

Research Paper

Experimental Study the Performance of Bottom Cavitator in Water Conveyance Tunnel and its Effect on Separation Length

Masoumeh Zand¹,Khosrow Hosseini^{2*},Javad Ahadiyan³

¹ PhD Candidate, Water Engineering and Hydraulic Structures Department, Civil engineering Faculty, Semnan University, Iran

² Professor, Water Engineering and Hydraulic Structures Department, Civil engineering Faculty, Semnan University, Iran

³ Professor, Water and Environmental Engineering Faculty, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

[10.22125/IWE.2023.345331.1640](https://doi.org/10.22125/IWE.2023.345331.1640)

Received:

May 14, 2023

Accepted:

August 30, 2023

Available online:

December 30, 2023

Keywords:**Cavitator, Conveyance tunnel, Cavitation, Aeration, Separation Length**

Abstract

Cavitation is one of the most common and destructive causes of spillways and water conveyance tunnels. One of the most effective ways to prevent the cavitation is to aerate the current, provide the pressure and prevent excessive suction. Conventional types of aerators (cavitators) in hydraulic structures including ramps, steps, grooves, and their combinations. In this research, the performance of 19 cavitators with different geometries inside a box tunnel, for 5 discharges with/without aeration were investigated. Each experiment was performed for three times reduce the errors. Statistical analysis of the experimental results showed that the type of cavitator had considerable effects on the separation length. In spite of the positive effects of ramp height and discharge on separation length, the angle of ramp, step height, and groove depth had non-significant effects on separation length. Finally, two combined aerators were proposed, which in practice had better results in comparison with conventional aerators used in hydraulic structures.

1. Introduction

Dealing with cavitation is one of the most important challenges of fluid flow. Without controlling this phenomenon, the useful life of hydraulic structures is reduced. Cavitation usually occurs in places where the local velocity is very high (Shafae Bajestan, 2005). The risk of cavitation damages can be eliminated by air entrance at critical points near the concrete surface. The researches show by entering air near the surface of the concrete at a rate of 8% or more, cavitation is eliminated (Mohammad Vali Samani, 1997). The tendency to cavitation is determined by a dimensionless number called as cavitation index calculated as follows (Falvey, 1990):

$$\sigma = \frac{P - P_c}{\frac{1}{2} \rho V^2}$$

Frizell (2012) investigated the effect of the concentration of air entrance to flow in increasing the cavitation index. He concluded that by increasing the air concentration from zero to 7.1%, the cavitation index increases from 0.109 to 0.288 without major changes in the flow conditions.

* **Corresponding Author:** Khosrow Hosseini

Address: Water Engineering and Hydraulic Structures Department, Civil engineering Faculty, Semnan University, Iran.

Email: khoseini@semnan.ac.ir

Tel: 0233154210

2. Materials and Methods

In this research, an experimental setup of a closed-circuit water tunnel in the hydraulic laboratory at Shahid Chamran University (Figure 1) was used. This setup consisted of a plexiglass box with 1.1, 1.1, 2.4 meters in dimensions, a pump to supply the flow, piezometers for measuring the pressure and a rotameter to measure the air discharge induced to current. Nineteen cavitators were installed and the discharge varied from 30 to 40 l/s for two states (with and without aeration).



Figure 1) Experimental setup and equipment.

3. Discussion and Conclusion

The experiments were conducted as a factorial design in a completely random format, in which, the effect of two or more different factors is studied simultaneously. After data extracting, statistical analysis was done using PASW (SPSS20) software. First, analysis of variance was done on the data, then the significant factors according to the ANOVA table after analysis of variance are determined. Duncan's test at the 5% probability level was also used.

Effects of water discharge, type of cavitator and air injunction to flow were investigated. According to the analysis of variance table, the effect of the type of cavitator on the separation length was significant. As a result of the average comparison made by Duncan's method on the data, a table produced and for better understanding and comparing, the data of the table is shown as a bar chart in Figure 2.

The ramp height (H_R) had the major influences on the separation length. Three ramps with heights of 15, 20, and 25 mm were used, implemented with two different vertex angles 90 and 78.5 degrees. The first 6 bars of Figure 2 show that the increase in separation length is directly related to the increase in the height of the ramp for any vertex angle. Angle effect of ramp apex (α) on the separation length for 8 different cases are compared; In seven cases, the average separation length for ramp apex angles 90 and 78.5 degrees had similar letters, according to Duncan's test, they did not have a significant difference at the 5% probability level. For the case in which the combination of ramp, step and gap, the ramp with the angle 90 degree created a larger separation length compared with 78.5 degree (Figure 2).

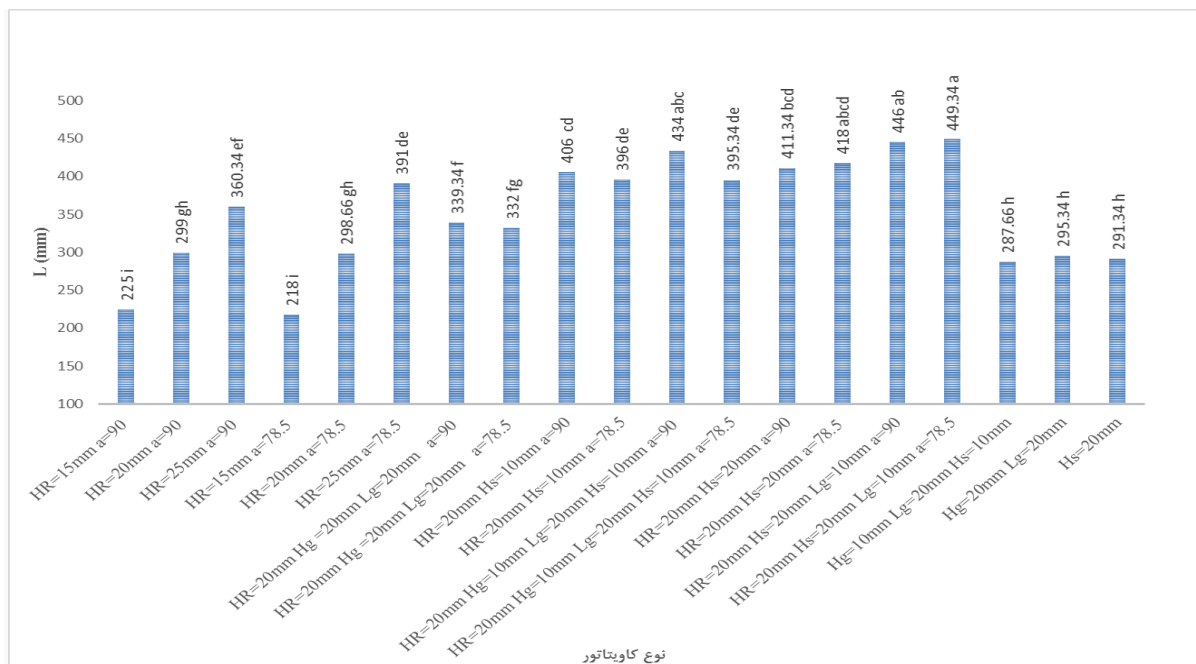


Figure 2) Effect of cavitator type on separation length

4. Results

Selection of optimal cavitators in hydraulic structures, in which water transfer occurs at high velocity is of great importance. According to tests, the type of cavitation has an effect on the length of separation, the height of the ramp and the flow rate have influence on the length of separation. The angle of the top of the ramp, the height of the step, and the depth of the gap have no significant effect on the length of separation. Two combined aerators were proposed, which in practice showed better results than conventional aerators in hydraulic structures.

5. Most important references

- 1) Falvey, Henry T., "Cavitation in Chutes and Spillways", 1990, Engineering Monograph, No. 42, USBR, 64 pages.
- 2) Frizell, K. W. 2012. Cavitation in Hydraulic Structures-Bridging the Gap between the Laboratory and the Real World. Utah State University, International Junior Researcher and Engineer Workshop on Hydraulic Structures.
- 3) Shafae Bajestan, M. 2005. Basics and application of physical-hydraulic models. First Edition. Publications of Shahid Chamran University of Ahvaz. 584 pages.
- 4) Mohammad Vali Samani, H. 1997. Design of hydraulic structures. First Edition. Dezab Consulting Engineering Company, 425 pages.
- 5) Savchenko, Y. 2001. Supercavitation-problems and perspectives. <http://resolver.caltech.edu/cav2001:lecture.003>.
- 6) Yang, J., Penghua T., and Chang, L. 2019. Air-vent layouts and water-air flow behaviors of a wide spillway aerator. Theoretical & Applied Mechanics Letters 9: 130-143



مطالعه آزمایشگاهی عملکرد هواده کف تونل آب‌بر و تأثیر آن بر طول جداشدگی

معصومه زند^۱ خسرو حسینی^۲ جواد احدیان^۳

مقاله پژوهشی

تاریخ ارسال: ۱۴۰۲/۰۲/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۰۸

چکیده

کاویتاسیون یکی از شایع‌ترین و مخرب‌ترین عوامل خرابی سرریز سدها و تونل‌های انتقال آب است. یکی از راهکارهای موثر در پیشگیری از کاویتاسیون، هواده‌ی به سیال از طریق تأمین فشار و جلوگیری از ایجاد مکش در جریان می‌باشد. به هر میزان جداشدگی جریان سیال از کف مجرا بعد از محل ورود هوا، دارای طول بیشتری باشد نشان دهنده ورود موثرتر هوا به جریان می‌باشد. انواع مرسوم هواده‌ها (کاویتاتورها) در سازه‌های هیدرولیکی شامل رمپ، پله، شکاف و ترکیب آنها می‌باشد. در این پژوهش عملکرد آزمایشگاهی ۱۹ کاویتاتور مختلف در جریان تحت فشار درون تونل با مقطع باکس، با ۵ دبی مختلف و ۲ حالت با هواده‌ی و بدون هواده‌ی مورد بررسی قرار گرفت. جهت اعتبار دهی به مجموعه برون‌دادها و کاهش احتمال خطا، کلیه آزمایش‌ها در ۳ زمان متفاوت تکرار شده‌اند. پس از تحلیل آماری نتایج آزمایش‌ها، مشاهده شد: نوع کاویتاتور روی طول جداشدگی تأثیر دارد، ارتفاع رمپ و افزایش دبی جریان، تأثیر مثبت روی طول جداشدگی داشته و زاویه رأس رمپ، ارتفاع پله، و عمق شکاف، تأثیر قابل ملاحظه‌ای روی طول جداشدگی نداشتند. در نهایت دو هواده ترکیبی پیشنهاد شد که در عمل نتایج بهتری را نسبت به هواده‌های مرسوم در سازه‌های هیدرولیکی، نشان دادند.

واژه‌های کلیدی: کاویتاتور (هواده)، تونل آب‌بر، کاویتاسیون، هواده‌ی، طول جداشدگی، سوپر کاویتاسیون مصنوعی

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی عمران- مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی دانشگاه سمنان Email: m_zand@semnan.ac.ir

^۲ استاد گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان Email: khoseini@semnan.ac.ir

^۳ استاد دانشکده مهندسی آب و محیط زیست دانشگاه شهید چمران اهواز Email: J.ahadiyan@scu.ac.ir



مقدمه

مقابله با کاویتاسیون از مهمترین چالش‌های جریان سیال می‌باشد، در صورت عدم کنترل این پدیده؛ خوردگی، کاهش عمر مفید و در نهایت تخریب سازه‌های ارزشمند و هیدرولیکی را در پی خواهد داشت. پدیده کاویتاسیون معمولاً در مکان‌هایی به وجود می‌آید که سرعت موضعی خیلی زیاد شود. در این نقاط فشار موضعی کاهش یافته و به فشار بخار می‌رسد به طوری که حباب‌ها یا کاویتی^۴ به وجود می‌آید. این حباب‌ها توسط جریان آب به پایین دست منتقل و در نقاطی که فشار موضعی بالاست منفجر می‌شوند. شدت انفجار آنقدر زیاد است که می‌تواند باعث تخریب جداره صلب گردد (شفاعی بجستان ۱۳۸۴). مطالعات نشان می‌دهد که به کاربردن بتن با مقاومت بسیار بالا طرح را بطور کامل از تهویه بی‌نیاز نمی‌کند. به طور کلی خطر کاویتاسیون را می‌توان با دمیدن هوا در نقاط بحرانی نزدیک سطح بتن رفع نمود. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که اگر در نزدیکی سطح بتن حدود ۰/۸ دبی جریان یا بیشتر، هوا دمیده شود ناهمواری‌ها سبب کاویتاسیون نخواهد شد (محمودلی سامانی ۱۳۷۶).

فریزل (۲۰۱۲) تأثیر غلظت هوای ورودی به جریان را در افزایش عدد کاویتاسیون بررسی نمود. او نتیجه گرفت که با افزایش غلظت هوا از صفر تا ۷/۱٪، شاخص کاویتاسیون از ۰/۱۰۹ تا ۰/۲۸۸ بدون تغییرات عمده در شرایط جریان، افزایش می‌یابد. حالتی از پدیده کاویتاسیون منجر به ایجاد یک حباب نسبتاً بزرگ با یک مرز پایدار و متمایز بین داخل حباب و جریان آب می‌گردد که به آن سوپر کاویتاسیون گویند. معمولاً سوپر کاویتاسیون طبیعی در اعداد کاویتاسیون کمتر از حدود ۰/۱ رخ می‌دهد. روش‌های متفاوتی برای رسیدن به سوپر کاویتاسیون وجود دارد که برخی از آنها عبارتند از: (۱) افزایش شتاب بدنه و رسیدن به سرعت‌های زیاد، به عنوان مثال بیشتر از حدود ۴۵ متر بر ثانیه، برای متحرک‌های زیرسطحی در دریا، (۲) کاهش فشار محیط. البته این روش تنها در تونل‌های آب آزمایشگاهی مدار بسته قابل اجرا می‌باشد و (۳) افزایش

فشار داخل حباب از طریق تزریق به حباب با گازهای نامحلول. سوپر کاویتاسیون ایجاد شده از روش‌های اول و دوم "سوپر کاویتاسیون طبیعی" و سوپر کاویتاسیون ناشی از روش سوم را "سوپر کاویتاسیون هوادهی شده" یا "سوپر کاویتاسیون مصنوعی" می‌نامند. اندازه قطر و طول حباب ایجاد شده به فرم و منحنی کاواکساز^۵ و سرعت حرکت بدنه بستگی دارد. یکی از عوامل ایجاد حباب سوپر کاویتاسیون، کاواکساز است که به واسطه تغییر هندسه آن نرخ ایجاد کاویتاسیون و طول حباب سوپر کاویتاسیون تغییر می‌کند. تمایل به کاویته شدن با عدد بی بعد کاویتاسیون مشخص می‌شود که به صورت زیر محاسبه می‌گردد (فالوی، ۱۹۹۰):

$$\sigma = \frac{P - P_c}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (1)$$

که در آن P و V به ترتیب فشار و سرعت مرجع، P_c فشار داخل حفره در حالت مصنوعی و ρ چگالی مایع است. هوادهی به جریان سیال راه حل اساسی مبارزه با پدیده کاویتاسیون می‌باشد که با نصب هواده در سرریزها و تونل‌های آب بر صورت می‌گیرد. در آزمایش‌های تجربی در تونل‌های آب، چنانچه فاصله دیواره‌های تونل از بدنه مدل از حد معینی کمتر باشد تأثیرات دیواره بر طول و شکل حباب کاویتی قابل ملاحظه می‌باشد. برای این منظور، چنانچه بخواهیم تأثیرات دیواره بر شکل و طول حباب ناچیز باشد می‌بایست عدد کاویتاسیون جریان مورد مطالعه از عدد انسداد جریان (ضریب انسداد) بیشتر باشد. این ضریب از معادله بقای جرم و معادله برنولی با کمک رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$\sigma_{blockage} = \frac{S_u^2}{S_d^2} - 1 \quad (2)$$

در این معادله، S_u و S_d به ترتیب نشان دهنده سطح مقطع جریان در بالادست و پایین دست مدل می‌باشند. نتایج تجربی مختلف نشان داده که با کاهش هر چه بیشتر عدد کاویتاسیون، طول حباب کاویتی نیز بزرگتر می‌شود تا اینکه در عدد کاویتاسیونی برابر و یا کمتر از ضریب انسداد جریان و در شرایطی که مقدار فشار کاویتی کمتر از فشار

⁵ Cavitator

4 Cavity



نمودند و تأثیر ورود هوا در رابطه با هندسه هواده در راستای کاهش آسیب‌های کاویتاسیون را مطالعه نمودند. یانگ و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهشی چیدمان هواده ها و رفتارهای جریان آب و هوا در هواده یک سرریز عریض را بررسی نمودند. هواده از رمپ و نوعی شکاف افقی تشکیل شده بود که به علت عریض بودن سرریز در مرکز آن دچار کمبود هوا می‌گردید، بدین منظور ۲ حالت مختلف بازشدگی شکاف افقی که هر کدام با چهار اندازه متفاوت طراحی شده‌اند، با شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی بررسی و مطالعه گردید.

البینگ و همکاران (۲۰۱۸) به منظور طراحی یک تونل آب با ایجاد جریان آشفتنه در مدل هیدرولیکی، عدد رینولدز حدود ۱۵۰۰۰ را ایجاد نموده و به مطالعه اثر هانی کام در مسیر جریان و فرم و اندازه بهینه آن پرداختند. در این تحقیق از سرعت سنج مبتنی بر تصویربرداری از ذرات (PIV) برای بررسی میدان جریان استفاده شده است.

مهدوی میمند و همکاران (۱۳۹۳) جهت برآورد هوای مورد نیاز هواده‌ها از سه روش شبکه عصبی مصنوعی (مبتنی بر الگوریتم لونیگ-مارکوا)، ترکیبی عصبی- فازی (ANFIS) و رابطه تجربی فیشر استفاده نمودند. پارامترهای عمق جریان در ابتدای سیستم هواده، دبی جریان عبوری از سرریز، ارتفاع پله، زاویه رمپ و اختلاف فشار بین اتمسفر و فشار زیر جت جریان عبوری از روی سیستم هواده، به عنوان عوامل مؤثر بر میزان جریان هوای مورد نیاز هواده در نظر گرفته شده‌اند و مدل سازی بر اساس این پارامترها صورت گرفت.

مطالعات قابل توجهی پیرامون مکلنیزم وقوع کاویتاسیون و نیز شدت آسیب پدیده در سازه‌های هیدرولیکی صورت پذیرفته، اما در تمامی تحقیقات اکثراً به نقش یک عامل در وقوع آسیب و تنها به ازای مقادیر خاصی از دبی و شرایط ویژه جریان توجه شده است. از طرف دیگر توجه به این امر ضروری است که لزوماً کاویتاسیون در سرعت‌های بالا رخ نمی‌دهد. (فدائی کرمانی و همکاران ۱۳۹۶)

محیط باشد طول حباب بسیار بزرگ و از نظر تئوری به سمت بینهایت میل خواهد نمود (فزانک و میشل ۲۰۰۶). در آزمایش‌های تحقیق حاضر، در بلندترین کاویتاتور ($H_R = 25mm$) و بیشترین سرعت آزمایش مقدار ضریب انسداد جریان برابر با ۰/۶۷۵ بوده و کمترین عدد کاویتاسیون بوقوع پیوسته در آزمایش‌های مختلف برابر ۰/۸۷۷ بدست آمده است، لذا دیواره تونل بر نتایج تأثیر قابل ملاحظه ای ندارد.

هواده‌ی به جریان و ایجاد بالشتک هوا بین بدنه جسم متحرک در راستای کاهش اصطکاک در سرعت های زیاد اجسام متحرک داخل سیال نیز مد نظر محققین بوده است. سوپرکاویتاسیون مصنوعی پدیده ای است در کاهش نیروی اصطکاک کششی روی پوسته رونده‌های غوطه‌ور در آب و توانمند نمودن آنها در حرکت با سرعت‌های بسیار بالا، بسیار مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در این پدیده، وجود پیوسته هوا تمام جسم متحرک را در برمی‌گیرد. پدیده سوپرکاویتاسیون توسط مدلسازی فیزیکی در آزمایشگاه قابل بررسی است و برای توسعه مناسب این نتایج به عملکرد اجسام متحرک زیر آب در اقیانوس، ضروریست که اصول فیزیکی حاکم بر این فرآیند رعایت گردد (کارن و روسیکا ۲۰۱۷).

یکی از مهمترین بخش‌های این اجسام متحرک داخل آب شکل دماغه یا کاویتاتور آنها است که باعث ایجاد حفره روی کل بدنه می‌گردد. (مقیمی و همکاران ۲۰۱۷)

کارن و همکاران (۲۰۱۶) برخی عکس‌العمل‌های هوای ورودی برای ایجاد و متلاشی شدن یک سوپرکویتی هواده‌ی شده تحت شرایط جریان ماندگار و غیرماندگار را بررسی نمودند. آزمایش‌ها نشان داد که هوای مورد نیاز برای ایجاد یک سوپرکویتی خیلی بیشتر از حداقل هوای مورد نیاز برای تقویت آن است، و مقادیر ورود این هوا به عدد فرود، اندازه کاویتاتور و غیرماندگاری جریان بستگی دارد.

روان و همکاران (۲۰۰۷) شکل و اندازه هواده برای سرریز تونلی یک سد برای جریان‌های با سرعت بالا را در یک مدل فیزیکی با مقیاس $\frac{1}{3}$ و تشلبه فرودی بررسی



است. معمولاً بعد از هواده، ورود هوا باعث جداسدگی جریان سیال از کف مجرا خواهد شد، هرچه جداسدگی دارای طول بیشتری باشد نشان دهنده ورود موثرتر هوا به جریان می‌باشد.

در تحقیق حاضر، جریان آب تحت فشار در مقطع باکس با قراردادن و ترکیب چند نوع مختلف هواده (از نظر شکل و ابعاد) در کف مجرا، برقرار و در هر مورد میزان طول جداسدگی بررسی شد.

مواد و روش ها

معرفی تجهیزات آزمایشگاهی و روش انجام آزمایش

در این پژوهش از مجموعه تجهیزات تونل آب مدار بسته، در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی آب دانشگاه شهید چمران اهواز، بهره برده شد (شکل‌های ۱ و ۲). مقطع آزمایش باکس با مقطع مربعی به ابعاد ۱۱ در ۱۱ سانتیمتر مربع و طول ۲.۴ متر و از جنس پلکسی گلاس ساخته شد.

احتمال وقوع کاویتاسیون با استفاده از روش‌های قابلیت اطمینان FORM و شبیه سازی مونت کارلو، بر روی مدل سرریز تنداب سد داریان بررسی گردید و احتمال خرابی به روش FORM برابر با ۳۵٪ و توسط روش مونت کارلو برابر با ۴۰٪ بدست آمده است (اژدری مقدم و حسنعلی پور شهرآبادی، ۱۳۹۹).

در روندهای زیر سطح آب (اژدر، زیر دریایی، قایق تندرو، و ...) هدف کاهش مقاومت سیال روی بدنه جسم و به تبع آن افزایش سرعت است، پدیده سوپر کاویتاسیون مصنوعی یا سوپر کاویتاسیون هواده‌ی شده با ایجاد یک حباب بزرگ اطراف سازه و ایجاد ناحیه جدایی بین مایع و بدنه سازه منجر به کاهش فراوان نیروی درگ و اصطکاک، در نتیجه افزایش بسیار زیاد سرعت جسم متحرک می‌شود. در سازه‌های هیدرولیکی هدف از هواده‌ی افزایش غلظت هوا در جریان سیال با سرعت زیاد روی سازه است تا از ایجاد فشار منفی و خلاء موضعی که منجر به تخریب سازه می‌گردد، جلوگیری نماید و یک ناحیه جدایی بین سیال با سرعت زیاد و سازه هیدرولیکی با حداکثر طول جداسدگی ایجاد نماید. لذا یکی از روش‌های موثر برای پیشگیری از کاویتاسیون، هواده‌ی به سیال می‌باشد. به منظور مکش بهتر هوا به جریان و خصوصاً توزیع مناسب هوا به کل عرض جریان وجود هواده مناسب غیر قابل انکار



شکل (۱) تصویر تجهیزات تونل آب مدار بسته



شکل (۲) مقطع آزمایشی تونل آب بر به همراه مانومترهای جیوه‌ای و روتامتر

دیجیتال ثبت می‌گردید. برای اطمینان از توسعه یافتگی جریان و حذف اثر لایه مرزی در محل آزمایش، در ورودی باکس قبل از محل برداشت‌های آزمایش از هانی‌کام با ابعاد 1×1 در 1 میلیمتر مربع استفاده شد. ۱۹ کاویتاتور مختلف (جدول ۱) تحت دبی‌های 30 ، $33/3$ ، 35 و $36/6$ و 40 لیتر در ثانیه و در 2 حالت بدون هوادهی و با هوادهی مورد آزمایش قرار گرفت و کل آزمون‌ها 3 مرتبه تکرار شد. انتخاب محدوده دبی‌ها به گونه‌ای بوده است که جریان در کلیه دبی‌ها تحت فشار بوده و سیستم دچار ارتعاش شدید نگردیده تا برداشت داده با ابزار موجود امکان‌پذیر باشد.







هواده‌های مورد آزمایش در تمام عرض کف تونل نصب می‌گردید، و محل ورود هوا به فاصله 5 mm بعد از هواده تعبیه شده بود. فشار نسبی جریان در پنج نقطه از باکس شامل: بالادست هواده، روی محل هواده، بلافاصله بعد از هواده و دو نقطه در پایین دست هواده با ایجاد ارتباط با مانومترهای جیوه‌ای قرلثت می‌شد. دبی جریان به کمک فلومتر آلتراسونیک، در محل مناسبی روی لوله قبل از مقطع آزمایشی، اندازه‌گیری شده است. دبی هوای ورودی به جریان توسط روتامتر اندازه‌گیری شده است. طول حفره^۶ توسط متر نواری که روی باکس نصب شده بود اندازه‌گیری و شکل (عکس و فیلم) آن توسط دوربین

⁶ Cavity

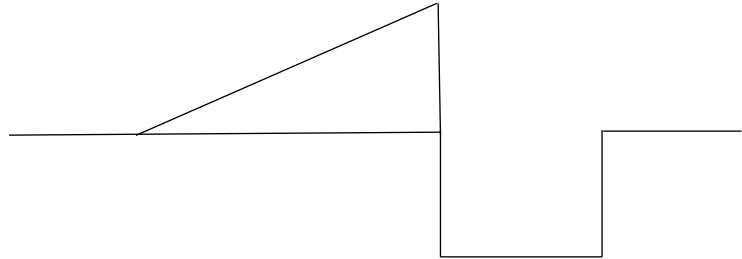


جدول (۱): انواع کاویتاتور استفاده شده در آزمایش‌ها

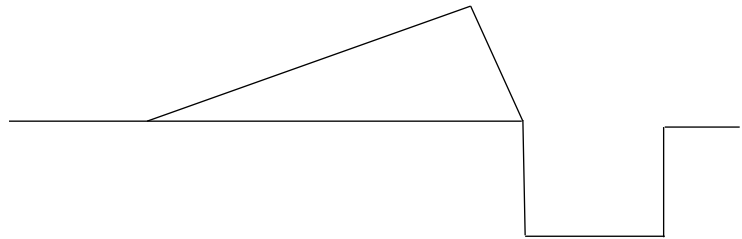
(HR: ارتفاع رمپ، HS: ارتفاع پله، Hg: عمق شکاف، Lg: طول شکاف و α : زاویه رأس رمپ)

شماره	توصیف	شکل
1	HR=15mm $\alpha=90$	
2	HR=20mm $\alpha=90$	
3	HR=25mm $\alpha=90$	
4	HR=20mm Hs=20mm $\alpha=90$	
5	HR=20mm Hs=20mm $\alpha=78.5$	
6	HR=20mm $\alpha=78.5$	

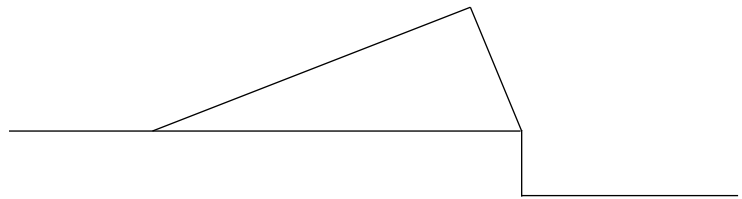
7 HR=20mm
Hg =20mm
Lg=20mm
 $\alpha=78.5$



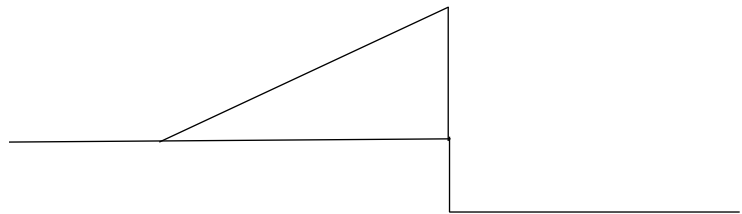
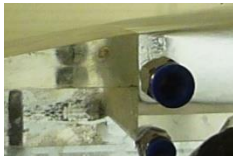
8 HR=20mm
Hg =20mm
Lg=20mm
 $\alpha=90$



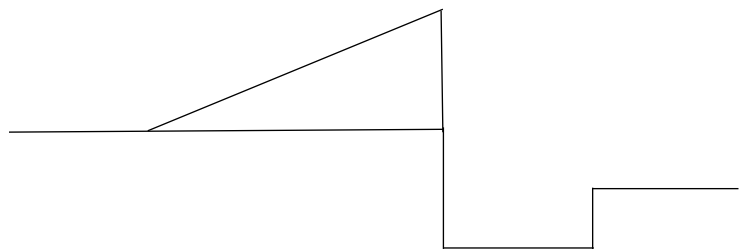
9 HR=20mm
Hs=10mm
 $\alpha=90$



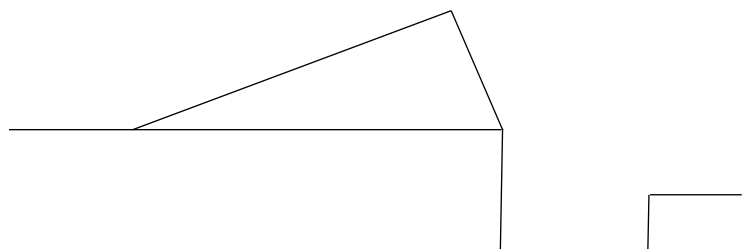
10 HR=20mm
Hs=10mm
 $\alpha=78.5$



11 HR=20mm
Hg=10mm
Lg=20mm
Hs=10mm
 $\alpha=78.5$



12 HR=20mm
Hg=10mm
Lg=20mm
Hs=10mm
 $\alpha=90$





13	$H_g=10\text{mm}$ $L_g=20\text{mm}$ $H_s=10\text{mm}$		
14	$H_s=20\text{mm}$		
15	$H_g=20\text{mm}$ $L_g=20\text{mm}$		
16	$HR=20\text{mm}$ $H_s=20\text{mm}$ $L_g=10\text{mm}$ $\alpha=90$		
17	$HR=20\text{mm}$ $H_s=20\text{mm}$ $L_g=10\text{mm}$ $\alpha=78.5$		
18	$HR=15\text{mm}$ $\alpha=78.5$		
19	$HR=25\text{mm}$ $\alpha=78.5$		



تجزیه و تحلیل آماری

آزمایش‌ها به صورت طرح فاکتوریل در قالب کاملاً تصادفی انجام شد. در طرح فاکتوریل، در انجام آزمایش‌ها اثر دو یا چند عامل مختلف به صورت همزمان مورد مطالعه قرار می‌گیرد. پس از استخراج داده‌ها از عکس‌ها و فیلم‌ها و دسته‌بندی و ثبت آنها در نرم افزار Excel، تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم افزار (SPSS20) PASW انجام پذیرفت. ابتدا آنالیز واریانس روی داده‌ها صورت گرفت (جدول ۲)، سپس فاکتورهایی که طبق جدول ANOVA پس از تجزیه واریانس معنی‌دار شد. جهت مقایسه میانگین آنها از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد استفاده گردید.

موارد ستاره دار مواردی هستند که در آنها فاکتور معنی دار شده است و بیانگر این است که این فاکتورها که شامل نوع هواده، ورود یا عدم ورود هوا، دبی جریان آب، و تأثیر همزمان دو به دو این فاکتورها و در نهایت تأثیر هر سه فاکتور می‌باشد، روی طول حباب هوای ایجاد شده در محل هواده، تأثیر داشته‌اند.

جدول (۲) تجزیه واریانس داده‌ها (ANOVA)

Source	df	Mean Square length L^2 (mm^2)
Cavitator	18	38566*
Air	1	17686253*
Water	4	40248*
Cavitator & Air	18	38566*
Cavitator & Water	72	338
Air & Water	4	40248*
Cavitator & Air & Water	72	338
Error	380	1046
Total	570	
Corrected Total	569	

پس از تعیین وجود یا عدم وجود اختلاف بین

گروه‌های آزمون (بررسی معنی‌دار بودن آزمون در جدول آنالیز واریانس)، این سوال مطرح می‌شود که تفاوت میانگین بین کدام دو گروه معنی‌دار می‌باشد. آزمون دانکن یکی از مجموعه آزمون‌هایی است که برای مقایسه میانگین داده‌ها استفاده می‌شود و ما در این تحقیق از آن بهره برده‌ایم. برای اجرای این آزمون ابتدا میانگین تیمارها به صورت افزایشی مرتب و خطای استاندارد هر میانگین معین می‌شود. سپس مقایسه بین میانگین‌ها انجام می‌شود. مقادیر، در سطح معنی‌داری α (در تحقیق حاضر ۰/۰۵) و با f درجه آزادی (که برابر درجه آزادی خطا است)، از جدول دامنه‌های معنی‌دار دانکن بدست می‌آیند. آزمون دانکن فاکتورهایی را که از لحاظ آماری با یکدیگر تفاوت معنی‌داری ندارند در یک ستون قرار می‌دهد و به این ترتیب فاکتورهای مشابه (به عنوان مثال در تحقیق ما کایتاتورها (مشابه) را می‌توان در گروه‌هایی (ما به صورت الفبای انگلیسی انجام داده‌ایم) طبقه‌بندی نمود.

بحث و نتایج

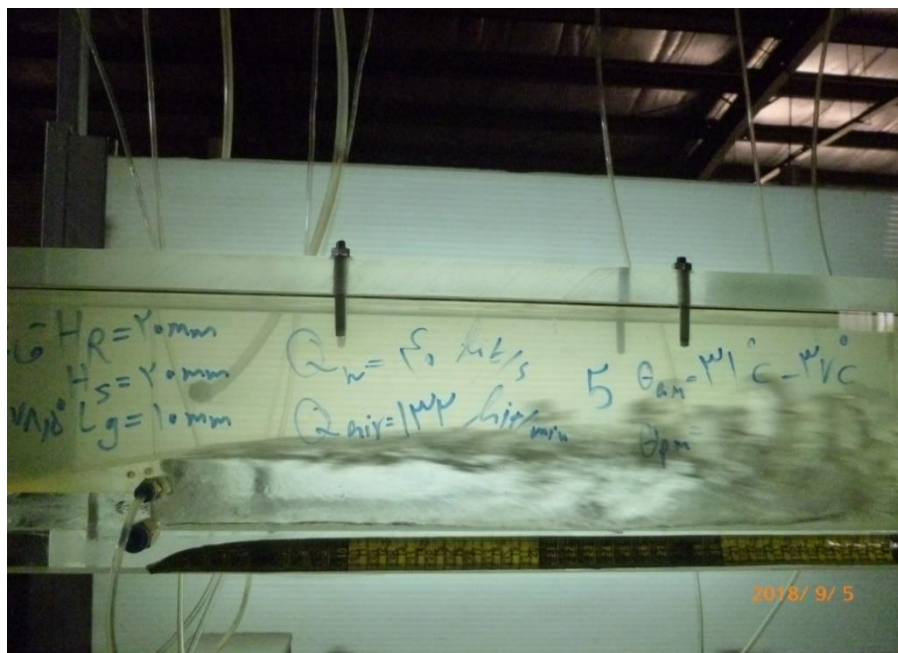
با توجه به نتایج آنالیز آماری صورت گرفته که شامل سه مرحله تکرار برداشت داده از ۱۹ حالت مختلف ترکیب کایتاتورها برای ۵ دبی جریان آب و در دو حالت بدون ورود هوا و با ورود هوا به جریان آب تحت فشار در تونل آب مدار بسته با مقطع باکس با عرض ۰/۱۱ متر و ارتفاع ۰/۱۱ متر و طول ۲/۴ متر، که بخشی از نتایج آن در جدول ۲. (ANOVA) ارائه شده است؛ تأثیر هواده بر طول جداسدگی معنی‌دار شد، یعنی نوع هواده در میزان جداسدگی بعد از هواده تأثیرگذار می‌باشد. در عمل با افزایش طول جداسدگی زیر جت سیال، توانایی جریان آب برای مکش هوا از مجرای تعبیه شده بعد از هواده در دیواره باکس، به درون خود افزایش یافته و در نتیجه با افزایش غلظت هوا، احتمال وقوع کایتاسیون کاهش می‌یابد. به این مورد در مراجع مختلف استناد شده است (محمودولی سامانی ۱۳۷۶).

تأثیر فاکتور ورود و عدم ورود هوا روی طول جداسدگی

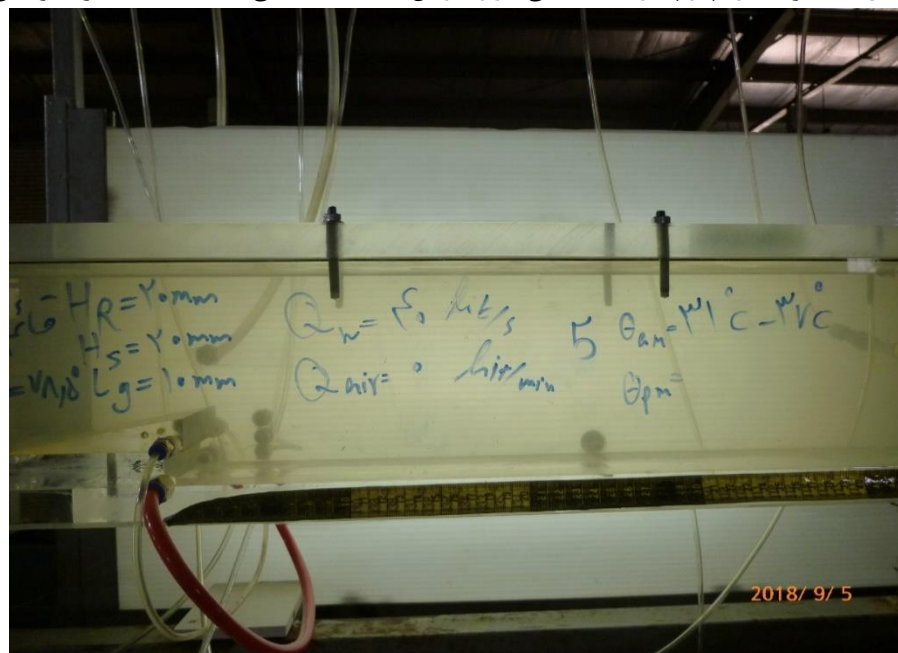


شده (جوادپور و همکاران ۱۳۹۶) در جریان ایجاد شده و حباب هوا پس از کاویتاتور تشکیل می‌گردد و با ایجاد جدایی بین جت سیال و کف مجرا باعث کاهش تماس و در نتیجه کاهش اصطکاک بین سیال و کف مجرا گردیده و همچنین مقادیر دبی قابل توجهی از هوا را به جریان وارد شده و سبب افزایش غلظت هوا در جریان آب می‌گردد.

طبق جدول تجزیه واریانس معنی دار است و طبق اطلاعات آزمایشگاهی برداشت شده، بدیهی می‌باشد. در شرایط آزمایشگاهی ایجاد شده، در صورت ممانعت از ورود هوا جداسازی اتفاق نمی‌افتاد (شکل‌های ۳ و ۴) و در حقیقت با هر بار اجازه ورود هوا به سیستم به نوعی سوپرکاویتاسیون مصنوعی یا سوپرکاویتاسیون هوادهی



شکل (۳): ترکیب رمپ و پله و شکاف افقی با زاویه رأس $78/5^\circ$ تحت دبی آب 40 lit/s به همراه هوادهی



شکل (۴): ترکیب رمپ و پله و شکاف افقی با زاویه رأس $78/5^\circ$ تحت دبی آب 40 lit/s و بدون هوادهی



کاویتاتور و تغییر دبی آب و فاکتور کاویتاتور و اجازه ورود و عدم ورود هوا و تغییر دبی آب، با وجود عدم معنی داری، یکسان شده است.

پارامترهای اصلی تأثیر گذار بر جریان دارای حفره (کویتی) شامل شاخص سوپر کاویتاسیون هوادهی شده σ (رابطه ۱) و عدد فرود طول جدادشگی (رابطه ۳) می باشند.

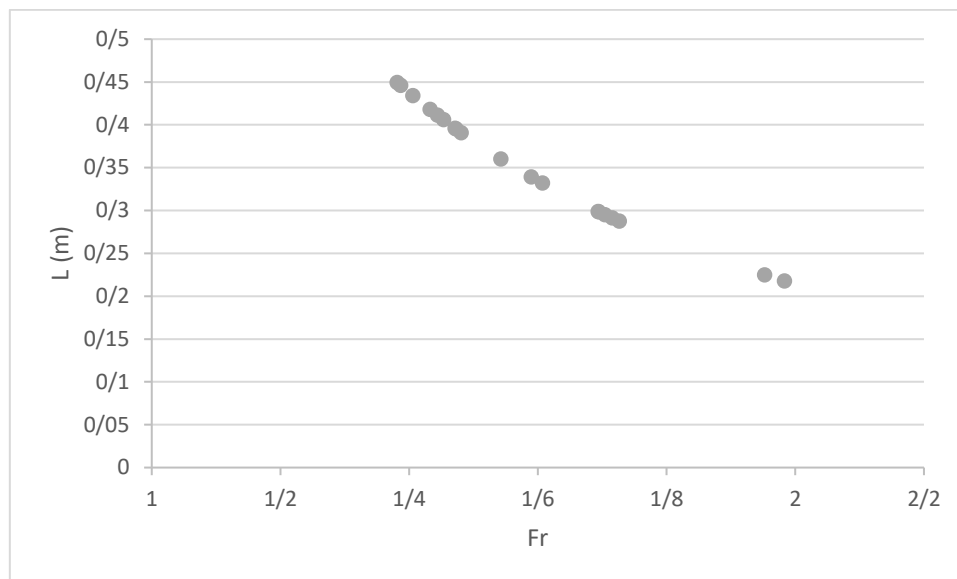
$$Fr_\ell = \frac{V_\infty}{\sqrt{g\ell}} \quad (3)$$

در این رابطه V_∞ سرعت متوسط جریان در بالادست، g شتاب ثقل و ℓ متوسط طول حفره است (فرلنک و میشل ۲۰۰۶). بدین ترتیب مقادیر σ و Fr_ℓ برای تمام حالات هوادهی محاسبه و در جدول ۳ درج گردیده است. به منظور درک بهتر رابطه بین طول جدادشگی و عدد فرود طول جدادشگی در شکل ۵ ترسیم شده است. طبق این نمودار طول جدادشگی رابطه معکوس با عدد فرود Fr_ℓ دارد به گونه ای که با افزایش عدد فرود، طول جدادشگی کاهش می یابد.

طبق نتایج حاصله از جدول ۲، فاکتور تغییر دبی آب روی طول جدادشگی، طبق برداشت های صورت گرفته از آزمایش ها، دارای تأثیر قابل توجه بوده و اصطلاحاً معنی دار می باشد. تأثیر هم زمان فاکتورهای هواده، ورود و یا عدم ورود هوا نیز روی طول جدادشگی معنی دار شده است. تأثیر توأم فاکتورهای هواده و تغییر دبی روی طول جدادشگی معنی دار نشده است. در نهایت تأثیر هم زمان فاکتورهای کاویتاتور، ورود و عدم ورود هوا، و تغییر دبی آب روی طول جدادشگی یا همان طول حباب هوا، طبق نتایج جدول تجزیه واریانس معنی دار گردید. نظر به اینکه صرفاً با ورود هوا جدادشگی اتفاق می افتد و حباب هوا تشکیل گردیده و در جریان توزیع می گردد، میانگین مربعات طول جدادشگی در حالت تأثیر فاکتور نوع هواده به تنهایی و در حالت تأثیر توأم نوع هواده و اجازه ورود هوا یکسان است. همچنین میانگین مربعات طول جدادشگی در حالت تأثیر فاکتور تغییر دبی آب به تنهایی و تأثیر هم زمان فاکتور تغییر دبی آب و اجازه ورود هوا یکسان است و نیز میانگین مربعات طول جدادشگی در حالت تأثیر

جدول (۳): مقادیر σ و Fr_ℓ برای دبی میانگین جریان آب

Cavitator	ℓ (m)	σ	Fr_ℓ
HR=15mm $\alpha=90^\circ$	0.225	0.811	1.95
HR=20mm $\alpha=90^\circ$	0.299	0.946	1.69
HR=25mm $\alpha=90^\circ$	0.36034	1.135	1.54
HR=15mm $\alpha=78.5^\circ$	0.218	0.815	1.98
HR=20mm $\alpha=78.5^\circ$	0.29866	0.756	1.69
HR=25mm $\alpha=78.5^\circ$	0.391	1.516	1.48
HR=20mm Hg =20mm Lg=20mm $\alpha=90^\circ$	0.33934	1.014	1.59
HR=20mm Hg =20mm Lg=20mm $\alpha=78.5^\circ$	0.332	1.15	1.61
HR=20mm Hs=10mm $\alpha=90^\circ$	0.406	1.168	1.45
HR=20mm Hs=10mm $\alpha=78.5^\circ$	0.396	0.929	1.47
HR=20mm Hg=10mm Lg=20mm Hs=10mm $\alpha=90^\circ$	0.434	0.916	1.41
HR=20mm Hg=10mm Lg=20mm Hs=10mm $\alpha=78.5^\circ$	0.39534	1.188	1.47
HR=20mm Hs=20mm $\alpha=90^\circ$	0.41134	1.109	1.44
HR=20mm Hs=20mm $\alpha=78.5^\circ$	0.418	1.1	1.43
HR=20mm Hs=20mm Lg=10mm $\alpha=90^\circ$	0.446	0.819	1.39
HR=20mm Hs=20mm Lg=10mm $\alpha=78.5^\circ$	0.44934	0.884	1.38
Hg=10mm Lg=20mm Hs=10mm	0.28766	0.228	1.73
Hg=20mm Lg=20mm	0.29534	0.076	1.7
Hs=20mm	0.29134	0.062	1.72



شکل (۵): رابطه بین طول جداشدگی و عدد فرود طول جداشدگی

- تأثیر ارتفاع رمپ (H_R) روی طول جداشدگی به وضوح مثبت گردید. در آزمایش‌های صورت گرفته سه رمپ با ارتفاع ۱۵، ۲۰، و ۲۵ میلی‌متر استفاده شده است و از آنجایی که با دو زاویه رأس متفاوت $90^\circ = \alpha$ و $78.5^\circ = \alpha$ نیز اجرا شده‌اند، ۶ میله اول شکل ۶، افزایش طول جداشدگی با افزایش ارتفاع رمپ (با هر زاویه رأسی) رابطه مستقیم دارد.

- تأثیر زاویه رأس رمپ (α) روی طول جداشدگی در ۸ حالت مختلف مقایسه شده است؛ در هفت حالت میانگین طول جداشدگی با زوایای رأس رمپ $90^\circ = \alpha$ و $78.5^\circ = \alpha$ دارای حروف مشابه بودند (یعنی براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵٪ دارای تفاوت معنی دار نشدند)، و فقط در حالت ترکیب رمپ و پله و شکاف، رمپ با زاویه رأس $90^\circ = \alpha$ (جدول ۱، کلویتاتور شماره ۱۲) نسبت به زاویه $78.5^\circ = \alpha$ (جدول ۱، کلویتاتور شماره ۱۱) طول جداشدگی بزرگتری را ایجاد نموده است (شکل ۶).

- تأثیر ارتفاع پله (H_S) روی طول جداشدگی در دو حالت با ارتفاع پله ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر مقایسه شده است و طبق آزمون دانکن دارای تفاوت معنی داری نبوده‌اند (شکل ۶).

نتایج مقایسه میانگین بین فاکتورها به روش دانکن: هر عاملی که در جدول تجزیه واریانس معنی دار باشد برای آن جدول دانکن جهت مقایسه میانگین تشکیل می‌شود. در جدول مقایسه میانگین اعدادی که از نظر آماری با هم اختلاف معنی داری نداشته باشند در یک گروه مشابه قرار می‌گیرند و این گروه‌ها را با اعداد یا با حروف الفبای کوچک انگلیسی نام گذاری می‌کنند. هر عدد ممکن است در چند گروه قرار بگیرد. (میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵٪ دارای تفاوت معنی دار نمی‌باشند).

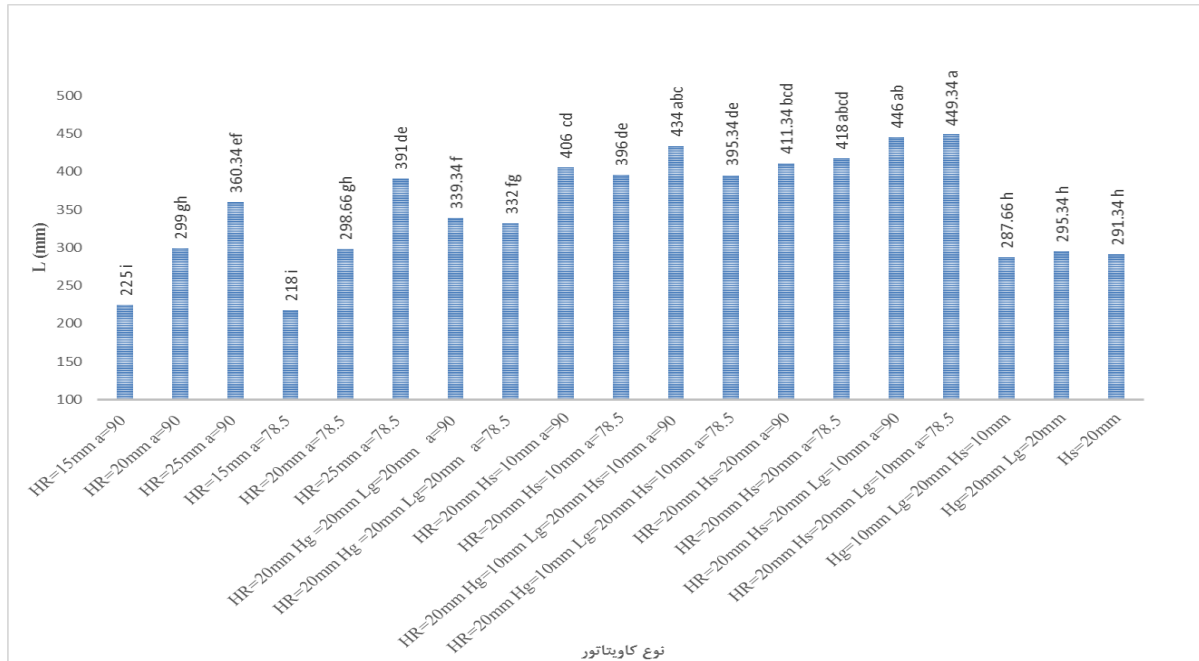
لازم به ذکر است برای داده‌های با تعداد کمتر از ۳ حالت، حتی با وجود معنی دار بودن آن خصوصیت در جدول تجزیه واریانس، جدول مقایسه میانگین تشکیل نمی‌گردد (فاکتور ورود و عدم ورود هوا چون فقط ۲ حالت می‌باشد با وجود معنی دار بودن آن در تمام موارد، دارای جدول مقایسه میانگین نمی‌باشد).

از آنجا که طبق جدول تجزیه واریانس، تأثیر نوع کلویتاتور روی طول جداشدگی معنی دار شده بود، در نتیجه مقایسه میانگین صورت گرفته به روش دانکن روی داده‌ها جدولی تولید نموده که برای درک بهتر و امکان مقایسه راحت‌تر، داده‌های جدول را بصورت نمودار میله‌ای شکل ۶ نشان داده شده است.

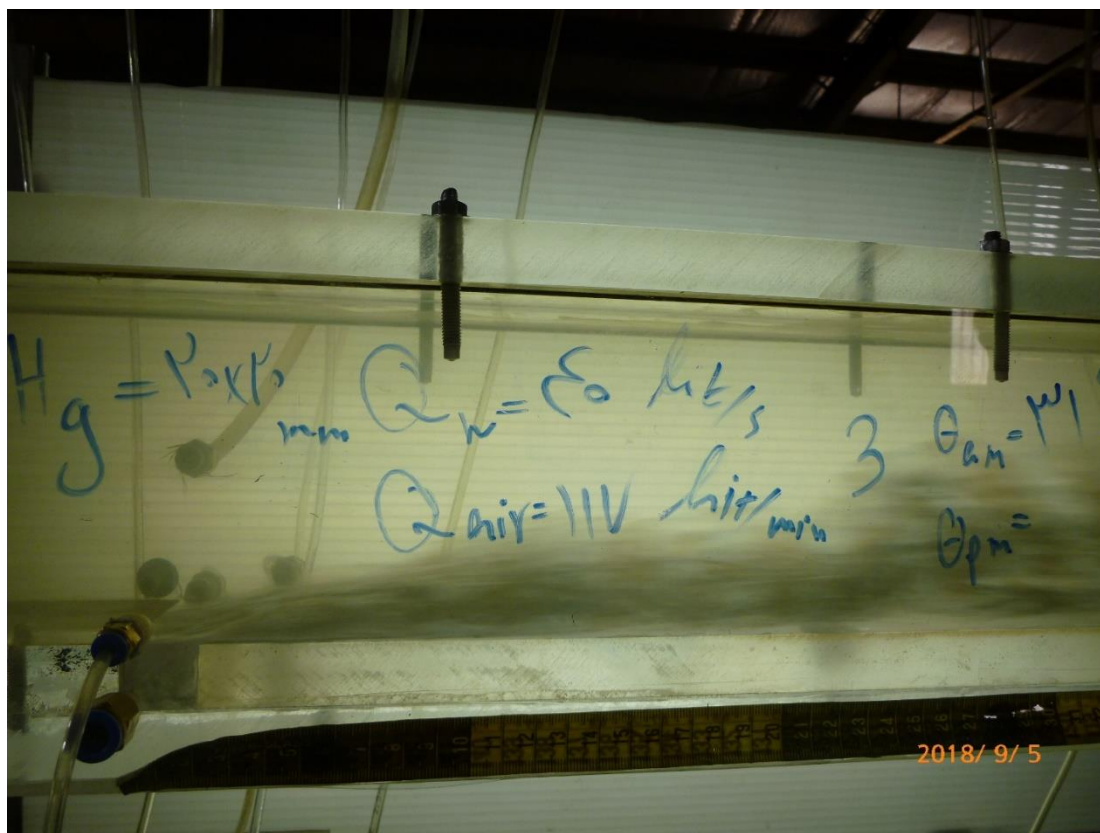


مشاهدات آزمایش (شکل ۷)، کاویتاتور شکاف، نسبت به سایر کاویتاتورها، جداشدگی با طول مشخص در کف ایجاد نموده و بیشتر به مکش هوا به درون جریان کمک می‌نماید.

• تأثیر عمق شکاف (H_g) روی طول جداشدگی با دو اندازه ۲۰ و ۱۰ میلیمتر مقایسه شده و طبق آزمون دانکن دارای تفاوت معنی داری نمی‌باشد (شکل ۶). طبق



شکل (۶): تأثیر نوع کاویتاتور روی طول جداشدگی Mean L



شکل (۷): تصویر کاویتاتور شکاف (Hg=20mm Lg=20mm) با دبی آب ۴۰lit/s و با ورود هوا

جداشدگی اتفاق نمی‌افتاد، بنابراین نموداری هم تشکیل نمی‌شود و در حقیقت فقط بخشی از آزمایش‌ها که هوا اجازه ورود داشت، دارای طول جداشدگی است و این حالت کاملاً شبیه نمودار تأثیر نوع کاویتاتور بر طول جداشدگی است (و با همان توضیحات).

• تأثیر متقابل هوا و دبی آب روی طول جداشدگی (شکل ۱۰):

چنانچه گفته شد طبق مشاهدات آزمایش‌ها (شکل‌های ۳ و ۴)، فقط در حالتی که هوا به سیستم وارد می‌شود جداشدگی رخ می‌دهد بنابراین تأثیر متقابل ورود هوا و افزایش دبی آب روی طول جداشدگی مشابه تأثیر افزایش دبی آب بر طول جداشدگی می‌باشد و با افزایش دبی طول جداشدگی نیز افزایش می‌یابد.

• تأثیر متقابل نوع کاویتاتور، اجازه ورود هوا و تغییرات دبی آب، روی طول جداشدگی (شکل ۱۱):

این نمودار بسیار گسترده است و با بررسی مقادیر طول جداشدگی می‌توان دریافت: در آزمایش‌ها با دبی آب

• تأثیر افزایش دبی آب بر میانگین طول جداشدگی (شکل ۸):

آزمایش‌ها با پنج دبی مختلف ۳۰، ۳۳/۳، ۳۵، ۳۶/۶ و ۴۰ لیتر در ثانیه برای هر کاویتاتور انجام شده است. طبق داده‌های برداشت شده از آزمایش‌ها، بدون استثناء برای کلیه کاویتاتورها؛ با افزایش دبی، طول جداشدگی به طور معنی‌داری افزایش یافته است. این نکته در شرایطی که می‌دانیم با افزایش دبی به تبع آن سرعت جریان هم افزایش خواهد داشت و احتمال وقوع کاویتاسیون بیشتر خواهد شد (شغاعی بچستان ۱۳۸۴)، بسیار مطلوب است؛ زیرا با افزایش دبی میزان جداشدگی افزایش یافته و فضای مناسب مکش هوا به درون جریان مناسب خواهد شد (محمودلی سامانی ۱۳۷۶).

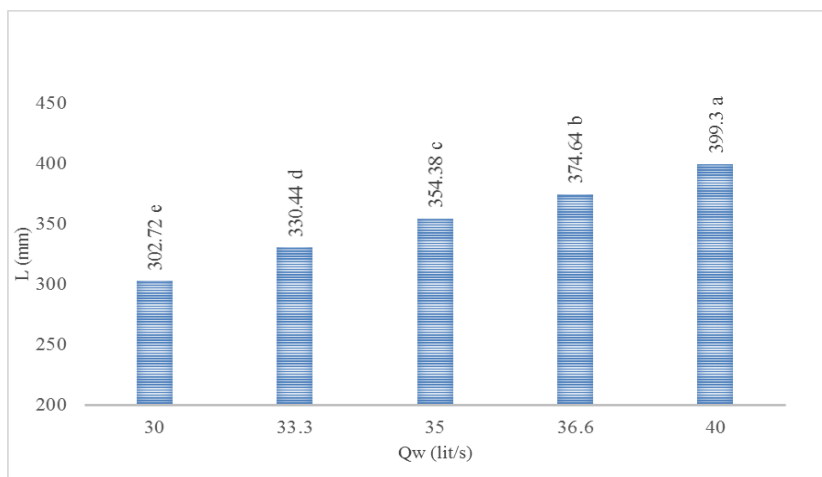
• تأثیر همزمان نوع کاویتاتور و ورود هوا بر طول جداشدگی (شکل ۹):

از آنجا که طبق نتایج مشاهده شده؛ در کلیه آزمایش‌های انجام شده بدون اجازه ورود هوا به جریان،

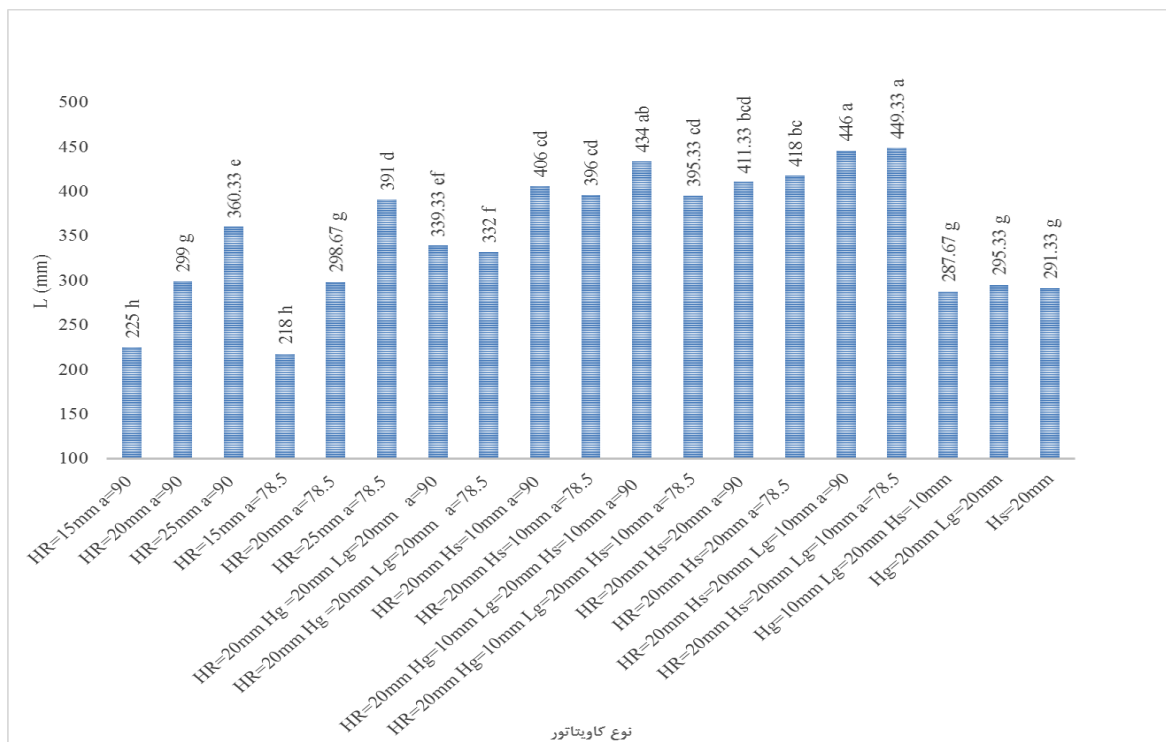


مرتبه سوم قرار دارد.
در آزمایش‌های با حداقل دبی ($Q_w = 30 \text{ lit/s}$),
کاویتاتور شماره ۱ (جدول ۱) که رمپ $HR=15\text{mm}$
 $\alpha=90^\circ$ می‌باشد، سپس کاویتاتور شماره ۱۸ (جدول ۱)
که رمپ $HR=15\text{mm}$ $\alpha=78.5^\circ$ و پس از آنها شکاف
تنها ($Hg=20\text{mm}$ $Lg=20\text{mm}$) کمترین طول
جداشدگی را ایجاد نموده‌اند.

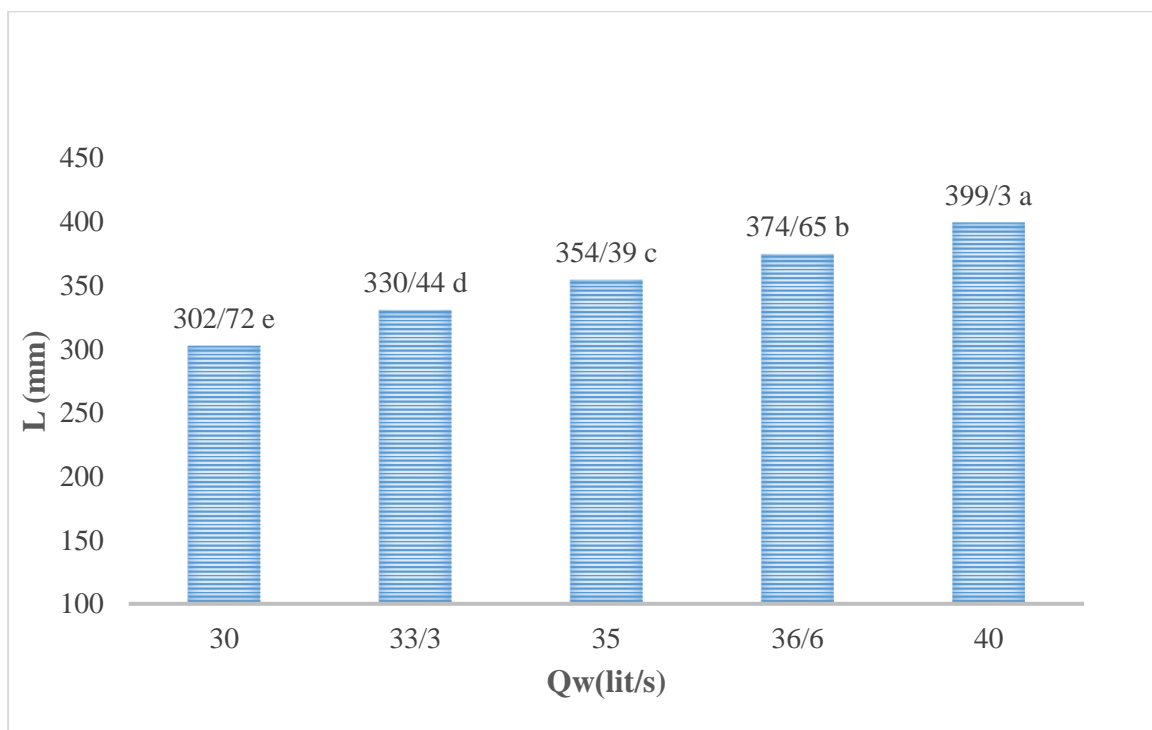
حداکثر ($Q_w = 40 \text{ lit/s}$), طولانی‌ترین جداشدگی
مربوط به کاویتاتور رمپ و پله و شکاف افقی بدون شیب
پایین دست یا قائم ($HR=20\text{mm}$ $Hs=20\text{mm}$)
 $\alpha=78.5^\circ$ همراه با اجازه ورود هوا و یا
همان کاویتاتور شماره ۱۷ (جدول ۱) بوده و کاویتاتور
شماره ۱۶ (جدول ۱) ($HR=20\text{mm}$ $Hs=20\text{mm}$)
 $\alpha=90^\circ$ در مرتبه دوم، و کاویتاتور ترکیب
رمپ و شکاف و پله با شیب پایین دست ($HR=20\text{mm}$)
 $\alpha=90^\circ$ ($Hg=10\text{mm}$ $Lg=20\text{mm}$ $Hs=10\text{mm}$) در



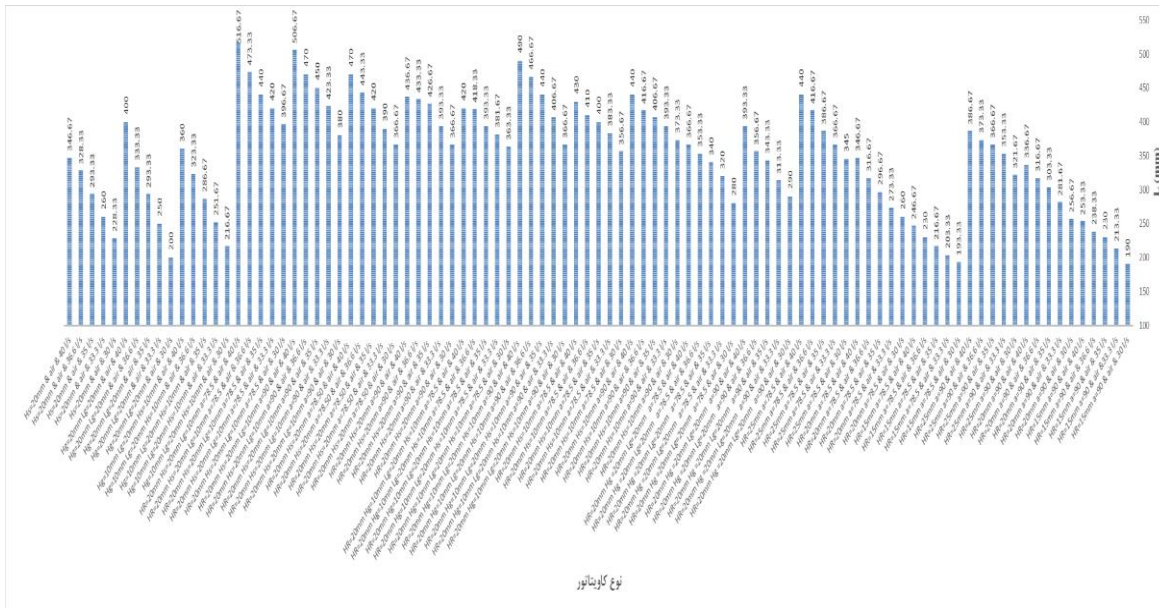
شکل (۸): تأثیر دبی بر طول جداشدگی Mean L



شکل (۹): تأثیر نوع کاویتاتور و ورود هوا روی طول جداشدگی Mean L



شکل (۱۰): تأثیر ترکیب هوا و دبی آب روی طول جداشدگی Mean L



شکل (۱۱) تأثیر ترکیب کایتاتور و دبی هوا و آب روی طول جداشدگی

رмп ۹۰ درجه ($H_R=20mm$ $H_g=10mm$) و بعد کایتاتور $(L_g=20mm$ $H_s=10mm$ $\alpha=90^\circ$) طبق مشاهدات ترکیب رмп و پله می‌باشد (جدول ۳). طبق مشاهدات آزمایش؛ پله، شکاف، رмп، ترکیب پله و شکاف $(H_R = 20mm)$ با هر دو زاویه رأس $\alpha = 90^\circ$ و $\alpha = 78.5^\circ$ تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند و حداقل طول جداشدگی را نیز ایجاد می‌نمایند (نمودار ۱-۲). انجام آزمایش به صورت فیزیکی به طور هم زمان مزیت درک پدیده و مشاهده مشکلات ناشی از آن را دارد؛ در کنار آن شبیه سازی عددی نیز به توسعه داده‌ها و مشاهده پدیده در محدوده‌هایی که امکان انجام آن در آزمایشگاه مقدور نیست کمک خواهد کرد.

قدردانی

نویسندگان از مسئولین آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز که با در اختیار قرار دادن تجهیزات و بخشی از فضای آزمایشگاه هیدرولیک، انجام آزمایش‌ها را ممکن ساختند تشکر و قدردانی می‌نمایند.

نتیجه‌گیری

انتخاب کایتاتور بهینه در سازه‌های هیدرولیکی که انتقال آب از آنها با سرعت‌های بالا و متفاوت رخ می‌دهد حایز اهمیت می‌باشد. طبق مشاهدات نوع کایتاتور روی طول جداشدگی تأثیر دارد، ارتفاع رмп و افزایش دبی جریان، تأثیر مثبت روی طول جداشدگی داشته و زاویه رأس رмп، ارتفاع پله، و عمق شکاف، تأثیر قابل ملاحظه‌ای روی طول جداشدگی نداشت. دو هواده ترکیبی پیشنهاد شد که در عمل نتایج بهتری را نسبت به هواده‌های مرسوم در سازه‌های هیدرولیکی، نشان دادند. در ۱۹ کایتاتور مورد آزمایش در حالت با هواده‌ی، بیشترین طول جداشدگی مربوط به دو حالت پیشنهادی: کایتاتور ترکیب رмп و پله و شکاف افقی بدون شیب پایین دست (جدول ۱. شماره ۱۷) $(H_R=20mm$ $H_s=20mm$ $L_g=10mm$) و کایتاتور ترکیب رмп و پله و شکاف افقی با شیب پایین دست (جدول ۱. شماره ۱۶) $(H_R=20mm$ $\alpha=78.5^\circ$) و کایتاتور ترکیب رмп و پله و شکاف افقی با شیب پایین دست (جدول ۱. شماره ۱۶) $(H_R=20mm$ $\alpha=90^\circ$) می‌باشد. بعد از آنها کایتاتور مرسوم ترکیب رмп و پله و شکاف با زاویه رأس



منابع

- اژدری مقدم، م.، حسنعلی پور شهرآبادی، ا. ۱۳۹۹ ارزیابی قابلیت اطمینان وقوع کاویتاسیون در سرریز تنداب با روشهای FORM و شبیه سازی مونت کارلو. مجله علوم و مهندسی آبیاری، جلد ۴۳، شماره ۳.
- جوادپور، م.، فراحت، س.، عجم، ح.، سالاری، م.، حسین نژاد دوین، ع. ۱۳۹۶. مطالعه عددی و تجربی اثرات تزریق بر جریان سوپر کاویتاسیون مصنوعی. مجله مدلسازی در مهندسی، سال پانزدهم، شماره ۵۱.
- شفاعی بجستان، م. ۱۳۸۴. مبانی و کاربرد مدل های فیزیکی - هیدرولیکی. چاپ اول. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، ۵۸۴ ص.
- فدائی کرمانی، ا.، بارانی، غ.، قائینی حصاروئی، م. ۱۳۹۶. کاربرد الگوریتم نزدیک ترین همسایگی در پیش بینی میزان آسیب پذیری سرریز سدها در اثر پدیده کاویتاسیون. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، سال هفتم، شماره بیست و هشتم.
- محمودلی سامانی، ح. ۱۳۷۶. طراحی سازه های هیدرولیکی. چاپ اول. شرکت مهندسی مشاور دزآب، ۴۲۵ ص.
- مهدهوی میمند، ا.، احدیان، ج.، احترام، م. ۱۳۹۳. تحلیل حساسیت عوامل مؤثر در هوادهی سرریز با استفاده از روش های هوشمند مصنوعی و ANFIS. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، سال پنجم، شماره هفدهم.
- Elbing, B. R., Daniel, R.L., Farsiani, Y. and Christopher E. P. 2018. Design and Validation of a Recirculating, High-Reynolds Number Water Tunnel. *Journal of Fluids Engineering, AUGUST (2018), Vol. 140/081102-3*
- Falvey, Henry T., "Cavitation in Chutes and Spillways", 1990, Engineering Monograph, No. 42, USBR, 64 p.
- Franc, J.P. and Michel, J.M. 2006. Fundamentals of cavitation. Vol. 76. Springer Science & Business Media.
- Frizell, K. W. 2012. Cavitation in Hydraulic Structures-Bridging the Gap between the Laboratory and the Real World. *Utah State University, International Junior Researcher and Engineer Workshop on Hydraulic Structures.*
- Karn, A., Roger, EA Arndt, and Hong, J. 2016. Gas entrainment behaviors in the formation and collapse of a ventilated super-cavity. *Experimental Thermal and Fluid Science* 79: 294-300.
- Karn, A., and Rosiejka, B. 2017. Air entrainment characteristics of artificial super-cavities for free and constrained closure models. *Experimental Thermal and Fluid Science* 81 : 364-369.
- Moghimi, M., Nouri, N. M. and Molavi, E. 2017. Experimental Investigation on Supercavitating Flow over Parabolic Cavitators. *Journal of Applied Fluid Mechanics, Vol. 10, No. 1 pp. 95-102.*
- RUAN, S.P., WU, J.H., WU, W.W. 2007. Hydraulic research of aerators on tunnel spillways. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B* 19.3. 330-334.
- Savchenko, Y. 2001. Supercavitation-problems and perspectives. <http://resolver.caltech.edu/cav2001:lecture.003>.
- Yang, J., Penghua T., and Chang, L. 2019. Air-vent layouts and water-air flow behaviors of a wide spillway aerator. *Theoretical & Applied Mechanics Letters* 9: 130-143