



Print ISSN: 2251-7480
Online ISSN: 2251-7400

Journal of
Water and Soil
Resources Conservation
(WSRCJ)

Web site:
<https://wsrcj.srbiau.ac.ir>

Email:
iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

Vol. 13
No. 1 (49)

Received:
2022-07-09

Accepted:
2023-08-12

Pages: 81-92

Reduction of Cavitation in the Hydraulic Jump Pond of the Cooling Tower by by Stilling Basin

Ehsan Behjati Ardakani¹, Amir Khosrojerdi^{2*} and Ali Saremi³

1) Ph.D. Candidate, Water Engineering Departments Islamic Azad university, Science and research Branch, Tehran, Iran.

2) Associate Professor, Water Engineering Departments Islamic Azad university, Science and research Branch, Tehran, Iran.

3) Assistance Professor, Water Engineering Departments Islamic Azad university, Science and research Branch, Tehran, Iran.

*Corresponding author email: khosrojerdi@srbiau.ac.ir

Abstract:

Background and Aim: Cooling towers are an important and vital part of industrial units that are employed for water cooling. This hydraulic structure is mainly used for cooling processes of systems in power plants, refineries and other industrial units. An important component of towers is the relaxation pool that the main duty is collecting water to transferring the water to the system, the number of pools is usually designed based on the number of each used pumps. Also, the important tasks of the relaxation pool structure is increment of the energy dissipation by controlling the developed hydraulic jump. Through the hydraulic jump process, the flow condition turns from supercritical to subcritical which can be caused the energy loss and decreased the flow energy through the hydraulic structure. The downstream slope is usually used to control the hydraulic jump. In cooling ponds, downstream slope is usually used to control the hydraulic jump. Various studies showed that using steps instead of ramps can greatly increase energy loss in the relaxation pool. In this study, by replacing the stepped surface with a sloping surface, the effects of this process were investigated on flow currents and cavitation.

Method: In this research, the Fluent numerical model is used to numerically model the flow around the structure of the cooling tower calm pond. In this regard, the dimensions of the relaxation pool in the concrete cooling tower are very important from an engineering point of view and should be designed in such a way that the operating conditions of the pumps are safe. Existence of high velocities and pressure drop in the dischargers causes serious problems related to the occurrence of cavitation phenomenon. Since simulating of the physical model usually requires a lot of time and money, a numerical model calibrated with laboratory data was used to follow this research. In this study, due to the recognition of destructive eddy currents created around the lower valve when the valve is opened, hydraulic optimization of the relaxation pool and the appropriate width of the relaxation pool in refineries are defined as the main the objectives of this study.

Results: The study of increment of the flow intensity in the numerical model indicated that by increasing the flow intensity caused the increment of the energy loss due to the stepping of the end threshold; however, the water height in the relaxation pool decreased significantly. This decrement is estimated at an average of about 67%. Also, the results of water level profiles showed that the threshold of the end of the pond in a stepped surface, has a greater decrement nearly 12.5 percentage than the sloped surface. Also, by increasing the discharge with average of 250 percent, this decrement will be moved to higher values with average of 124 percent. Therefore, the numerical model, the flow conditions on the stepped surface were analyzed at minimum and maximum flow height and intensity. Regarding the study of decreasing the pressure in the relaxation pool, it can be indicated that the development of flow in the pool section increases the amount of velocity based on the increment of the width and height of the pool, which can indicate that the values of the pressure were decreased.

Conclusion: The results of the study of cavitation number along the pond indicate that for the ratio of water depth to the width of the pond less than 1.82, the possibility of cavitation during the pond will be reduced. Also, depleting blocks in the pond have a positive effect on improving hydraulic performance, which leads to increased energy dissipation and jump stabilization, reduced speed, length, height of hydraulic jump and also reduces the risk of cation compared to the case without depleting blocks.

Keywords: Cooling water, hydraulic jump, cavitation, static pressure





کاهش کابیناسیون در حوضچه آرامش برجک خنک کننده با روش پله دار کردن آستانه خروجی حوضچه آرامش

احسان بهجتی اردکانی^۱، امیر خسروجردی^{۲*} و علی صارمی^۳

(۱) دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

(۲) دانشیار، گروه مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

(۳) استادیار، گروه مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

* ایمیل نویسنده مسئول: khosrojerdi@srbiau.ac.ir

چکیده:

زمینه و هدف: برج‌های خنک کننده از بخش‌های مهم و حیاتی واحدهای صنعتی محسوب می‌گردد که برای خنک‌سازی آبی که در فرآیندهای سردسازی سیستم‌ها در نیروگاه‌ها، پالایشگاه‌ها و دیگر واحدهای صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از اجزای مهم برج‌ها حوضچه آرامش است که نقش اصلی حوضچه، جمع آوری آب جهت انتقال به سیستم می‌باشد که تعداد حوضچه‌های مکش معمولاً منطبق بر تعداد هر پمپ طراحی می‌گردد. یکی از وظایف مهم سازه‌ی حوضچه‌ی آرامش در این ساختار، استهلاک انرژی می‌باشد. در این خصوص معمولاً در این حوضچه از ساختار هیدرولیکی پرش هیدرولیکی برای استهلاک انرژی استفاده می‌شود. در فرآیند پرش هیدرولیکی، جریان از حالت فوق بحرانی به جریان زیر بحرانی تغییر حالت می‌دهد. این امر سبب اتلاف انرژی جریان می‌شود. در حوضچه‌های آرامش برج‌های خنک کننده معمولاً از شیب پایین‌دست در جهت کنترل پرش هیدرولیکی استفاده می‌شود. در پژوهش‌های مختلف نشان داده شده است که استفاده از پلکان به جای سطح شیب‌دار می‌تواند در حد زیادی، اتلاف انرژی را در حوضچه آرامش افزایش دهد. در این پژوهش با جایگزین کردن سطح پلکانی به جای سطح شیب‌دار، تأثیرات این فرآیند بر خطوط جریان و همچنین تأثیرات آن بر وجود آمدن کابیناسیون بررسی می‌گردد.

روش و پژوهش: در این پژوهش از مدل عددی فلوئنت برای مدل‌سازی عددی جریان در اطراف سازه‌ی حوضچه آرامش برجک خنک‌کننده استفاده می‌شود. در این راستا، ابعاد حوضچه آرامش در برج خنک کننده بتنی از نقطه نظر مهندسی ارزش بسیار حائز اهمیت می‌باشد و باید به نحوی طراحی شود که شرایط کارکرد پمپ‌ها ایمن باشد. وجود سرعت‌های بالا و کاهش فشار در تخلیه‌کننده‌ها مشکلات جدی در ارتباط با وقوع پدیده کابیناسیون به بار می‌آورد. از آن جایی که مدل‌سازی مدل فیزیکی معمولاً مستلزم صرف زمان و هزینه زیادی است، از مدل نرم افزاری فلوئنت کالیبره شده با داده‌های مدل فیزیکی ساخته شده در آزمایشگاه برای پیگیری این پژوهش استفاده شد. در این مطالعه با توجه به شناخت جریان‌های گردابی مخرب ایجاد شده در اطراف دریچه تحتانی در هنگام بازشدگی دریچه، بهینه‌سازی هیدرولیکی حوضچه آرامش و عرض مناسب حوضچه آرامش در پالایشگاه‌ها از اهداف اصلی این تحقیق است.

یافته‌ها: بررسی افزایش دبی در مدل‌سازی عددی نشان داد، با افزایش دبی به دلیل افزایش افت انرژی به علت پله‌دار شدن آستانه‌ی انتهایی، ارتفاع آب در حوضچه آرامش به صورت محسوسی افت پیدا می‌کند. این میزان افت، به طور متوسط در حدود ۶۷ درصد برآورد می‌شود. همچنین، نتایج حاصل از پروفیل‌های سطح آب نشان داد که آستانه‌ی انتهایی حوضچه آرامش به صورت پلکانی، دارای افت بیشتری در حدود ۱۲/۵ درصد نسبت به حالات شیب‌دار می‌باشد. همچنین، به ازای افزایش دبی تا ۲۵۰ درصد این افت به سمت مقادیر بیشتر در حدود متوسط ۱۲۴ درصد حرکت خواهد کرد. از این رو در مدل عددی، شرایط جریان در روی پلکان‌ها، در حداقل و حداکثر ارتفاع و شدت دبی مورد تجزیه و تحلیل قرار داده شد. در رابطه با بررسی افت فشار در حوضچه آرامش می‌توان بیان نمود که، توسعه جریان در مقطع حوضچه مثبتی بر افزایش عرض و ارتفاع مجرا بر مقدار سرعت در طول تخلیه کننده افزوده می‌گردد که منجر به افت فشار گردیده است.

نتیجه‌گیری: نتایج حاصل از بررسی عدد کابیناسیون در طول حوضچه بیانگر این مطلب می‌باشد که به ازای نسبت عمق آب به عرض حوضچه آرامش کمتر از ۱/۸۲، در طول حوضچه آرامش امکان وجود آمدن خطر کابیناسیون کاهش پیدا خواهد کرد. همچنین بلوک‌های مستهلک‌کننده در حوضچه تأثیر مثبتی در بهبود عملکرد هیدرولیکی داشته که منجر به افزایش استهلاک انرژی و تثبیت پرش، کاهش سرعت، طول، ارتفاع پرش هیدرولیکی و همچنین کاهش خطر کابیناسیون نسبت به حالت بدون بلوک‌های مستهلک کننده می‌شود.

کلیدواژه‌ها: برجک خنک کننده، پرش هیدرولیکی، کابیناسیون، فشار هیدرولیکی



مقدمه

خنک‌کننده، وسیله‌ای برای دفع حرارت زاید آب مورد استفاده در چگالنده به جو از طریق تبادل حرارتی با هوا است. برج‌های خنک‌کن معمولاً با تبخیر آب، حرارت ایجاد شده در یک واحد شیمیایی را دفع کرده و سیال سرویس را تا دمای حباب مرطوب هوا پایین می‌آورند البته باید در نظر داشت در برخی از برج‌های خنک‌کن با چرخه بسته که به برج خنک‌کن خشک مشهور هستند، کاهش دمای سیال سرویس صرفاً تا دمایی نزدیک به دمای حباب خشک هوا امکان‌پذیر است. به عبارت ساده‌تر، برج خنک‌کننده سیستمی است که از آن به جهت خنک‌سازی آبی در فرایندهای سردسازی سیستم‌های تهویه مطبوع، پالایشگاه‌ها، نیروگاه‌ها و غیره استفاده می‌گردد. از برج خنک‌کن در سیستم خنک‌کاری واحدهای پالایشگاهی، پتروشیمیایی و سایر واحدهای شیمیایی مشابه، نیروگاه‌های حرارتی و سیستم‌های HVVC برای تهویه مطبوع ساختمان استفاده می‌شود. دسته‌بندی برج‌های خنک‌کن بر اساس نوع تماس هوا با آب صورت می‌گیرد؛ متداول‌ترین گونه‌های برج خنک‌کن بر اساس مکانیسم‌های جابه‌جایی طبیعی و جابه‌جایی اجباری تقسیم‌بندی می‌شوند (Hannover, Douma, 1955).

مطالعات انجام شده

در مطالعه ساختار تلاطمی پرش هیدرولیکی شناخت اصول و مکانیسم نیروهای مخرب از جمله نیروی زیرفشار، کاویتاسیون و سایر اشکال نیروهای هیدرودینامیکی از اهمیت زیادی برخوردار است. استهلاک انرژی و تلاطم جریان در حوضچه‌های آرامش با نوسانات شدید فشار همراه است. این نوسانات شدید به سه صورت حوضچه آرامش را تحت تأثیر قرار می‌دهند. یکی از این اثرات باعث ایجاد نیروی برخاست قابل توجهی در زیر سازه شده و باعث برخاستن و کنده‌شدن دال‌های کف حوضچه آرامش می‌شود. اثر دیگر نوسانات، ایجاد خستگی در مصالح به کار رفته و اعمال فشار دینامیکی زیاد ناشی از بارگذاری و باربرداری متناوب و کاهش مقاومت سازه و در نتیجه تخریب آن می‌شود. وقوع پدیده کاویتاسیون نیز یکی از اثرات دیگر نوسانات فشار بوده و باعث جدایش جریان از سازه و تخریب موضعی ناشی از فشارهای منفی همراه با نوسانات شدید سازه می‌شود (Hohermut et al., 2020).

نکته حایز اهمیت در کنترل پدیده کاویتاسیون، استفاده از تمهیدات مانع شونده از جمله هوادهی در منطقه مورد نظر در جهت از بین بردن فشار منفی می‌باشد. سرعت و آشفتگی بالای جریان در خروجی دریچه‌های تحتانی، نیاز به هوادهی مناسب دارد. این امر معمولاً با استفاده از به کارگیری تونل‌های انتقال

هوا صورت می‌پذیرد. بسیاری از مطالعات از جمله دتمرز^۱ و فالوی^۲ و همچنین هوهرموث^۳ و همکاران بیان داشتند که هوادهی در منطقه کاویتاسیون می‌تواند تا حد خیلی زیادی خطر بوجود آمدن کاویتاسیون را کاهش دهد از جمله عوامل تأثیرگذار بر میزان خطر کاویتاسیون در دریچه‌ی تحتانی سدها، به مطالعاتی از جمله فالوی، یو اس آ سی ای و ویسچر و هگر اشاره نمود. نکته حایز اهمیت در این پژوهش‌ها نحوه هوادهی توسط شیر تعبیه شده در منطقه‌ی در خطر کاویتاسیون می‌باشد. این پژوهش‌ها بیان داشتند که به کارگیری شیر هوادی، می‌تواند تا حد زیادی فشار منفی در منطقه مورد نظر به سمت فشار مثبت تغییر وضعیت دهد. همچنین، در مطالعه واسچر و هگر، به بررسی پارامتر نیاز هوادهی پرداخته شد. این پارامتر به عنوان نسبتی از دبی هوادهی به دبی جریان تعریف می‌شود. از این رو به ازای نسبت هوادهی، مرز کاویتاسیون مشخص شد (Dettmers, 1953; Falvery, 1980; Hohemut et al., 2020; Vischer and Hager, 1998). در بحث استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی، استفاده از ابزار اندازه‌گیری فشار آب، بخش حایز اهمیت در محاسبه مقدار کاویتاسیون می‌باشد. استفاده از پیژومترهای فشار، با توجه به ساختار هیدرومکانیکی آنها، می‌توانند فشار هیدرواستاتیک را با دقت قابل قبولی بدست آورند.

یاکوت و اسمیت، با در نظر گرفتن پرش هیدرولیکی در مجرای افقی دایره‌ای میزان هوای مورد نیاز جهت جلوگیری از خطر کاویتاسیون را تخمین زدند. در این تحقیق، از پیژومترهای نصب شده در بدنه مجرای دایره‌ای استفاده شد. همچنین نتایج بررسی این محققان نشان داد، به ازای افزایش عدد فرود جریان، میزان هوادهی برای جلوگیری از کاویتاسیون افزایش پیدا می‌کند (Yakhot and Smith, 1992).

همچنین در ادامه مطالعاتی توسط محققان از جمله کامپل^۴ و گایتون و لئو و همکاران، بیان داشتند که افزایش هوادهی باعث کاهش شدت آشفتگی در مقطع طولی مجرای دایره‌ای می‌گردد و با افزایش هوادهی سرعت در جهت طولی نیز افزایش پیدا خواهد کرد (Campbell and Guyton, 1953; Liu et al., 2018).

اثر طول دریچه تحتانی یکی دیگر از پارامترهای تأثیرگذار در کاویتاسیون دریچه‌های تحتانی می‌باشد. مطالعاتی ساباتی و همکاران^۵، به بررسی عوامل هندسی تأثیرگذار بر پدیده کاویتاسیون پرداخت. در این پژوهش پارامترهایی از جمله ارتفاع آب در مخزن بالادست، طول شفت افقی دریچه‌ی تحتانی و عرض دریچه تحتانی به صورت آزمایشگاهی مورد پژوهش و بررسی قرار داده شد. در نهایت، با استفاده از بکارگیری آنالیز ابعادی و تکنیک رگرسیون غیر خطی، میزان دبی هوای مورد نیاز جهت جلوگیری از پدیده کاویتاسیون ارائه شد (Sabati et al., 2019).

پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که بیشترین خسارت در قسمت انتهایی خروجی قرار خواهد گرفت. همچنین، در این مطالعه بررسی خطرات ناشی از کاویتاسیون در شفت افقی مورد مطالعه قرار داده شد. با در نظر گرفتن حل عددی و مدل نرم-افزاری رابطه‌ای برای میزان هوادهی مورد نیاز در جهت کاهش خطر کاویتاسیون در این منطقه پرداختند (Sabeti et al., 2019).

فیوروتو و رینالدو^۷، تأثیر شکاف‌های اطراف دال در کف حوضچه‌های آرامش و نفوذ آب در زیر این دال بر نوسانات فشار هیدرودینامیکی را مورد بررسی قرار داده و معیارهایی برای طراحی دال بتنی به صورت تئوری ارائه نمودند. همچنین آنها نشان دادند که نوسانات فشار باعث تخریب درزهای انبساطی بین دالها می‌شود. از محل این درزها مقادیر فشار زیادی از ابتدا تا انتهای دال گسترش پیدا می‌کند. با افزایش اختلاف فشار ابتدا و انتهای دال، نیروی به وجود آمده در اثر نوسانات فشار ممکن است از وزن دال بیشتر و سبب تخریب دال شود (Fiorotto and Rinaldo, 1992).

در بیشتر پژوهش‌ها به بررسی اثر نوسانات فشار در پرش هیدرولیکی کلاسیک پرداخته شده است. با توجه به اینکه یکی از انواع پرش در پایبندست سرریزها پرش مستغرق می‌باشد، در این پژوهش اثرات استغراق در میزان ضرایب نوسانات فشار مورد توجه قرار گرفت. برای پرش هیدرولیکی مستغرق بر اساس طبقه بندی کیندس واتر^۸ بسته به اینکه موقعیت شروع پرش در سطح تنداب و نیز موقعیت انتهای طول غلتایی نسبت به محل تقاطع سطح شیبدار و کف حوضچه کجا باشد، انواع مختلف پرش نوع A، B، C و D تشکیل می‌شود. اگر پنجه پرش در انتهای مقطع شیبدار واقع شود و عمق آب در پایین دست با عمق ثانویه پرش برابر باشد، پرش نوع A تشکیل می‌شود. اگر شروع پرش روی سطح شیبدار و انتهای طول غلتایی روی حوضچه باشد و عمق پایاب بیشتر از عمق مزدوج باشد، پرش نوع B، اگر ابتدا و انتهای پرش بر روی تنداب و انتهای طول غلتایی در ابتدای حوضچه واقع شود، پرش نوع C و اگر پرش به طور کامل روی تنداب اتفاق بیافتد، پرش از نوع D است (Kindsvater, 1944).

جسداهااس و بالاچاندار^۹ با استفاده از مدل عددی به بررسی تلاطم در پرش هیدرولیکی آزاد پرداختند. در این پژوهش ساختار ادی‌های تشکیل شده در پرش هیدرولیکی مورد ارزیابی قرار داده شد. نتایج نشان داد، در محدوده‌ی نزدیک به جت‌ها تشکیل شده، مقادیر بیشتری برای تنش برشی در جریان بوجود خواهد آمد. همچنین نتایج بررسی فشار استاتیک نشان داد، در محدوده‌ی کف جریان، امکان بوجود آمدن فشار منفی بیشتر خواهد بود، (Jesudhas and Balachandar, 2019).

هوهرمت و همکاران، با بررسی جت خروجی از دریچه‌ی تحتانی بیان داشتند که این جت به میزان قابل قبولی باعث اختلاط آب و هوا در سطح جت می‌شود در حالی که در قسمت‌های کف این اختلاط ناچیز می‌باشد و در این محدوده به ازای سرعت‌های بالا، احتمال بوجود آمدن پدیده‌ی کاویتاسیون محتمل می‌باشد. آنها بیان داشتند که با اضافه کردن شیارهایی در طول جریان می‌توان این اختلاط هوا را در قسمت‌های پایینی جریان وارد کرد و از ایجاد پدیده‌ی کاویتاسیون جلوگیری به عمل آید (Hohermut et al., 2020).

در این پژوهش‌ها از روش اجزا محدود برای حل معادله جریان استفاده شد. نتایج این تحقیق‌ها نشان داد، اجزا محدود روش مناسبی برای حل عددی معادله جریان می‌باشد و شبیه-سازی عددی برآورد نسبی خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد. همچنین مطالعاتی در زمین بررسی عدد کاویتاسیون بر روی دیگر سازه‌ها مثل سرریز پلکانی وجود دارد. در مطالعه‌ی، با بکارگیری حل عددی بر پایه راستی آزمایی مدل آزمایشگاهی، مدل سرریز پلکانی را با استفاده از مدل آشفتگی RNG شبیه-سازی کرد. نتایج این تحقیق نشان داد، برآورد دبی در مدل آشفتگی دقت مناسبی با مدل آزمایشگاهی دارد و همچنین مناطق در خطر کاویتاسیون در این نوع سرریز مشخص شد (Kindsvater, 1944).

مطالعه‌ی، به برآورد عددی نیروی سطحی بر روی سطوح روبه‌رو شده با پدیده‌ی کاویتاسیون پرداخت. نتایج این تحقیق نشان داد، مقادیر فشار منفی در سطوح کف دریچه تحتانی و سرریز نیلوفری و همچنین باکت‌های پرتابه‌ای جریان می‌تواند نیروی مخربی ایجاد کند. همچنین محاسبه‌های فشار استاتیک نشان داد، فشار منفی ۱۰۰۰ مگا پاسکال در این مناطق محتمل است و محققان باید بیشتر موارد جلوگیری کننده را در مقابل فشار منفی طرح‌ریزی کنند تا مقابله با سرعت بالاتر قسمت جت خروجی دریچه تحتانی (Hohermuth, 2019).

همچنین برآورد عدد کاویتاسیون با استفاده از مدل عددی، در سازه‌هایی از جمله دریچه تحتانی و سرریز نیلوفری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. پژوهش‌های ساویج^{۱۰} و الفتح اللهی از جمله پژوهش‌هایی هستند، که حل عددی انسیس را برای شبیه‌سازی استفاده کردند. نتایج این تحقیق‌ها نشان داد، این مدل می‌تواند برآورد مناسبی برای مقدار کاویتاسیون، فشار استاتیک و سرعت جریان ارائه دهد. آنها بیان داشتند که استفاده از حل عددی نیازمند واسنجی توسط مدل آزمایشگاه می‌باشد و بدون در نظر گرفتن این قسمت، حل عددی نمی‌تواند برآورد مناسبی از شبیه‌سازی جریان ارائه دهد (Alfatlawi et al., 2015; Savage et al., 2001).

در مطالعه‌ی، به بررسی دو عامل مهم بر پدیده‌ی کاویتاسیون در شافت افقی سرریز نیلوفری شهید عباسپور

مشبک نزدیک به هم می‌باشد. این شبکه‌ها آکنه یا پرکننده نامیده می‌شود. آکنه‌ها آب سرازیر شده از بالای برج را با هوایی که از میان آن حرکت می‌کند کاملاً مخلوط کرده، به طوری که آب به صورت یک قطره از یک آکنه به سطح آکنه دیگر توسط نیروی ثقل خود می‌ریزد. هرچند در این برج‌ها مقداری انتقال حرارت محسوس از آب به هوا وجود دارد ولی تقریباً اثر خنک‌کنندگی تماماً از تبخیر قسمتی از آب اسپری شونده در برج حاصل می‌شود. بخار حاصل از فرایند تبخیر در برج توسط جریان هوایی که یک دمنده ایجاد می‌کند از برج خنک کن خارج می‌شود. با توجه به این که دما و رطوبت هوای از برج افزایش می‌یابد بدیهی است که میزان تأثیر برج خنک کن تا حد زیادی به درجه حرارت مرطوب هوای ورودی بستگی دارد و با کاهش آن افزایش می‌یابد. در انتهای برجک‌های خنک کننده معمولاً از حوضچه‌ی آرامش برای جمع آوری آب مورد استفاده شده در سیستم خنک کننده و همچنین کاهش انرژی آب (در زمان ریزش از آکنه‌ها) استفاده می‌شوند در شکل ۱، نمای واقعی از سیستم خنک کننده نمایش داده شده است، (Jesudhas and Balachandar, 2019)

حوضچه آرامش یا حوضچه جهش آبی عبارت است از قسمت کوتاهی از یک کانال کف‌سازی شده که به صورت سازه‌ای خاص در انتهای سرریزها یا هر منبع دیگری که جریان فوق بحرانی ایجاد کند، ساخته می‌شود و هدف از ساختن آن کنترل پرش هیدرولیکی در داخل حوضچه خلاصه می‌باشد. در اینصورت جریان فوق بحرانی، قبل از رسیدن به قسمت‌های غیر کف‌سازی شده رودخانه، تغییر حالت داده و از انرژی فوق العاده زیاد آن کاسته و از خرابی‌های احتمالی جلوگیری به عمل می‌آورد. هر حوضچه آرامش بر حسب شدت پرش، احتیاج به اجزایی دارد تا ضمن شکل دادن به پرش در یک محل و موقعیت خاص، تادرحد امکان از طول آن بکاهد. از جمله این اجزای عبارتند از: بلوک‌های پای تنداب که در محل تغییر شیب و در ابتدای کف افقی حوضچه ساخته شده و هدف از ساخت آن کوتاه کردن طول و پایدار نمودن پرش می‌باشد. آب پایه که به صورت دنداندار یا منفرد در انتهای حوضچه ساخته می‌شود. آب پایه باعث کاهش بیشتر طول پرش و کنترل موقعیت آن گردیده که در حوضچه‌های بزرگ و به جهت پخش جت دارای سرعت زیاد که به انتهای حوضچه رسیده است به صورت دنداندار ساخته می‌شود. بلوک‌های آرام‌کننده که گاه بلوک کف نیز نامیده می‌شوند، در قسمت میانی حوضچه کار گذاشته شده و هدف مقدماتی از ساخت آنها عبارتست از اتلاف انرژی بصورت متمرکز و یکجا. در سرعت‌های کم بلوک‌های آرام‌کننده بسیار موثر هستند، اما آنگاه که سرعت آب رسیده به محل، زیاد باشد ممکن است این نوع زائده‌ها مناسب نباشد و باعث پدیده کاویتاسیون گردد و در برخی موقعیت‌ها و جهت مقاومت در برابر یخ و مواد موجود در آب نیز از بلوک‌های آرام‌کننده استفاده می‌شود.

بهرام وند و همکاران، با استفاده از مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی پدیده‌ی پرش هیدرولیکی، اعماق مزدوج در پرش را محاسبه نمودند. در ادامه‌ی تحقیق، از مدل نرم‌افزاری انسیس برای برآورد پارامترهای هیدرولیکی در طول پرش هیدرولیکی استفاده شد. نتایج پژوهش نشان داد، احتمال بوجود آمدن کاویتاسیون در کف حوضچه‌ی آرامش با سطح صاف به مراتب بیشتر از کف زبر می‌باشد. همچنین رابطه‌ای بر پایه‌ی رگرسیون غیر خطی برای برآورد اعماق پرش هیدرولیکی ارائه شد (Baharvand et al., 2021).

محققین مختلف معادلات اساسی و پارامترهای موثر بر پرش هیدرولیکی را مورد ارزیابی قرار دادند. نشان داد که عدد فرود بالا دست تأثیر بر رفتار ویژگی‌های پرش هیدرولیکی دارد. (Hager et al., 1990; Finnemore and Franzini., 2002) همچنین اثر عامل دیوارهای حوضچه را بر مقاومت جریان با در نظر گرفتن عمق متوالی مطالعه کردند. (Hager et al., 1990; Hughes and Flack, 1984) عباسپور تأثیر ناهمواری بستر را بر جنبه‌های مختلف هیدرولیکی مورد ارزیابی قرار دادند نتایج این تحقیقات نشان داد که به ازای افزایش زبری بر روی سطح کف حوضچه آرامش، میزان اتلاف انرژی افزایش پیدا خواهد کرد. عباسپور و همکاران نشان دادند که طول پرش هیدرولیکی و عمق پایین دست در بسترهای موجدار بیشتر کاهش می‌یابد تا نسبت به بستر صاف و خطر ایجاد کاویتاسیون در بستر صاف به مراتب بیشتر از ایجاد کاویتاسیون در بستر زبر می‌باشد (Abbaspour et al., 2009). تحقیق حاضر با بکارگیری شبیه‌سازی عددی انسیس فلونت، به شبیه‌سازی جریان در حوضچه آرامش برجک خنک کننده می‌پردازد. در این پژوهش از مدل آزمایشگاهی ساخته شده، جهت راستی‌آزمایی حل عددی استفاده شد. در نهایت، با انتخاب بهترین مدل آشفتگی برای شبیه‌سازی عددی مدل، مقادیر سرعت و فشار استاتیکی محاسبه شد. در ادامه با در نظر گرفتن این پارامترها، مقدار عدد کاویتاسیون محاسبه شد. در نهایت، با توجه به مقادیر عدد کاویتاسیون، مناطق با خطر بالای کاویتاسیون مشخص شد.

مواد و روش‌ها

از نظر ابعاد و اندازه، برج‌های خنک‌کن در مدل‌های کوچک پشته‌بامی برای ساختمان‌های مسکونی تا سازه‌هایی غول‌پیکر و هذلولی شکل (مانند برج‌های خنک‌کن نیروگاه‌ها که در شکل ۱ نشان داده شده‌است) که ارتفاعشان در حدود دویست متر و قطرشان در حدود یک صد متر می‌رسد، وجود دارند. همچنین نوعی از برج‌های خنک‌کن با شکل مستطیلی با ارتفاع تقریبی چهل متر و طول هشتاد متر نیز وجود دارد. برج‌های خنک‌کننده سیستم توزیع و پخش آبگرم دارند که آب را به صورت یکنواخت روی شبکه



شکل ۱. نمای واقعی از برجک خنک‌کننده، (الف) نمایی از لوله‌های تخلیه‌ی آب برجک خنک‌کننده، (ب) نمایی از برجکها.

داده شده است. در این تحقیق از این مرزهای سطح خطر ارایه شده در جدول ۱، استفاده شده است.

مدل مورد مطالعه: در شکل ۲، مشخصات هیدرولیکی و هندسی برجک خنک‌کننده و همچنین حوضچه آرامش مورد استفاده در این سازه قابل مشاهده است. شایان ذکر است، این مدل برجک خنک‌کننده یک نوع معمول از برجک خنک‌کننده است که در نروگهاها به صورت تیپ ساخته می‌شود. همانطور که از شکل ۲ الف قابل استحصال است، به خاطر ریزش آب در قسمت‌های پکینک برجک خنک‌کننده انرژی هیدرولیکی زیادی در هنگام ریزش آب به داخل حوضچه بوجود می‌آید. از این رو، طراحی مناسب براساس پارامترهای هیدرولیکی مشخصی برای کنترل پرش هیدرولیکی درون حوضچه آرامش الزامی است. همچنین در شکل ۲-ب، مشخصات هیدرولیکی حوضچه آرامش نمایش داده شده است. در این پژوهش، از دو نوع حوضچه ساده و حوضچه با آستانه‌ی انتهایی پلکانی استفاده شد. در ادامه، از عدد کاویتاسیون در جهت ارزیابی تاثیر پلکانی بودن آستانه‌ی انتهایی حوضچه استفاده شد. همچنین شکل ۳ اجزا سیستم گردش آب در این حوضچه را نمایش می‌دهد. در این پژوهش از چهار دبی طراحی حوضچه ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۵۰ متر مکعب بر ثانیه استفاده شد.

عدد کاویتاسیون: محاسبه عدد کاویتاسیون، نیازمند برآورد میزان فشار و سرعت در آن ناحیه می‌باشد. با توجه به مقدار عدد کاویتاسون، سطح خطر کاویتاسیون در جدول ۱ ارایه شده توسط فالوی، مشخص شده است. از این رو، ابتدا باید مقدار عدد کاویتاسیون در محل با برآورد مقادیر فشار و سرعت و همچنین بکارگیری فرمول ارایه شده توسط آنالیز ابعادی برای پدیده‌ی کاویتاسون، محاسبه شود. در زیر می‌توان مقدار کاویتاسیون را از رابطه یک محاسبه نمود.

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

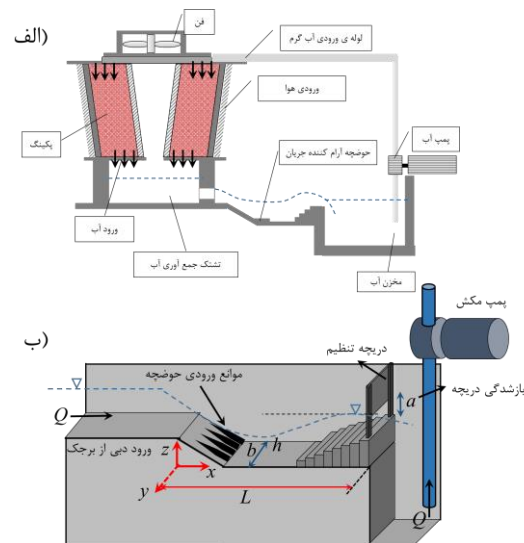
در این رابطه σ میزان عدد کاویتاسیون، P_o فشار استاتیک، P_v فشار بخار به ازای دمای هوای و ρ وزن مخصوص آب می‌باشد. همچنین مطالعاتی در زمینه کاربرد مدل‌های عددی در برآورد میزان کاویتاسیون وجود دارد. از جمله اولین پیشگامان در این زمینه می‌توان به مطالعات (Falvey, 1980) اشاره نمود. لازم به ذکر است، در پژوهش‌های یاد شده، سطح خطر کاویتاسیون با در نظر گرفتن فشار استاتیک و سرعت محاسبه شده و محدوده‌های عدد کاویتاسیون و سطح خطر آنها نمایش

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

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

افزار انسیس فلونت با بکارگیری تکنیک‌های محاسباتی المان محدود، مقادیر فشار و سرعت را با حل عددی معادلات (۲) و (۳) در منحنی دوبعدی یا سه بعدی مختصات، با در نظر گرفتن شرایط مرزی تعریف شده (در این پژوهش ارتفاع و دی بالادست و پایین دست دریاچه) را بدست می‌آورد. این معادلات را به ازای شرایط مختلف اولیه حل می‌شوند. در مدل سازی، مدل حوضچه آرامش برجک خنک کننده، جریان در حالت تراکم ناپذیر در نظر گرفته شد.

در مدل انسیس با مشخص کردن نوع سیال که آب ۲۵ درجه است می‌توان نوع سیال را مشخص نمود. مراحل حل معادلات یاد شده، توسط سازنده نرم افزار که با حل مساله بر پایه‌ی برنامه نویسی صورت می‌پذیرد. باید در نظر داشت که این قسمت از دید تکنسینی یا اشخاصی که با نرم افزار کار می‌کنند کاملاً مجزا بوده و در نهایت نتایج گرافیکی و اطلاعات جدولی برای فشار، سرعت و دیگر پارامترها در دسترس قرار گرفت. لازم به ذکر است، این معادلات نیازمند شرایط پیش فرض اولیه می‌باشند که به صورت مرزهای اولیه برای این معادلات تعریف می‌شود. همچنین برای شبیه‌سازی پدیده‌های هیدرولیکی مدل‌های از پیش تعیین شده‌ای در نرم‌افزار وجود دارد. اختلاف این مدل‌ها به شرایط و ضوابط مختلف برای مدل‌سازی جریان‌های آشفته مرتبط می‌شود. در حالت کلی مدل $K-\varepsilon$ به شدت انرژی جنبشی حاصل از آشفتگی و ε به نرخ اتلاف انرژی اطلاق می‌گردد. به خاطر این که مدل $K-\varepsilon$ موارد شدت انرژی جنبشی حاصل از آشفتگی و نرخ اتلاف انرژی را در بر می‌گیرد. می‌تواند مدل مناسبی برای مدل‌سازی مدل آشفتگی در نرم افزار در نظر گرفته شود (Salehi et al., 2021; Salehi and Azimi, 2022).



شکل ۲. برجک خنک کننده با حوضچه آرامش، (الف) شماتیک برجک خنک کننده، (ب) حوضچه آرام کننده جریان

معادلات حاکم: به صورت کلی حل عددی انسیس معادلات پیوستگی و معادله مومنوم را حل می‌کند. این معادلات به صورت ساده شده معادلات ناویراستوکس می‌باشند. معادلات شماره (۲) و (۳) معادله پیوستگی و مومنوم می‌باشد.

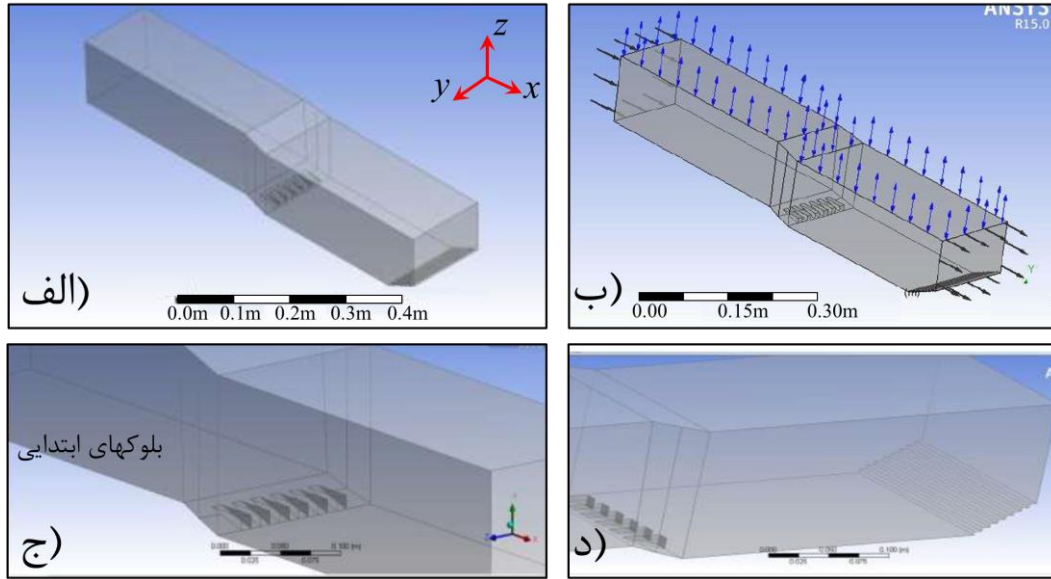
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-\rho \overline{u_i u_j} \right] \quad (3)$$

در این رابطه‌ها، u و u' به ترتیب سرعت درجهت طولی و نوسانات سرعت طولی می‌باشند. همچنین $-\rho \overline{u_i u_j}$ به صورت تانسور تنش رینولدز تعریف می‌شود. باید توجه داشت که نرم



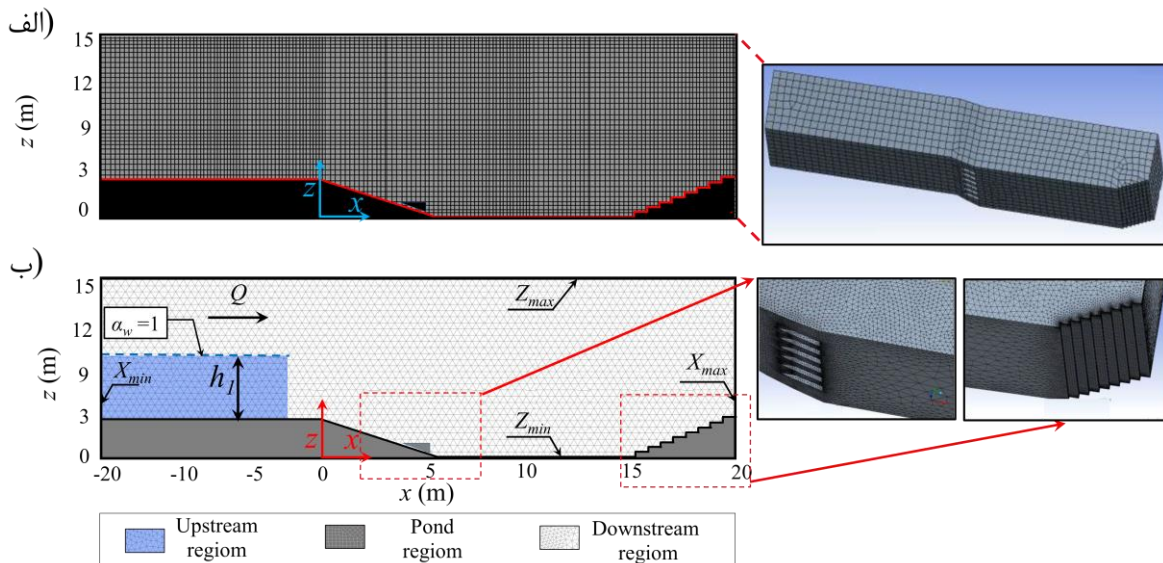
شکل ۳. ساختمان برجک خنک کننده با حوضچه آرامش، (الف) سازه‌ی بتنی نگهدارنده تجهیزات برجک، (ب) تجهیزات پمپاژ آب از انتهای حوضچه آرامش



شکل ۴. مدل عددی حوضچه آرام کننده جریان، (الف) هندسه حوضچه آرام کننده جریان، (ب) مرزهای هیدرولیکی تعیین شده در جریان، (ج) نمای بلوکهای ابتدایی، (د) نمای بلوکهای انتهایی

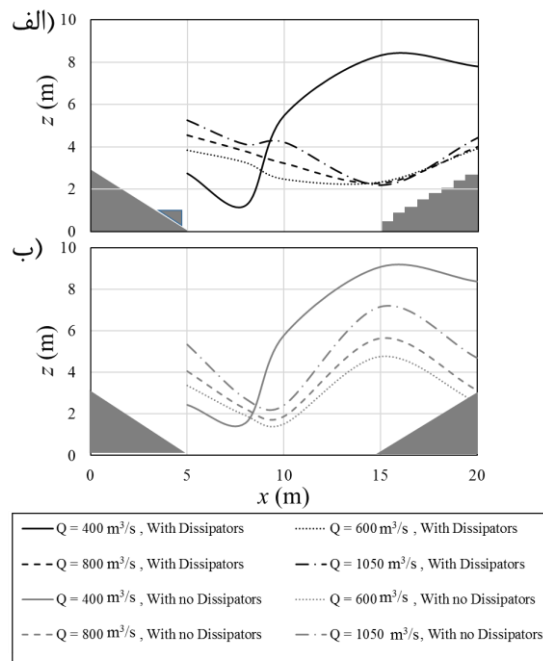
آنالیز مش: در این تحقیق در قسمت ابزار مش، از مش با تعداد ۴۵۴۰۰ المنت و ۶۸۱۵۰ گره استفاده شد. بررسی‌های اولیه نشان داد، بهینه‌ترین مقادیر مش به ازای مقادیر برابر طولی، عرضی و ارتفاعی با $40 \times 20 \times 150$ در نظر گرفته شد. همچنین برای کاهش تاثیر هوا در مرز جدایی بین هوا و آب باید ارتفاع آب سه برابر ارتفاع هوای در نظر گرفته شده در بالای دو محیط فازی باشد. (Sualaheldin et al., 2004) در کل از دو نوع مربعی و مستطیلی و مش مثلثی استفاده شد. در شکل ۵-الف و ب به ترتیب این موارد نمایش داده شده است.

مدل عددی حوضچه آرامش برجک خنک کننده: در شکل ۴ مشخصات مدل عددی و نرم افزاری حوضچه آرامش برجک خنک کننده، نمایش داده شده است. همانطور که مشخص است اجزا طراحی در زیربخش‌های شکل نمایش داده شده است. در شکل ۴-الف، مشخصات هندسی مدل حوضچه آرامش نمایش داده شده است. همچنین، در شکل ۴-ب، مرزهای هیدرولیکی مسیله‌ی هیدرولیکی نمایش داده شده است. از دبی ورودی و سطح جدایش آب و هوا به عنوان مرزهای هیدرولیکی در مدل عددی استفاده شد که به عنوان پیش فرض در مدل عددی وارد شدند.

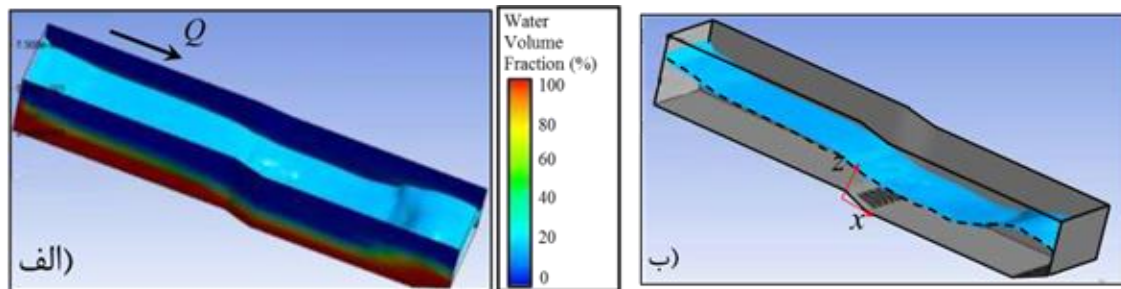


شکل ۵. مش‌های بندی مدل عددی و مرزهای هیدرولیکی، (الف) مش مستطیلی و مربع (مش شماره یک)، (ب) مش مثلثی (مش دو)، و مرزهای هیدرولیکی تعیین شده، (در شکل X_{min} به عنوان مرز هیدرولیکی بالادست که ارتفاع آب تعریف شده است، X_{max} به عنوان مرز هیدرولیکی پایین‌دست که ارتفاع آب تعریف شده است، Z_{min} مرز هیدرولیکی کف، Z_{max} مرز هیدرولیک سطح آب، h_l ارتفاع آب در ابتدای اجرای مدل و α_w به عنوان تلاش اول برای مدل سازی در نظر گرفته شده است.)

پروفیل سطح آب: پروفیل‌های سطح آب در مدل عددی به ازای دبی‌های مختلف، استخراج شده است. در شکل ۷، پروفیل سطح آب و همچنین شرایط اختلاط آب و هوا در مدل سه‌بعدی به ازای ماکزیمم دبی ترسیم شده است. همچنین در شکل ۸، پروفیل سطح آب به ازای پلکانی و شیب‌دار بودن آستانه-ی انتهایی حوضچه آرامش نمایش داده شده است. همانطور که مشخص است، به ازای دبی $Q = 400$ متر مکعب بر ثانیه، تغییر محسوسی در پروفیل سطح آب رویت نمی‌شود. اما با افزایش دبی به دلیل افزایش افت انرژی به علت پله‌دار شدن آستانه‌ی انتهایی، ارتفاع آب در حوضچه آرامش به صورت محسوسی افت پیدا می‌کند. این میزان افت، به طور متوسط در حدود ۶۷ درصد برآورد می‌شود.

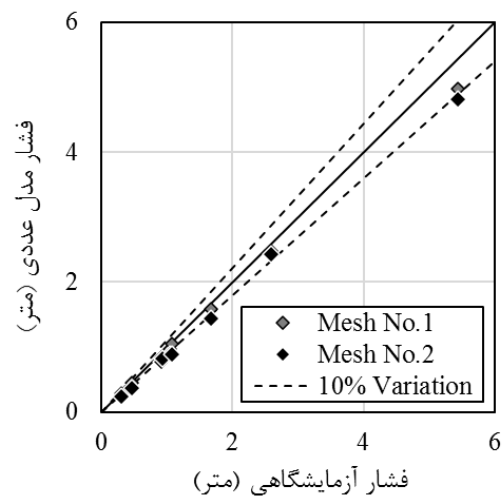


شکل ۸. پروفیل سطح آب در حوضچه آرام کننده جریان به ازای دبی‌های مختلف و $h/b = 1/12$. الف) حوضچه آرام کننده با بلوک مستهلک کننده انرژی، ب) حوضچه آرام کننده بدون بلوک مستهلک کننده انرژی.



شکل ۷. نتایج سه بعدی مدل عددی حل شده به ازای دبی ماکزیمم 1050 متر مکعب بر ثانیه، الف) وضعیت اختلاط هوا و آب در مدل عددی، ب) پروفیل سطح آب ترسیم شده در طول حوضچه آرام کننده.

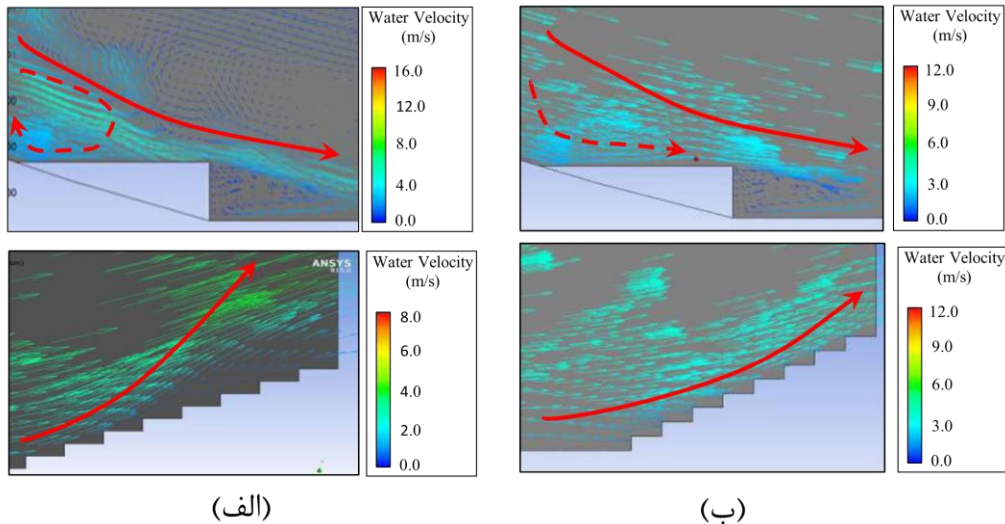
تعیین بهترین مش: همانطور که در شکل ۵ اشاره شد، از دو نوع مش مربعی مستطیلی و مش مثلثی برای شبیه‌سازی جریان در زمان پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش برجک خنک کننده استفاده شد. برای تعیین بهترین مش، از مقایسه داده‌های فشار پیزومتریک در مدل واقعی برجک خنک کننده پالایشگاه تهران (تعداد ۸ پیزومتر که در طول کانال نصب شده بودند) و داده‌های فشار پیزومتریک متناظر در مدل عددی (در همان طول از ابتدای شیب) استفاده شد. نتایج این مقایسه‌ها، در شکل ۶ نمایش داده شده است. همانطور که مشخص است، مش مربعی مستطیلی داری خطای محاسباتی کمتری در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی دارد. از این رو، این نوع مش برای مدل‌سازی عددی انتخاب شد.



شکل ۶. تعیین میزان خطای آزمایشگاهی به ازای تغییر مش بندی

نتایج و بحث

در این بخش داده‌های برداشتی از مدل عددی ارائه شده است. برای برآورد عدد کاویتاسیون در طول حوضچه آرامش از داده‌های سرعت و فشار استاتیکی در طول حوضچه آرامش استفاده شد. در ادامه به بررسی این نتایج پرداخته می‌شود.



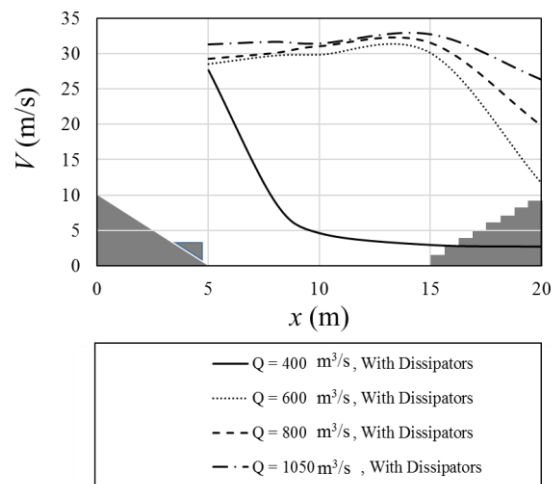
شکل ۹. وضعیت بردارهای سرعت در ابتدا و انتهای حوضچه آرام کننده به ازای بی حدافل و حداکثر ، (الف) دبی برابر با ۴۰۰ متر مکعب بر ثانیه (ب) دبی برابر با ۱۰۵۰ متر مکعب بر ثانیه

حداقل دبی جریان در نزدیکی پلکان انتهایی در حال جدا شدن از پلکان می‌باشد که به نحوی این رفتار باعث کاهش برخورد آب با پلکان می‌شود که به خودی خود، این مورد باعث کاهش میزان سطح افت می‌شود و به نحوی کارآمدی پلکان انتهایی، کاهش پیدا خواهد کرد.

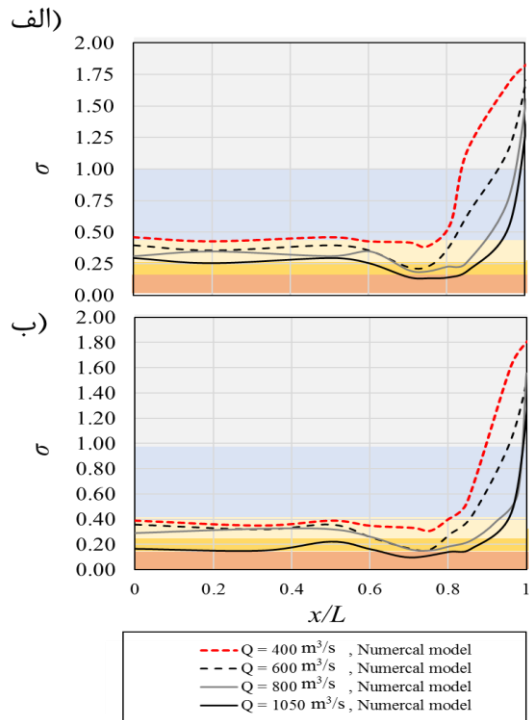
سرعت جریان: در جهت برآورد عدد کاپیتاسیون در طول حوضچه آرامش برجک خنک کننده، سرعت جریان از مدل عددی در طول حوضچه آرامش، استخراج شد. همانطور که مشخص است، سرعت یکی از پارامترهای اصلی در برآورد شاخص کاپیتاسیون در معادله (۱) می‌باشد. در شکل ۱۰، مقادیر سرعت به ازای دبی‌های در نظر گرفته شده، ارائه شده است.

فشار استاتیک: یکی از پارامترهای مهم در برآورد عدد کاپیتاسیون، فشار استاتیک در طول حوضچه آرامش می‌باشد. در شکل ۱۱، مقادیر فشار استاتیک به ازای دبی ماکزیمم ارائه شده است. همچنین با تغییر عرض حوضچه آرامش، تاثیر عرض بر فشار منفی ایجاد شده در طول حوضچه آرامش، مورد بررسی قرار داده شد. همانطور که مشخص است، با افزایش عرض حوضچه آرامش با پلکان انتهایی ($h/b < 1/82$) در اینجا h ارتفاع آب بالادست حوضچه است و b عرض حوضچه، خطر فشار منفی در انتهای حوضچه آرامش ($x/L = 0.37$) (در اینجا x مکان حوضچه از مبدا مختصات و L طول حوضچه تعریف می‌شود). کاهش و در مواردی حذف می‌شود. این مطلب حاکی از آن است که حداکثر نسبت عمق به عرض حوضچه آرامش برای حذف فشار منفی در طول حوضچه آرامش با آستانه‌ی انتهایی پلکانی $h/b < 1/82$ می‌باشد. همچنین در جهت مقایسه داده‌های آزمایشگاهی با داده‌های عددی نتایج فشار استاتیکی به ازای $h/b = 1/82$ مورد مقایسه و ارزیابی قرار داده شد. نتایج مقایسه‌ها نشان داد، داده‌های عددی خطای قابل قبولی با مقادیر آزمایشگاهی دارند.

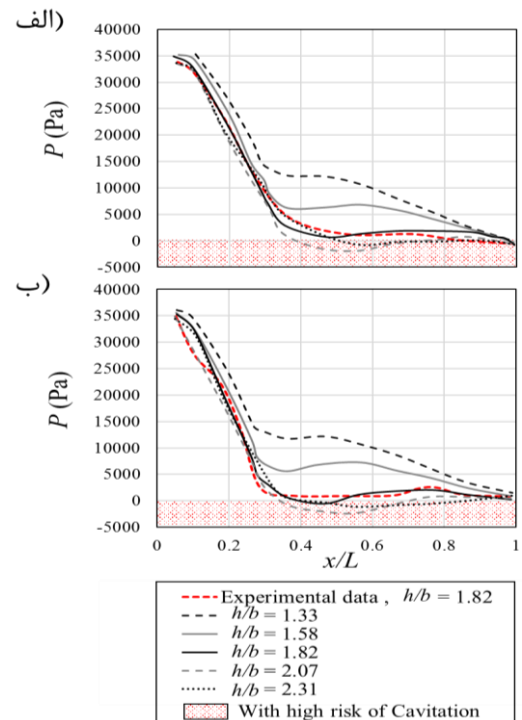
آشفتنگی جریان: نتایج حاصل از پروفیل سطح آب نشان داد که آستانه‌ی انتهایی حوضچه آرامش به صورت پلکانی، دارای افت بیشتری نسبت به حالات شیب‌دار می‌باشد. همچنین، به ازای دبی‌های بیشتر این افت به سمت مقادیر بیشتر حرکت خواهد کرد. از این رو در مدل عددی، شرایط جریان در روی پلکان‌ها، در حدافل و حداکثر دبی مورد تجزیه و تحلیل قرار داده شد. همانطور که در شکل ۹ قابل رویت است، به ازای افزایش دبی در حوضچه آرامش حداکثر سرعت بر روی بلوکهای انتهایی به ازای دبی حداکثر به صورت محسوسی کاهش پیدا خواهد کرد. این مقدار به صورت تقریبی در محدوده‌ی ۲/۵ متر بر ثانیه برآورد می‌شود، در حالی که این مقدار برای آزمایش حدافل دبی، برابر با ۴/۲ متر بر ثانیه می‌باشد. همچنین مشخص است، با افزایش دبی جهت جریان بر روی پلکان‌ها قرار داد که این امر باعث افزایش میزان افت در جریان می‌شود، در حالی که در مدل



شکل ۱۰. سرعت جریان در حوضچه آرام کننده جریان به ازای دبی‌های مختلف و $h/b=1/85$



شکل ۱۲. وضعیت کاویتاسیون در طول حوضچه آرامش به ازای عرض واقعی و حداقل عرض حوضچه، (الف) $h/b=1/85$ ، (ب) $h/b=2/33$



شکل ۱۱. وضعیت فشار وارده بر کف و دیواره‌های حوضچه آرام کننده در دبی حداکثر به ازای تغییر عرض حوضچه، (الف) فشار وارد بر کف حوضچه، (ب) فشار وارده بر دیواره حوضچه آرامش

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد، با افزایش دبی جریان، پلکان انتهایی در حوضچه آرامش کار آمدتر عمل می‌کند و به ازای حداکثر دبی باعث افت بیشتر در جریان سطح آب می‌شود. همچنین، به ازای دبی $Q=400$ متر مکعب بر ثانیه، تغییر محسوسی در پروفیل سطح آب رویت نمی‌شود. اما با افزایش دبی به دلیل افزایش افت انرژی به علت پله‌دار شدن آستانه‌ی انتهایی، ارتفاع آب در حوضچه آرامش به صورت محسوسی افت پیدا می‌کند. این میزان افت، به طور متوسط در حدود ۶۷ درصد برآورد می‌شود. در رابطه با افزایش عرض حوضچه می‌توتن بیان داشت، با افزایش عرض حوضچه آرامش با پلکان انتهایی ($h/b < 1/82$)، خطر فشار منفی در انتهای حوضچه آرامش ($x/L = 0/37$) کاهش و در موارد حذف می‌شود. این مطلب حاکی از آن است که حداکثر نسبت عمق به عرض حوضچه آرامش برای حذف فشار منفی در طول حوضچه آرامش با آستانه‌ی انتهایی پلکانی $h/b < 1/82$ می‌باشد. در نهایت بررسی عدد کاویتاسیون نشان می‌دهد، به ازای افزایش دبی خطر ایجاد کاویتاسیون در نسبت $h/b = 1/82$ (با توجه به جدول ۱ در محدوده‌ی "امکان خطر کاویتاسیون" می‌باشد در حالی با کاهش طول حوضچه آرامش $h/b = 2/33$ وضعیت خطر کاویتاسیون به (خطر جدی کاویتاسیون) تبدیل خواهد شد. از این رو پیشنهاد می‌شود، نسبت ارتفاع آب ورودی به حوضچه آرامش به عرض حوضچه آرامش به ازای $1/82$ در نظر گرفته شود.

عدد کاویتاسیون: در شکل ۱۲ مقادیر عدد کاویتاسیون در طول حوضچه آرامش با آستانه‌ی انتهایی پلکانی نمایش داده شده است. همچنین در جهت مقایسه و ارزیابی تاثیر عرض حوضچه آرامش، مقادیر عدد کاویتاسیون به ازای کاهش عرض تا نسبت $h/b = 2/33$ برای دبی‌های در نظر گرفته شده برآورد و در شکل ۱۲-ب نمایش داده شده است. همانطور که مشخص است به ازای تمامی بازه‌های دبی انتهای حوضچه کاویتاسیون را تجربه نخواهد کرد چرا که در انتهای حوضچه مقادیر عدد کاویتاسیون در شکل (۱۲) از بازه‌ی خطر کاویتاسیون که در جدول ۱ معرفی شده است، فاصله می‌گیرد. بررسی مقادیر عدد کاویتاسیون نشان می‌دهد، به ازای افزایش دبی، خطر ایجاد کاویتاسیون در نسبت $h/b = 1/82$ (با توجه به جدول ۱ در محدوده‌ی (امکان خطر کاویتاسیون) می‌باشد در حالی با کاهش طول حوضچه آرامش $h/b = 2/33$ وضعیت خطر کاویتاسیون به "خطر جدی کاویتاسیون" تبدیل خواهد شد. از این رو پیشنهاد می‌شود، نسبت ارتفاع آب ورودی به حوضچه آرامش به عرض حوضچه کوچکتر از $1/82$ در نظر گرفته شود.

Reference:

- Abbaspour A, Hosseinzadeh Dalir A, Farsadzadeh D, Sadraddini AA (2009). Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics. *J Hydro Environ Res Elsevier B.V* 3(2):109–11.
- Alfatlawi, T. J., & Alshaikhli, H. I. (2015). Prediction the coefficient of discharge for stepped morning glory spillway using ANN and MNLr approaches. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 37(2), 1701-8285.
- Baharvand, S., Jozaghi, A., Fatahi-Alkouhi, R., Karimzadeh, S., Nasiri, R., & Lashkar-Ara, B. (2021). Comparative study on the machine learning and regression-based approaches to predict the hydraulic jump sequent depth ratio. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 45(4), 2719-2732.
- Campbell, F. B., and B. Guyton. (1953). Air demand in gated outlet works.” In Proc., 5th IAHR Congress. A Joint Meeting of Int. Association for Hydraulic Research and Hydraulics Div., 529–533. Reston, VA: ASCE.
- Dettmers, D. (1953). Beitrag zur Frage der Belüftung von Tiefschützen (A Contribution to the Aeration of High-head Gates). [In German.] Hannover, Germany: Franzius-Institut Technische Hochschule.
- Hager WH, Bremen R, Kawagoshi N (1990) Length of rollerRessaut hydraulique classique: Longueur du rouleau. *J Hydraul Res* 28(5):591–608.
- Hannover. Douma, H. 1955. “Hydraulic design criteria for reservoir outlets. In Proc., 6th IAHR Congress, 1–20. Reston, VA: ASCE.
- Falvey, H. T. 1980. Air-water hydraulic flow in structures. Engineering Monograph No. 41. US Dept. of the Interior. Denver: *Water and Power Resources Service*.
- Finnemore, E., Franzini, J. (2002). Fluid mechanics with engineering applications. New York: McGraw-Hill, 2002.
- Fiorotto, V., & Rinaldo, A. (1992). Turbulent pressure fluctuations under hydraulic jumps. *Journal of Hydraulic Research*, 30(4), 499-520.
- Hohermuth, B. (2019). Aeration and two-phase flow characteristics of low-level outlets. VAW-Mitteilung 253, edited by R. M. Boes. Zurich, Switzerland: ETH Zurich.
- Hohermut, B. Schmocker, L. Boes, R. M. (2020). Air demand of low-level outlets for large dams. *Journal of Hydraulic Engineering*, 146(8), 04020055, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001775](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001775).
- Hughes W, C., Flack, J, E., (1984). Hydraulic jump properties over a rough bed. *J Hydraul Eng* 110(12):1755–1771.
- Jesudhas, V., Balachandar, R. (2019). Turbulent shear flow in symmetric spatial submerged hydraulic jump. *11th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP11)* Southampton, UK.
- Kindsvater, C, E., (1944). The hydraulic jump in sloping channels. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 109(1), 1107-1120.
- Liu, Z. P., Guo, X. L., Xia, Q. F., Fu, H., Wang, T., & Dong, X. L. (2018). Experimental and numerical investigation of flow in a newly developed vortex drop shaft spillway. *Journal of Hydraulic Engineering* 144(5), 04018014.
- Sabeti, P., Karami, H., & Sarkardeh, H. (2019). Analysis of the Impact of Effective Length of Morning Glory Spillway on Its Performance (Numerical Study). *Journal homepage: <http://iijeta.org/journals/i2m>* 18(2), 211-221.
- Savage, B. M., & Johnson, M. C. (2001). Flow over ogee spillway: Physical and numerical model case study. *Journal of hydraulic engineering* 127(8), 640-649.
- Sualaheldin, T. M., Imran, J., & Chaudhry, M. H. (2004). Numerical modeling of three-dimensional flow field around circular piers. *Journal of Hydraulic Engineering* 130(2), 91-100.
- Salehi, S., Mostaani, A., & Azimi, A. H. (2021). Experimental and Numerical Investigations of Flow over and under Weir-Culverts with a Downstream Ramp. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 147(7), 04021029.
- Salehi, S., & Azimi, A. H. (2022). Effects of spoiler and piggyback on local scour under single and twin submerged pipes. *Ocean Engineering*, 261, 112137.
- Vischer, D., and Hager, W. H., (1998). Dam hydraulics. Chichester, UK: Wiley.
- Yakhot, V., & Smith, L. M. (1992). The renormalization group, the ϵ -expansion and derivation of turbulence models. *Journal of scientific computing* 7(1), 35-61.

یادداشت‌ها

¹ Dettmers

² Falvary

³ Hohemut

⁴ Campbell and Guyton

⁵ Sabeti

⁶ Savage

⁷ Fiorotto and Rinaldo

⁸ Kindsvater

⁹ Jesudhas and Balachandar