک با نرم‌افزار Flow-3D است. در ادامه از پارامترهای خروجی مدل عددی برای محاسبه اندیس کاویتاسیون استفاده می‌گردد.

جدول ۲- پارامترهای سنجش خطای مدل (۲-۱۰×)

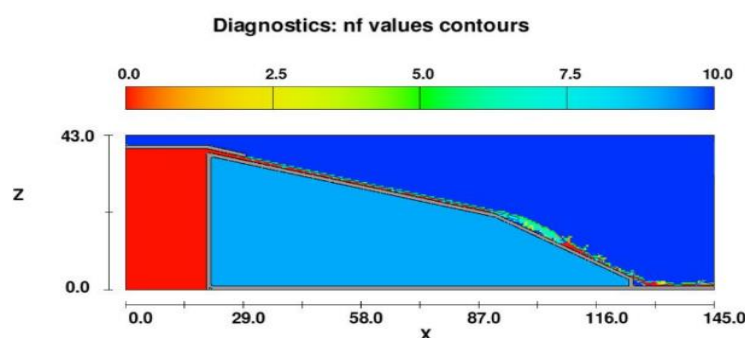
پارامتر	RMSE	MSE	MAE
عمق (m)	۲٫۸۳	۰٫۰۸	۲٫۱
فشار (Pa)	۰٫۲۶	۰٫۰۰۰۶۷	۰٫۱۹
سرعت (m/s)	۰٫۲۳	۰٫۰۰۰۵۳	۰٫۱۶

عمق جریان روی سرریز در تمامی دبی‌ها به‌وسیله عمق سنج در دو محور کنار و مرکز برداشت گردید. در شکل ۸ تغییرات سطح آب در مدل قابل مشاهده است. روند تغییرات عمق در طول سرریز کاهش یافته و همواره بیشترین مقدار عمق بر روی تاج سرریز و کمترین آن در انتهای سرریز مشاهده گردید. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود عمق آب در بدو ورود به قسمت شوت کاهش شدیدی دارد این افت آب به دلیل تغییر وضعیت جریان از زیربحرانی به فوق بحرانی است. همچنین جریان در بالادست سرریز آرام و با توزیع یکنواخت به روی سرریز منتقل می‌گردد که این وضعیت در مدل تحقق یافته است. با توجه به امواج عرضی تشکیل شده در قسمت شوت مقدار عمق آب در محور مرکزی مقداری بیشتر از عمق آب در محور کناری بوده است. در بدو ورود آب به قسمت دوم شیب عمق آب مقداری افزایش یافته است با نظر به این‌که هیچ‌گونه جدایش جریان در مدل فیزیکی مشاهده نگردید، احتمال می‌رود اختلاط زیاد هوا با آب در قسمت تغییر شیب ناگهانی دلیل رخ دادن این اتفاق باشد.

نتایج و بحث

اندیس کاویتاسیون در شوت سرریز

با توجه به پارامترهای به‌دست‌آمده از نتایج مدل Flow-3D، اندیس کاویتاسیون در راستای جریان روی شوت طبق شکل ۹ به دست می‌آید.



شکل ۹- تخمین محل وقوع کاویتاسیون در مدل سرریز

هنگامی که در مسئله‌ای، سطوح آزاد یا مرز مشترک دو سیال وجود دارد، لازم است سلول‌هایی که خالی هستند یا حاوی یک سطح آزاد یا پر از یک مایع هستند تشخیص داده شود. طبق تعریف، سلول سطحی سلولی است که مرز مشترک دو سیال مثلاً آب‌وهوا از آن می‌گذرد. نوع دیگری از سلول‌ها هستند که در آن‌ها کاویتاسیون اتفاق می‌افتد. بنابراین در یک مسئله جریان می‌توان تمامی سلول‌ها را برچسب‌گذاری نمود. در جدول ۳ تفسیر مقادیر اندیس NF (نماد وقوع کاویتاسیون در Flow-3D است) ارائه شده است. اندیس NF نماد وضعیت سیال در سلول موردبررسی از نظر وقوع کاویتاسیون است. بر این اساس از ۹۰ الی ۱۱۵ متری یا ۷۰ الی ۹۵ متری از تاج سرریز مستعد وقوع کاویتاسیون است زیرا اندیس NF در این مناطق برابر ۷ است.

جدول ۳- تفسیر مقادیر مختلف NF

NF	نوع سلول
۰	سلول پر از سیال
۱	سلول سطحی-سیال در چپ
۲	سلول سطحی-سیال در راست
۳	سلول سطحی-سیال در جلو
۴	سلول سطحی-سیال در عقب
۵	سلول سطحی-سیال در زیر
۶	سلول سطحی-سیال در بالا
۷	سلول سطحی-سلول کاویتاسیونی
۸	سلول خالی از سیال

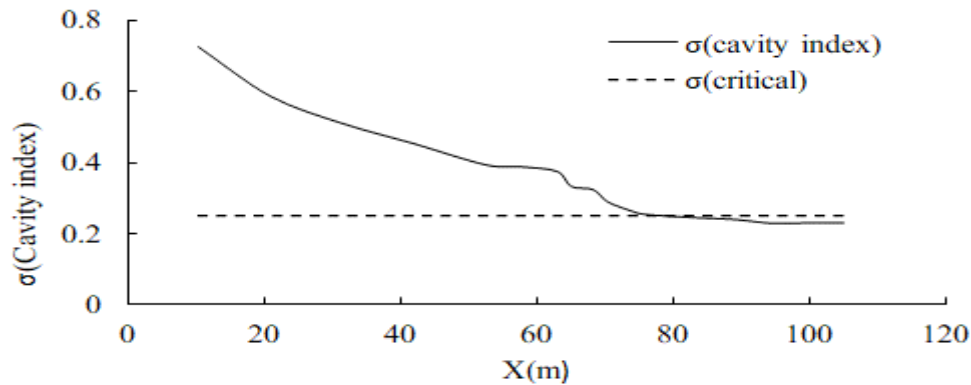
همان‌طور که در شکل ۹ مشخص است، نرم‌افزار Flow-3D از اندیس کاویتاسیون (σ) استفاده نمی‌کند. لذا در این بخش، ابتدا نقاط مستعد وقوع کاویتاسیون بر مبنای خروجی مدل Flow-3D و مقدار بیشینه سرعت در طول شوت استخراج شده و سپس اندیس کاویتاسیون با استفاده از رابطه (۲) در این نقاط و طبق جدول ۴ محاسبه می‌گردد.

جدول ۴- اندیس کاویتاسیون به دست آمده از مدل عددی

امکان وقوع کاویتاسیون	σ	فاصله از تاج سرریز (m)
$(-) \sigma > 0.25$	-۰/۷۲	۱۰/۵
$(-) \sigma > 0.25$	-۰/۵۹	۲۱
$(-) \sigma > 0.25$	-۰/۵۱	۳۱/۵
$(-) \sigma > 0.25$	-۰/۴۵	۴۲
$(-) \sigma > 0.25$	-۰/۳۹	۵۲/۵
$(-) \sigma > 0.25$	-۰/۳۸	۵۷/۷۵
$(-) \sigma > 0.25$	-۰/۳۷	۶۳
$(-) \sigma > 0.25$	-۰/۳۳	۶۵/۱۰
$(-) \sigma > 0.25$	-۰/۳۲	۶۸/۲۵
$(-) \sigma > 0.25$	-۰/۲۹	۷۰/۴۰
$(-) \sigma > 0.25$	-۰/۲۶	۷۳/۵۰
$(-) \sigma > 0.25$	-۰/۲۶	۷۵/۶۰
$(+) \sigma < 0.25$	-۰/۲۴	۷۸/۷۵
$(+) \sigma < 0.25$	-۰/۲۴	۸۴
$(+) \sigma < 0.25$	-۰/۲۳	۸۹/۲۵
$(+) \sigma < 0.25$	-۰/۲۳	۹۴/۵۰
$(+) \sigma < 0.25$	-۰/۲۲	۹۹/۷۵
$(+) \sigma < 0.25$	-۰/۲۲	۱۰۵

از مقادیر اندیس کاویتاسیون جریان گذرنده از شوت سد سورک مشخص می‌شود که در مقاطع پایانی شوت امکان وقوع کاویتاسیون

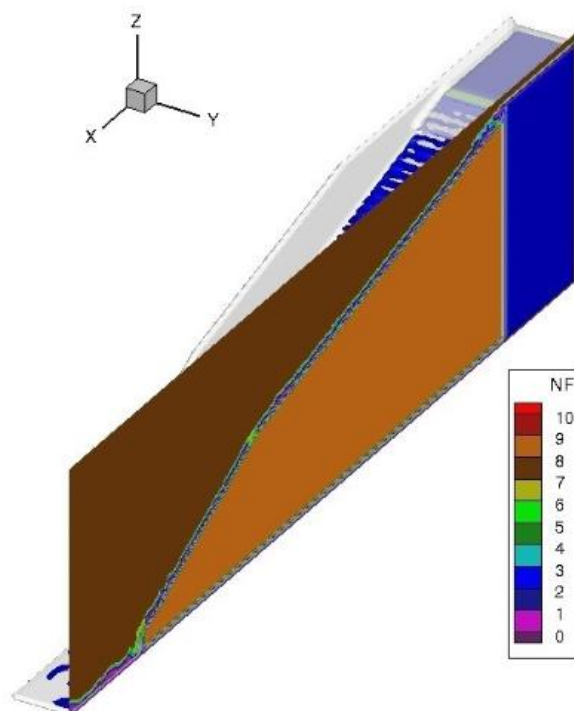
وجود دارد. در شکل ۱۰ روند تغییرات اندیس کاویتاسیون از تاج سرریز تا انتهای شوت ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است در اواسط شیب دوم مقدار اندیس کاویتاسیون به اندیس بحرانی کاویتاسیون نزدیک شده و این روند کاهشی تا انتهای شوت ادامه پیدا می‌کند.



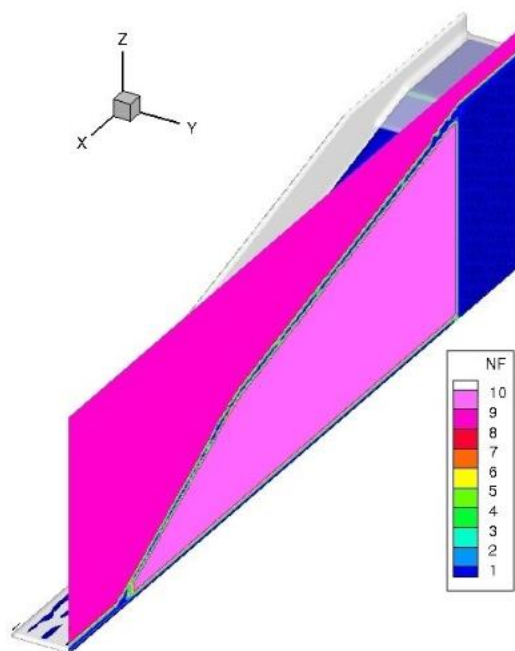
شکل ۱۰- روند تغییرات اندیس کاویتاسیون در طول شوت

نتایج نشان دهنده این است که تمامی مناطقی که مستعد وقوع کاویتاسیون هستند دارای اندیس کاویتاسیون $0.17 < \sigma < 0.25$ هستند. بنابراین نیازی به تخریب و اصلاحات ساختاری در این شوت نیست و تنها با تغییراتی در طراحی می‌توان از وقوع کاویتاسیون جلوگیری کرد.

همان‌طور که ذکر شد اعمال سیستم هوادهی و زبری یکنواخت از روش‌های تصحیح شرایط موجود در شوت سرریز برای پیشگیری از وقوع کاویتاسیون و یا کاهش خسارات ناشی از آن است. به‌همین منظور در این تحقیق با فعال کردن امکان هوادهی در مدل عددی و در نظر گرفتن دو زبری متفاوت در بازه ۱ تا ۵ میلی‌متر (Samani, 2015) مقدار اندیس کاویتاسیون برآورد شده و مؤثرترین حالت برای تصحیح شرایط سرریز معرفی می‌گردد. در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مدل شوت سرریز با زبری‌های مختلف و با استفاده از خروجی نرم‌افزار Tecplot ارائه شده است (در شکل ۱۲ جاهایی که به رنگ سبز تیره یعنی در کانور به عدد ۷ می‌رسد یعنی کاویتاسیون اتفاق افتاده است).

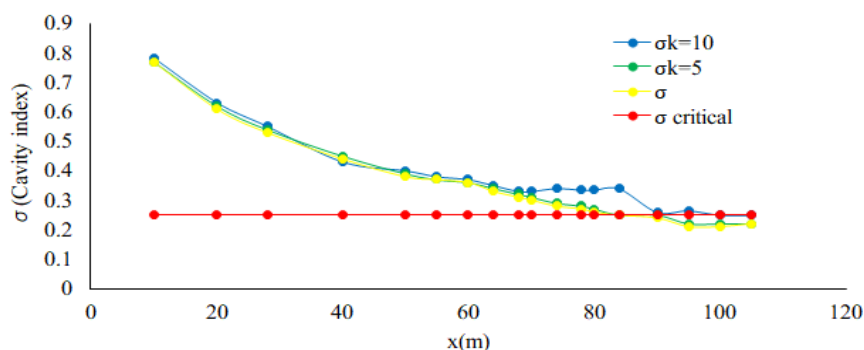


شکل ۱۱- تخمین محل کاویتاسیون در مدل شبیه‌سازی شده با اعمال هوادهی و زبری ۱/۵ میلی‌متر



شکل ۱۲- تخمین محل کاویتاسیون در مدل شبیه‌سازی شده با اعمال هوادهی و زبری ۲/۵ میلی‌متر

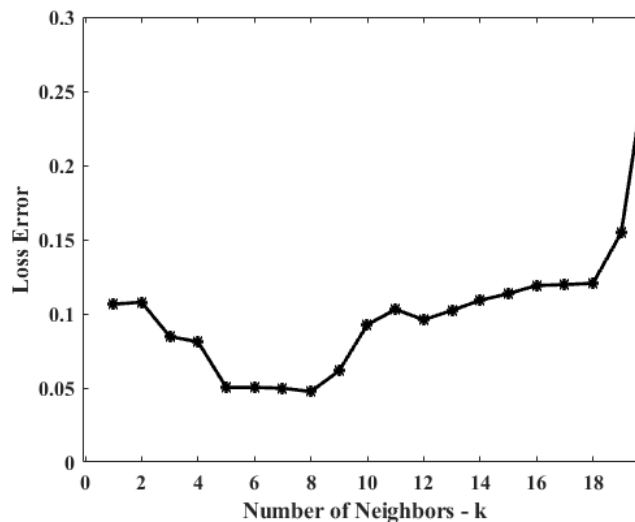
همان‌طور که در شکل ۱۱ مشخص است، در حالت زبری ۱/۵ میلی‌متری و هوادهی تنها در چهار مقطع، امکان وقوع کاویتاسیون وجود دارد که نشان از بهبود عملکرد شوت در برابر این پدیده است. طبق شکل ۱۲، با وجود اینکه در محل تقاطع دو شیب که به دلیل جدایش جریان احتمالی و اختلاط هوا با آب و کاهش فشار، منطقه پرخطر برای وقوع کاویتاسیون است مقدار اندیس کاویتاسیون نسبت به مناطق نزدیک به این منطقه افت می‌کند، اما برخلاف حالت اولیه که از زبری و هوادهی در مدل استفاده نشده بود در حالت استفاده هم‌زمان از هوادهی و تعریف زبری یکنواخت در سطح شوت موجب افزایش اندیس کاویتاسیون در سرتاسر شوت می‌شود، بطوریکه اندیس کاویتاسیون در سرتاسر شوت بزرگ‌تر از مقدار اندیس بحرانی کاویتاسیون (۰/۲۵) است. بنابراین می‌توان زبری ۲/۵ میلی‌متری به همراه اعمال هوادهی را به‌عنوان طرح مناسب‌تر معرفی کرد. در شکل ۱۳ مقادیر اندیس کاویتاسیون برای سه حالت مورد استفاده (بدون زبری، زبری ۱/۵ میلی‌متر و زبری ۲/۵ میلی‌متر) مقایسه شده‌اند.



شکل ۱۳- روند تغییرات اندیس کاویتاسیون در طول شوت سد سورک در مدل‌های مختلف

در الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی، تخمین پارامتر K به‌عنوان تعداد همسایگی از مهم‌ترین مراحل استفاده از این الگوریتم است. بر این اساس در ابتدا با توجه به پارامترهای تأثیرگذار بر اندیس کاویتاسیون از قبیل سرعت جریان، عمق جریان، ضخامت زبری و فشار پیژومتریکی در مقطع مورد نظر به‌عنوان پارامترهای ورودی مدل مورد نظر تعیین می‌شوند. در مرحله بعدی با توجه به مقادیر اندیس کاویتاسیون در شوت سد سورک، وضعیت مقاطع مختلف این شوت از نظر خطر کاویتاسیون به سه حالت $0.45 < \sigma < 1$ (خطر کاویتاسیون باید مورد توجه قرار گیرد)، $0.25 < \sigma < 0.45$ (مقطع مورد نظر باید در برابر کاویتاسیون محافظت شود) و $\sigma < 0.25$

<0.17 (مقطع مورد نظر مستعد خرابی متوسط و شدید کاویتاسیون است) تقسیم‌بندی و طبقه‌بندی می‌شود. سپس با استفاده از روش اعتبارسنجی متقابل ۱ مقدار تعداد همسایگی بهینه (K) با کمترین خطای ممکن به دست می‌آید. بر همین اساس در شکل ۱۴ محدوده تغییرات مقدار K بر اساس پارامتر میانگین مربعات خطا ارائه شده است که طبق آن مقدار بهینه K برای داده‌های مورد استفاده در این مدل برآورد می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که در ابتدا مقدار خطای خالص از تعداد همسایگی روند کاهشی دارد تا در $K=8$ به حداقل مقدار خود برسد و در ادامه مقدار خطا روند افزایشی می‌گیرد و به این ترتیب $K=8$ به عنوان تعداد همسایگی بهینه انتخاب می‌گردد و در مدل نزدیک‌ترین همسایگی استفاده می‌شود.



شکل ۱۴- برآورد مقدار بهینه پارامتر K بر اساس روش اعتبارسنجی متقابل

پس از تعیین تعداد بهینه همسایه‌ها (K)، برای سنجش وضعیت مقاطع مورد بررسی و تعیین وضعیت کاویتاسیون از الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی استفاده می‌شود. به این ترتیب طول شوت سد سورک در ۱۸ سطح مقطع مورد بررسی قرار گرفته و اندیس کاویتاسیون به دست آمده از این ۱۸ سطح مقطع به عنوان نماینده از وضعیت وقوع کاویتاسیون در کل شوت سد سورک در نظر گرفته می‌شود. البته باید توجه داشت که با بررسی مدل‌های مختلف شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار Flow-3D از شوت سد سورک مشخص شد که در ۷۰ متری تاج سرریز (نزدیکی محل تغییر شیب شوت) تغییرات اندیس کاویتاسیون حساسیت بیشتری داشته و از این فاصله به بعد اندیس کاویتاسیون کاهش می‌یابد، بنابراین مقاطع مورد بررسی برای سنجش احتمال وقوع کاویتاسیون و خطرات ناشی از وقوع آن در نزدیکی تغییر شیب شوت با فواصل کمتری نسبت به دیگر مقاطع شوت انتخاب شده است. در نهایت بر اساس الگوریتم طبقه‌بندی نزدیک‌ترین همسایگی که پارامترهای تأثیرگذار بر اندیس کاویتاسیون به عنوان داده‌های ورودی این الگوریتم هستند، وضعیت میزان آسیب و خطر وقوع کاویتاسیون برای ۱۸ مقطع مورد بررسی طبق جداول ۵ و ۶ ارائه شده است.

همان‌طور که از جداول ۵ و ۶ مشخص است، نتایج پهنه‌بندی به دست آمده از الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی با دقت مناسبی نسبت به نتایج پهنه‌بندی مدل عددی Flow-3D وضعیت شوت سد سورک در برابر احتمال وقوع کاویتاسیون و میزان آسیب ناشی از آن را پیش‌بینی می‌کند. به طوری که در حالت زبری $1/5$ میلی‌متر، از ۱۸ مقطع مورد بررسی توسط مدل نزدیک‌ترین همسایگی و نتایج حاصل از Flow-3D تنها در دو مقطع پایانی ($99/75$ و 105 متری از تاج سرریز) نتایج متفاوتی به دست آمد و مدل نزدیک‌ترین همسایگی برای سایر مقاطع به درستی انجام گرفته است. البته این تفاوت در نتایج حاصله از مدل نزدیک‌ترین همسایگی و نتایج حاصل از Flow-3D برای حالت زبری $2/5$ میلی‌متر برای دو مقطع (42 و $89/25$ متری از تاج سرریز) رخ داده است. البته با توجه به اینکه برخلاف نتایج حاصله از مدل Flow-3D مدل نزدیک‌ترین همسایگی برای این دو مقطع آسیب متوسط و شدید حاصل از کاویتاسیون را پیش‌بینی کرده است، بنابراین باید این دو مقطع مورد بررسی بیشتر قرار گیرد و پیشگیری‌ها در صورت لزوم در این مقاطع انجام گیرد. در مجموع تنها ۱۱ درصد از نتایج حاصل از مدل نزدیک‌ترین همسایگی و مدل شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار Flow-3D دارای تفاوت هستند.

جدول ۵- مقایسه وضعیت کایتاسیون شوت با زبری ۱/۵ میلی‌متر با استفاده از مدل نزدیک‌ترین همسایگی و Flow-3D

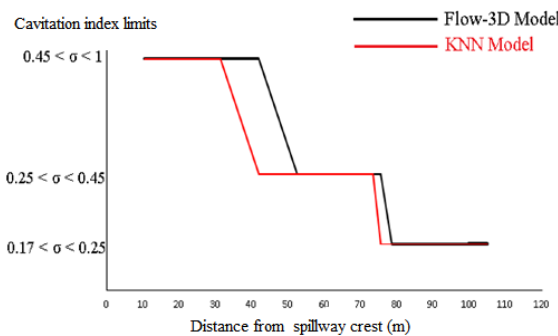
فاصله از تاج سرریز (m)	اندیس کایتاسیون (KNN model)	نوع پهنه بر مبنای KNN	نوع پهنه بر مبنای Flow-3D
۱۰/۵	$0.45 < \sigma < 1$	خطر کایتاسیون باید در نظر گرفته شود	خطر کایتاسیون باید در نظر گرفته شود
۲۱	$0.45 < \sigma < 1$	خطر کایتاسیون باید در نظر گرفته شود	خطر کایتاسیون باید در نظر گرفته شود
۳۱/۵	$0.45 < \sigma < 1$	خطر کایتاسیون باید در نظر گرفته شود	خطر کایتاسیون باید در نظر گرفته شود
۴۲	$0.25 < \sigma < 0.45$	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد
۵۲/۵	$0.25 < \sigma < 0.45$	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد
۵۷/۷۵	$0.25 < \sigma < 0.45$	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد
۶۳	$0.25 < \sigma < 0.45$	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد
۶۵/۱۰	$0.25 < \sigma < 0.45$	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد
۶۸/۲۵	$0.25 < \sigma < 0.45$	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد
۷۰/۴۰	$0.25 < \sigma < 0.45$	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد
۷۳/۵۰	$0.25 < \sigma < 0.45$	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد
۷۵/۶۰	$0.25 < \sigma < 0.45$	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد
۷۸/۷۵	$0.25 < \sigma < 0.45$	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد
۸۴	$0.25 < \sigma < 0.45$	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد
۸۹/۲۵	$0.25 < \sigma < 0.45$	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد
۹۴/۵۰	$0.25 < \sigma < 0.45$	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد
۹۹/۷۵	$0.17 < \sigma < 0.25$	خرابی متوسط تا شدید ایجاد می‌شود	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد
۱۰۵	$0.17 < \sigma < 0.25$	خرابی متوسط تا شدید ایجاد می‌شود	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد

جدول ۶- مقایسه وضعیت کایتاسیون شوت با زبری ۲/۵ میلی‌متر با استفاده از مدل نزدیک‌ترین همسایگی و Flow-3D

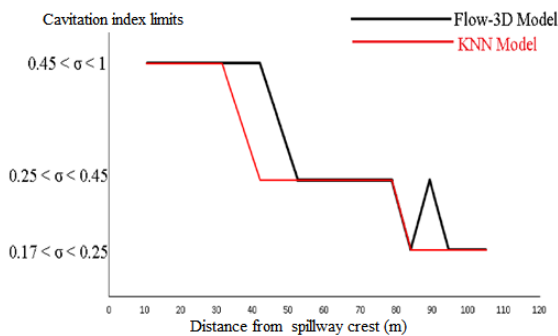
فاصله از تاج سرریز (m)	اندیس کایتاسیون (KNN model)	نوع پهنه بر مبنای KNN	نوع پهنه بر مبنای Flow3D
۱۰/۵	$0.45 < \sigma < 1$	خطر کایتاسیون باید در نظر گرفته شود	خطر کایتاسیون باید در نظر گرفته شود
۲۱	$0.45 < \sigma < 1$	خطر کایتاسیون باید در نظر گرفته شود	خطر کایتاسیون باید در نظر گرفته شود
۳۱/۵	$0.45 < \sigma < 1$	خطر کایتاسیون باید در نظر گرفته شود	خطر کایتاسیون باید در نظر گرفته شود
۴۲	$0.25 < \sigma < 0.45$	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد	خطر کایتاسیون باید در نظر گرفته شود
۵۲/۵	$0.25 < \sigma < 0.45$	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد
۵۷/۷۵	$0.25 < \sigma < 0.45$	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد
۶۳	$0.25 < \sigma < 0.45$	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد
۶۵/۱۰	$0.25 < \sigma < 0.45$	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد
۶۸/۲۵	$0.25 < \sigma < 0.45$	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد
۷۰/۴۰	$0.25 < \sigma < 0.45$	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد
۷۳/۵۰	$0.25 < \sigma < 0.45$	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد
۷۵/۶۰	$0.25 < \sigma < 0.45$	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد
۷۸/۷۵	$0.25 < \sigma < 0.45$	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد
۸۴	$0.25 < \sigma < 0.45$	خرابی متوسط تا شدید ایجاد می‌شود	خرابی متوسط تا شدید ایجاد می‌شود
۸۹/۲۵	$0.25 < \sigma < 0.45$	خرابی متوسط تا شدید ایجاد می‌شود	حفاظت در برابر کایتاسیون ضرورت دارد
۹۴/۵۰	$0.25 < \sigma < 0.45$	خرابی متوسط تا شدید ایجاد می‌شود	خرابی متوسط تا شدید ایجاد می‌شود
۹۹/۷۵	$0.17 < \sigma < 0.25$	خرابی متوسط تا شدید ایجاد می‌شود	خرابی متوسط تا شدید ایجاد می‌شود
۱۰۵	$0.17 < \sigma < 0.25$	خرابی متوسط تا شدید ایجاد می‌شود	خرابی متوسط تا شدید ایجاد می‌شود

به این ترتیب با توجه به حالات زبری کار شده بر روی مدل شبیه‌سازی شده از شوت سرریز سد سورک و مقایسه آن با نتایج به دست آمده از الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی، تطابق مناسبی بین نتایج نرم‌افزار Flow-3D و الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی مشاهده می‌گردد. بر همین اساس نتایج مربوط به امکان وقوع کایتاسیون و مقدار خسارات وارده بر نقاط مختلف شوت با استفاده از مدل عددی نرم‌افزار Flow-3D و استفاده از الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی در شکل‌های ۱۵، ۱۶ و ۱۷ ارائه شده است. به این ترتیب با توجه به شکل‌های مذکور، نتایج مربوط به طبقه‌بندی وضعیت مقاطع مختلف شوت مورد نظر با استفاده از نتایج خروجی مدل‌سازی با نرم‌افزار Flow-3D و الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی از دقت قابل قبولی برخوردارند. در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ با مقایسه طولی از نمودارها که در بازه $0 < \sigma < 0.17$ قرار

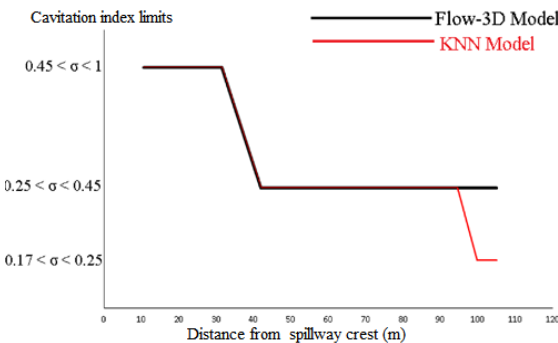
دارند مشخص می‌شود که در حالت بدون زبری، تعداد مقاطع مستعد وقوع کاویتاسیون با استفاده از روش الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی بیشتر از تعداد مقاطع مستعد در مدل Flow-3D برآورد شده است و برای زبری ۱/۵ میلی‌متر همین روند برقرار است. در بررسی حالت بهینه زبری ۲/۵ میلی‌متر با استفاده از الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی دو مقطع مستعد وقوع کاویتاسیون و آسیب‌های ناشی از آن هستند در صورتی که در حالت استفاده از نتایج خروجی مدل‌سازی صورت گرفته توسط نرم‌افزار Flow-3D هیچ‌کدام از مقاطع شوت مورد بررسی در حالت زبری ۲/۵ میلی‌متر مستعد وقوع کاویتاسیون نمی‌باشند و همان‌طور که از شکل ۱۷ مشخص است در این حالت اندیس کاویتاسیون در کمترین مقدار خود در بازه $0.45 < \sigma < 0.25$ قرار دارد. در شکل ۱۷ در فاصله ۹۴ متری اندیس کاویتاسیون یک افت ناگهانی داشته است که آن را می‌توان به جهت نزدیکی آن مقطع به محل تغییر شیب دانست.



شکل ۱۵- مقایسه محدوده شاخص کاویتاسیون در الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی و مدل Flow-3D بر روی شوت بدون زبری



شکل ۱۶- مقایسه شاخص کاویتاسیون در الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی و مدل Flow-3D بر روی شوت با زبری ۱/۵ میلی‌متر



شکل ۱۷- مقایسه شاخص کاویتاسیون در الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی و مدل Flow-3D بر روی شوت با زبری ۲/۵ میلی‌متر

نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی پدیده کاویتاسیون در سرریزهای شوت پرداخته شد. سرریز سد سورک به‌عنوان نمونه‌ای که در معرض وقوع پدیده کاویتاسیون قرار دارد مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا با کمک نرم‌افزار Flow-3D مدل سرریز سد سورک شبیه‌سازی شد و با توجه به پارامتر

RMSE که مقدار ۲/۸ سانتی‌متر را در عمق نشان می‌داد، این میزان اندک خطاها حاکی از آن بود که مدل‌سازی به خوبی صورت گرفته و نتیجه‌های به دست آمده از مدل عددی Flow-3D قابل پذیرش است. سپس از این مدل جهت تعیین مناطق آسیب‌پذیر در مقابل پدیده کاویتاسیون استفاده شد و مشخص گردید که در فاصله ۷۰ تا ۹۵ متری از تاج سرریز احتمال وقوع کاویتاسیون و خسارات ناشی از آن وجود دارد. در ادامه جهت مقابله با خسارات ناشی از کاویتاسیون از ایجاد زبری یکنواخت و هوادهی استفاده شد. با اعمال هوادهی و زبری ۲/۵ میلی‌متر در طول سرریز اندیس کاویتاسیون در تمام نقاط از حد بحرانی کاویتاسیون (۰/۲۵) بیشتر گردید که این امر نشان‌دهنده حفاظت سرریز از خسارات ناشی از کاویتاسیون است. جهت بررسی دقیق‌تر اندیس کاویتاسیون در نقاط مختلف سرریز از الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی با هشت همسایه استفاده شد که در اکثر مناطق نتایجی مشابه با مدل Flow-3D داشت. در الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی با اعمال زبری ۱/۵ میلی‌متر دو مقطع پایانی (۹۹/۷۵ و ۱۰۵ متری از تاج سرریز) حالت بحرانی‌تری نسبت به مدل نشان می‌دهند. با اعمال زبری ۲/۵ میلی‌متر نیز دو مقطع (۴۲ و ۸۹/۲۵ متری از تاج سرریز) حالتی بحرانی‌تری نسبت به مدل Flow-3D نشان می‌دهند که به معنی آسیب‌پذیری بیشتر این نواحی در مقابل پدیده کاویتاسیون است. عبارتی در خود مقطع ۸۹/۲۵ متری پس از تاج سرریز در مدل KNN خرابی متوسط تا شدید و در مدل Flow-3D فقط حفاظت در برابر کاویتاسیون برآورد می‌گردد. در مقطعی که در پایین دست مقطع ۸۹/۲۵ هستند در هر دو مدل KNN و Flow-3D خرابی متوسط تا شدید برآورد می‌شود که هر دو مدل یک نتیجه را نشان می‌دهند و در هر دو مدل مقطع پایین دست مقاطع بحرانی بوده و تخریب متوسط تا شدید برآورد می‌گردد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Azhdary Moghaddam, M., & Hasanlipour, A. (2020). Assessing the Reliability of Cavitation on Chute Spillway by Using Form and Monte Carlo Simulation Method. *Irrigation Sciences and Engineering*, 43(3), 87-99.
- Bilušn, I., Predin, A., & Skerget, L. (2007). The extended homogenous cavitation transport model, *Journal of Hydraulic Research*, 45(1), 81-87.
- Dong, Z., Liu, Z., Wu, Y., & Zhang, D. (2008). An experimental investigation of pressure and cavitation characteristics of high velocity flow over a cylindrical protrusion in the presence and absence of aeration. *J. Hydrodyn.* 20(1), 60-66.
- Dular, M., & Coutier-Delgosha, O. (2009). Numerical modelling of cavitation erosion. *International journal for numerical methods in Fluids* 61(12), 1388-1410.
- Falvey, H. T. (1990). *Cavitation in chutes and spillways* (p. 145). Denver: US Department of the Interior, Bureau of Reclamation.
- Ferrer-Troyano, F.J., Aguilar-Ruiz, J.S., & Riquelme, J.C. (2003). Empirical evaluation of the difficulty of finding a good value of k for the nearest neighbor. *International Conference on Computational Science*, Springer, Berlin, Heidelberg, Vol. 2658, 766-773.
- Frizell, K., Renna, F., & Matos, J. (2013). Cavitation Potential of Flow on Stepped Spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(6), 630-636.
- Gabriel, E. (2021). Risk Analysis of Cavitation in Hydraulic Structures. *World Journal of Engineering and Technology*, 9(3), 614-623.
- Ghazi, B., Daneshfaraz, R., & Jeihouni, E. (2019). Numerical investigation of hydraulic characteristics and prediction of cavitation number in Shahid Madani Dam's Spillway. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 7(4): 323-332.
- Hamilton, W.S. (1983). Preventing cavitation damage to hydraulic structures. *International Water Power and Dam Construction*, 35(1), 40-43.
- Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2008). *The Elements of Statistical Learning*. Springer series, California.
- Jalili Ghazizadeh, M., Zarrati, A., & Safavi, K. (2011). Characteristics of Air-Water layers along the nappe over spillway aerators. *International Water Power and Dam Construction*, 22, 5-24.
- Kermani, E., Barani, G., & Ghaeini-Hessaroeiyeh, M. (2018). Cavitation Damage Prediction on Dam Spillways using Fuzzy-KNN Modeling. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 11. 323-329.
- Khatsuria R. M. (2013). *Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators*, CRC Press.



- Luo, Y. Q., Diao, M.J., He, D. M. & Bai, S. X. (2012). Numerical simulation of aeration and cavitation in high dam spillway tunnels. *Advances in Water Science*, 23(1), 110-116.
- Macleod, J. E., Luk, A., & Titterton, D. M., (1987). A re-examination of the distance-weighted k nearest neighbor classification rule. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 17(4), 689-696.
- Matos, J., Novakoski, C. K., Ferla, R., Marques, M. G., Dai Prá, M., Canellas, A. V. B., & Teixeira, E. D. (2022). Extreme Pressures and Risk of Cavitation in Steeply Sloping Stepped Spillways of Large Dams. *Water*, 14(3), 306.
- Momber, A. W. (2004). Aggregate liberation from concrete by flow cavitation. *International Journal of Mineral Processing*, 74, 177-187.
- Nie, M. (2001). Cavitation Prevention with Roughened Surface. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(10), 47-52.
- Novakoski, C. K., Ferla, R., Marques, M. G., Prá, M. D., Canellas, A. V. B., & Teixeira, E. D. (2022). Extreme pressures and risk of cavitation in steeply sloping stepped spillways of large dams. *Water*. Basel. Vol. 14, n. 3 (Jan. 2022), 24 p.
- Ramamurthy, A., Ranganath, Y., & Carballada, L. (1984). Pressure and Source Size Effects on Cavitation Damage. *Journal of Hydraulic Engineering*, 10, 1490-1494.
- Samadi-Boroujeni, H., Abbasi, S., Altaee, A., & Fattahi-Nafchi, R. (2020). Numerical and physical modeling of the Effect of roughness height on cavitation index in chute spillways. *International Journal of Civil Engineering*, 18, 539-550, 1-12.
- Samani, H. (2015). *Design of Hydraulic Structures*, SimayeDanesh Publication.
- Suguo, S., Guoyu, W., Fufeng, W., & Deming, G. (2011). Experimental study on unsteady cavitation flows around three-dimensional hydrofoil. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 28(2), 105-110.
- Terrier, S., Pfister, M., & Schleiss, A.J. (2022). Performance and Design of a Stepped Spillway Aerator. *Water*, 14(2):153. <https://doi.org/10.3390/w14020153>.
- 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*.
- Wu, X., & Kumar, V. (2009). *The top ten algorithms in data mining*. CRC press.
- Yuan, W., & Schnerr, G.H. (2003). Numerical simulation of two-phase flow in injection nozzles: Interaction of cavitation and external jet formation. *Journal of Fluids Engineering*, 125(6), 963-969.
- Zandi, Y. (2005). *Cavitation in overflows*, Tabriz Islamic Azad University Press.
- Zavrel, J. (1997). An empirical re-examination of weighted voting for k-NN. *Proceedings of the 7th Belgian-Dutch Conference on Machine Learning*, 139-148.
- Zhenwei, M. U., Zhiyan, Z., & Tao, Z. (2012). Numerical simulation of 3-D flow field of spillway based on VOF method. *Procedia Engineering*, 28, 808-812.