

Laboratory Investigation of Roughness Effect on the Cavitation Index in Ogee-Spillway

Aida Shabani Bahloli ¹, Hossein Khozaymehnezhad ^{2*}, Mohsen Pourreza Bilondi ², Yousef Ramezani ²

1- M.Sc. Graduate, Water Structures, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran.

2- Associate professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran.

* hkhazymeh@birjand.ac.ir

Received: 16 February 2021, Accepted: 1 May 2021  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Due to the height of the dams, water behind dams have a high energy and the amount of velocity on the spillway is high. Downstream of the spillway as a result of high energy and velocity of water on the spillway, is at the risk of cavitation and damage. The study of cavitation is crucial in this respect, and indicates the amount of flow degradation in the structure. A great number of research has been conducted on how to eliminate cavitation. Given the nature of cavitation, caused by high speed and pressure reduction, the use of roughness in parts of the spillway can help reduce or eliminate this phenomenon. The aim of this study was to investigate the effect of roughness under different conditions on changes in cavitation index in the downstream peak body.

Methodology: To achieve a better understanding of how the roughness works, this research was carried out by changing its arrangement, number and different heights on the cavitation index using a laboratory model. In order to achieve a more realistic simulation, a spillway was installed at a distance of 5.5 m from the beginning of the canal to ensure the turbulence of incoming current is minimized. Ogee spillway was considered in the study, designed and constructed according to USBR standards. Eight holes were installed on the spillway which were connected to 8 piezometers located in the channel body through flexible pipes to read the amount of pressure static. Effective parameters were identified with dimensional analysis, and three parameters (roughness arrangement, number of roughnesses, effective height of roughness) were tested. The roughness used in this research is made of PVC. After installing the spillway in the channel, the roughness was installed on the spillway. The piezometers were ventilated before each experiment and the channel slope was adjusted. Then, the pump was turned on, and after adjusting the flow rate, the test began. The depth gauge was calibrated for each aperture to measure and correct the height on the apertures. The equivalent pressure height inside the piezometer tubes was read and adjusted for the piezometer base and channel slope. Finally, according to the data, the roughness performance was evaluated using the cavitation index.

Results and Discussion: The experiments of the present study were performed with different Froude numbers and slopes. After the control experiments, the experiments were evaluated in three modes: the effect of arrangement, number and effective height.

- Evaluation of cavitation index changes in control experiments:

Observations show that cavitation index decreases as water falls on the spillway. The minimum cavitation index in the control experiment occurs at point 8. Moreover, the average cavitation index increases compared to the control mode by placing the roughness.

- Investigation of roughness arrangement on the cavitation index:

Observations show that the placement of roughness with convergent, divergent and row arrangement increase the cavitation index compared to the witness experiments. In the Froude number of 1.08, the changes in the cavitation index range from 1 to 8, 3.7, 4, 4.2, 4.4, 4, 3.7, 3.8 and 3.5%, respectively, compared to the case.

- The number of roughnesses on the cavitation index:

By placing 9, 12, 15 and 18 roughnesses in the row arrangement, the observations showed that in all graphs, the cavitation index increased compared to the witness experiment. Moreover, with the number of roughness, the cavitation index has a slight increasing trend. With 18 roughnesses in the flow rate of 1.08, the increase in the percentage of cavitation index (compared to the witness experiments) was piezometric points 1 to 8, 11.1, 4.03, 12.3, 17.6, 4.4, 4, 3.7 and 7.1.

- Investigation of effective roughness height on the cavitation index:

Considering the three effective heights of roughness, the observations showed that in all three cases, there is an increase in the cavitation index compared to the witness experiments, and the most evident change in the effective height has occurred at 0.017. With 1.08% increase in the flow rate of cavitation index compared to the control condition, 1 to 8, 7.5, 4, 12.7, 26.9, 4.1, 3.8, 7.3 and 6, respectively were obtained.

Conclusion: In general, it can be concluded that the installation of roughness on the spillway, the effective height of roughness, the number of roughnesses and its various arrangements, increase the cavitation index compared to the witness experiments. The presence of roughness reduces the flow velocity and increases the pressure on the spillway. This issue has a key role to play in eliminating or mitigating the cavitation phenomenon on the spillway. Compared to the witness experiments, the average cavitation index increased by 15.17% in the convergent arrangement, 11.8% in the divergent arrangement and 16.11% in the row arrangement. The results show that the greatest change in row arrangement and effective height occurs at 0.017 and $n = 18$.

Keywords: Cavitation index, Laboratory model, Ogee-Spillway, Roughness.



© 2021 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.
This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

بررسی آزمایشگاهی تأثیر زبری بر تغییرات شاخص کاویتاسیون در سرریز اوجی

آیدا شسانی بهلولی^۱، حسین خزیمه نژاد^{۲*}، محسن پوررضا بیلندی^۲، یوسف رمضانی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، سازه های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند.

۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند.

* hkhozeymeh@birjand.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۲۸، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۱۱، وبگاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: تنداب سرریز به دلیل انرژی بالا و سرعت زیاد آب روی آن در معرض خطر ناشی از پدیده کاویتاسیون قرار می گیرد. کارهای مختلفی در جهت شناخت و رفع پدیده کاویتاسیون انجام شده است، هدف از انجام این پژوهش، دستیابی به درکی بهتر از عملکرد زبری، با تغییر در آرایش زبری (ردیفی، واگرا و همگرا)، شمار زبری (۹، ۱۲، ۱۵ و ۱۸) و ارتفاع مؤثر زبری (۰/۰۰۸، ۰/۰۱۷ و ۰/۰۲۶) بر شاخص کاویتاسیون در بدنه پایین دست سرریز اوجی با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی است. نتایج نشان داد، نصب زبری روی سرریز، با آرایش ها، شمار و ارتفاع های مؤثر مختلف، باعث افزایش شاخص کاویتاسیون نسبت به حالت شاهد شده است. وجود زبری باعث کاهش سرعت جریان و افزایش فشار بر روی سرریز می شود. این مسئله در رفع یا تخفیف پدیده کاویتاسیون بر روی سرریز، نقش بسزایی دارد. نتایج نشان داد، میانگین شاخص کاویتاسیون در آرایش همگرا ۱۵/۱۷، در آرایش واگرا ۱۱/۸ و در آرایش ردیفی ۱۶/۱۱ درصد نسبت به حالت شاهد افزایش یافته است. همچنین نتایج نشان داد بیشترین تغییر در آرایش ردیفی و ارتفاع مؤثر ۰/۰۱۷ و شمار ۱۸ صفحه زبری نسبت به آزمایش های شاهد رخ داد.

کلید واژگان: سرریز اوجی، مدل آزمایشگاهی، شاخص کاویتاسیون، زبری.

۱- مقدمه

یکی از مسئله های مهمی که تاکنون پژوهش های زیادی در مورد آن صورت گرفته است، پدیده کاویتاسیون در پیرامون سازه های هیدرولیکی است که نتیجه مستقیم پایین بودن یا مساوی بودن فشار محیط از فشار بخار اشباع مایع است. هنگامی که چنین وضعی پیش بیاید، حباب ها و یا کیسه های بخار تشکیل می شوند. طبیعت نامتعادل این حباب ها به ارتعاش، ایجاد صدا، خوردگی و فرسایش قطعه های فلزی یا سطح های بتن منجر می شود. در هنگام طراحی سازه های هیدرولیکی با سرعت های بالا باید مطمئن شد که فشار هیچ قسمتی از سامانه پایین تر از فشار بخار آب نباشد. چون بذاته نظریه مطمئنی که نقطه های بحرانی فشار را تعیین کند وجود ندارد، انجام بررسی ها با استفاده از مدل الزام آور می شود. اغلب یک عامل به تنهایی برای ایجاد مسئله کاویتاسیون کافی نیست ولی ترکیبی از عامل های هندسی،

هیدرودینامیکی و عامل های وابسته دیگر ممکن است منجر به پدیده کاویتاسیون شود. از این رو تعیین دقیق معیاری برای تعیین احتمال رخداد کاویتاسیون مشکل است. تا مدت ها تنها معیار بنیادین در این زمینه، سرعت بحرانی بود. بعدها معیار دیگری به نام شاخص کاویتاسیون که یکی از معیار های مهم در این زمینه می باشد مورد توجه قرار گرفت. هنگامی که شاخص کاویتاسیون جریان، کمتر یا مساوی شاخص کاویتاسیون ناهمواری های سطح باشد، پدیده کاویتاسیون رخ می دهد (Babaian and Saremi, 2015).

کارهای مختلفی در جهت رفع این پدیده انجام شده است. با توجه به ماهیت کاویتاسیون که ناشی از سرعت زیاد و کاهش فشار است؛ استفاده از زبری در بخش های از سرریز می تواند به کاهش یا از بین بردن این پدیده کمک کرده و میزان شاخص کاویتاسیون کاهش یابد. امروزه مشخص شده است که وقوع

از کاهش بیش از حد فشار جلوگیری کرد. (2001) Savage and Johnson جریان بر روی سرریز اوجی استاندارد را با استفاده از حل عددی و فیزیکی اجرا و با هم مقایسه کردند. مدل‌های فیزیکی برای ده شرایط مختلف جریان اجرا شد و پیژومتر برای اندازه‌گیری فشار در نقطه‌های مختلف سرریز نصب شد. نتایج نشان داد که توافق قابل قبولی بین مدل فیزیکی و حل عددی وجود دارد و لذا در دسترس بودن و قدرت روش‌های عددی موجود، ابزار مطلوبی را می‌تواند در طراحی و تجزیه و تحلیل سرریزهای اوجی در اختیار مهندسان قرار دهد. (2003) Lahmi and mansouri با بررسی شبیه‌سازی پدیده کاویتاسیون بر روی سرریز اوجی با استفاده از مدل سه‌بعدی با توجه به داده‌های به دست آمده از مدل‌های شبیه‌سازی شده، به این نتیجه رسیدند که کمترین اندیس کاویتاسیون با معادله اوجی $y=0.0376x^{1.75}$ است. با توجه به نمایه کاویتاسیون بحرانی یعنی 0.25 احتمال رخداد کاویتاسیون بسیار کم می‌باشد.

(2013) Fadaei et al. برای بررسی کاویتاسیون در پژوهش موردی روی سد شهید عباسپور، با استفاده از دو فراسنجه عدد کاویتاسیون و سرعت جریان، میزان آسیب را در پنج سطح از بدون آسیب تا آسیب عمده دسته‌بندی نمودند. هر دو روش، آسیب شدید در پایین سرریز را نشان دادند. با این وجود، شاخص کاویتاسیون پیش‌بینی بهتری از سطح کاویتاسیون ارائه می‌دهد. (2019) Ghazi et al. با استفاده از Flow 3D سرریز سد شهید مدنی را شبیه‌سازی و با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه کردند. در این پژوهش، احتمال رخداد کاویتاسیون مورد بررسی قرار گرفت. فشار، سرعت و عمق جریان برای شرایط مختلف هیدرولیکی محاسبه گردید. نتایج گویای سازگاری مطلوب حل عددی و مدل آزمایشگاهی داشت و نشان داد که احتمال رخداد کاویتاسیون در این سرریز وجود ندارد.

(2020) Daneshfaraz et al. در یک پژوهش، تأثیر زبری بلوک‌های نصب‌شده بر روی سرریز اوجی را بر میزان هدررفت انرژی و طول جت مورد بررسی قرار دادند. آزمایشها و همچنین تحلیل عددی با استفاده از سرریز اوجی با نصب بلوک با جام‌های با زاویه برخاست 32° و 52° درجه و بدون جام انتهایی انجام شد. نتایج نشان داد که حل عددی به نسبت قابلیت شبیه‌سازی سطح جریان را بر روی سرریز دارد. همچنین نتایج نشان داد با استفاده

کاویتاسیون در منطقه‌هایی که سرعت سیال فرابحرانی است، رخ داده که باعث خرابی‌های بسیاری می‌شود (Forghani and Idi, 2003).

(2005) Zandi به بررسی پدیده کاویتاسیون در سرریزها پرداخت. نتایج نشان داد، در بیشتر سازه‌های هیدرولیکی سدهای بلند سرعت جریان بیش از حد زیاد است و در نتیجه وجود ناهمواری‌هایی حتی در حد چند میلی‌متر، می‌تواند جداسازی جریان را بوجود آورد و به دلیل زیاد بودن سرعت، منجر به کاهش فشار موضعی در منطقه جداسازی شود، این کاهش فشار تا حد فشار بخار آب می‌تواند ادامه یابد و پس از آن آب تبدیل به بخار می‌شود.

(2014) Foroudi et al. در پژوهشی به بررسی آزمایشگاهی تغییرپذیری‌های شاخص کاویتاسیون در سرریز اوجی با قوس در پلان و همگرایی دیواره‌های سرریز پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش دبی، میزان شاخص کاویتاسیون در تاج و شوت کاهش و در پنجه افزایش می‌یابد. همچنین با بررسی نتایج آزمایشگاهی و کمترین شاخص کاویتاسیون به میزان $1/95$ ، احتمال وجود خطر کاویتاسیون در این سرریز منتفی شد.

(2016) Navaei et al. در یک پژوهش آزمایشگاهی تأثیر باکت پرتابی در انتهای سرریز اوجی را بر میزان استهلاك انرژی و طول پرتابه بررسی کردند. آزمایش‌ها بر روی سرریز اوجی استاندارد برای جام‌هایی با زاویه برخاست 32° و 52° درجه و بدون جام انجام شد. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان داد در سرریز با جام‌های پرتابی با زاویه برخاست 32° و 52° درجه نسبت به سرریز بدون جام، میزان استهلاك انرژی از 10% تا 20% درصد افزایش یافت.

(2017) Jafari et al. در پژوهشی به بررسی آزمایشگاهی روند تغییرپذیری‌های فشار ایستایی بر روی تاج و تندآب سرریز اوجی در شرایط مختلف هیدرولیکی پرداختند. با مقایسه توزیع فشار در دبی‌ها و شیب‌های مختلف، مشخص شد از سمت تاج به سمت پایین‌دست سرریز، فشار ایستایی کاهش یافته و سرعت جریان افزایش می‌یابد و در نتیجه احتمال رخداد کاویتاسیون افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که در شرایط اعمال دبی بیشینه عبوری از روی سرریز احتمال رخداد خلاءزایی افزایش می‌یابد و باید با کنترل دبی عبوری در یک حد مشخص

تحلیل ابعادی: به طور کلی متغیرهای مؤثر در رابطه با بحث تأثیر زبری بر تغییرپذیری‌های شاخص کاویتاسیون در سرریز اوجی در رابطه ۲ نشان داده شده‌اند و عبارت‌اند از:

$$f1(V, y, \sigma, \rho, \mu, B, S, H, W, Lr, Br, hr, N, A, Sr, g) = 0 \quad (2)$$

که در آن سرعت جریان روی تاج سرریز (V)، عمق جریان روی تاج سرریز (y)، شاخص کاویتاسیون (σ)، جرم واحد حجم سیال (ρ)، ضریب لزجت دینامیکی سیال (μ)، عرض کانال (B)، شیب کانال (S)، ارتفاع تاج سرریز (H)، عرض سرریز (W)، طول زبری (Lr)، عرض زبری (Br)، ارتفاع زبری (hr)، شمار زبری (N)، آرایش زبری (A)، شکل زبری (Sr) و شتاب ثقل (g) است. با تحلیل ابعادی و استفاده از نظریه باکینگهام، و در نظر گرفتن سه متغیر ρ ، V و y و در ادامه ترکیب برخی از فراسنجه‌های بی‌بعد، رابطه ۳ استخراج می‌شود.

$$f3(\sigma, Re, \frac{B}{y}, S, \frac{H}{y}, \frac{W}{B}, \frac{Lr}{H}, \frac{Br}{W}, \bar{h}, N, A, Sr, Fr) = 0 \quad (3)$$

که در رابطه بالا Re ، عدد رینولدز می‌باشد که به دلیل میزان‌های بالا و وجود جریان متلاطم از تأثیر آن چشم پوشی شد. از میان فراسنجه‌های موجود در رابطه ۳، پارامترهای $\bar{h}$ ، N ، A ، Fr و S متغیر در نظر گرفته شده‌اند. $\bar{h}$ نسبت ارتفاع زبری به ارتفاع تاج سرریز می‌باشد که ارتفاع مؤثر زبری نامیده می‌شود. N شمار زبری و A آرایش زبری می‌باشد. در جدول ۱ فراسنجه‌های بی‌بعدی که در این پژوهش بررسی شدند به همراه دامنه تغییر آن‌ها ارائه شده است. از بررسی دیگر فراسنجه‌های موجود در رابطه ۳ به دلیل محدودیت‌های آزمایشگاهی صرف‌نظر شد.

۳- مدل فیزیکی

آزمایش‌های این پژوهش در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه

از زبری برای حالت بدون جام در مقایسه با حالت بدون زبری هدررفت انرژی به اندازه ۱۵/۴ درصد افزایش یافت. هدف این پژوهش، بررسی تأثیر زبری و شرایط مختلف آن بر تغییرپذیری‌های شاخص کاویتاسیون در بدنه پایین دست سرریز اوجی است. این پژوهش به منظور دستیابی به یک درک بهتر از عملکرد زبری، آرایش زبری‌ها، شمار زبری‌ها و ارتفاع زبری‌ها بر شاخص کاویتاسیون انجام شده است. مرور منابع نشان می‌دهد تاکنون تأثیر زبری و شرایط مرتبط با آن در بدنه سرریز اوجی بر تغییرپذیری‌های شاخص کاویتاسیون بررسی نشده است؛ لذا در این پژوهش به بررسی تأثیر زبری بر عامل‌های مؤثر در ایجاد کاویتاسیون سرریز اوجی پرداخته خواهد شد.

۲- مواد و روش‌ها

در شاخص کاویتاسیون طبق رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

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

که در آن P : فشار مطلق در نقطه مورد نظر بر حسب پاسکال، P_v : فشار بخار آب بر حسب پاسکال، ρ : چگالی سیال بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب و V : سرعت جریان بر حسب متر بر ثانیه است.

بر مبنای رابطه (۱)، اگر نمایه کاویتاسیون بیشتر از ۰/۲ باشد پدیده کاویتاسیون به وجود نیامده و در نقطه‌هایی که این نمایه کمتر از ۰/۲ باشد احتمال رخداد پدیده کاویتاسیون زیاد است. اگر نمایه کاویتاسیون بین ۰/۲ و ۰/۱ باشد وجود سامانه هواده برای جلوگیری از آسیب‌های احتمالی کاویتاسیون ضروری به نظر می‌رسد و اگر کمتر از ۰/۱ باشد سرریز دوباره باید طراحی شود (Babaian and Saremi, 2015).

جدول ۱ پارامترهای بی‌بعد به همراه دامنه‌ی تغییر آن‌ها در این پژوهش

Table 1 Dimensional parameters with their amplitude of change in the present study		
Range of change	Parameter	No.
0.026 , 0.017 , 0.008	$\bar{h}$	1
3 arrangement	A	2
18, 15, 12, 9	N	3
1.08 , 0.98	Fr	4
0.02 , 0.002 , 0.0001	S	5

آنها استفاده شد. برای اطمینان از حذف یا کم‌شدن تلاطم جریان ورودی، سرریز در فاصله ۵/۵ متر از ابتدای کانال نصب شد. در شکل ۱ نمای کلی ساده‌ای از کانال آزمایشگاهی و سرریز اوجی نشان داده شده است. در شکل ۲ نمایی از موقعیت پیزومترها و در شکل ۳ سامانه اندازه‌گیری جریان نشان داده شده است.

زبری مورد استفاده در این پژوهش از جنس پی‌وی‌سی (PVC) و با ضخامت‌های ۴، ۶ و ۸ میلی‌متر می‌باشند (شکل ۴). ارتفاع زبری به ترتیب ضخامت‌های ذکر شده برابر با ۴، ۶ و ۸ میلی‌متر (فاصله از کف صفحه زبری تا پاشنه زبری برای همه ضخامت‌ها ۲ میلی‌متر می‌باشد). ابعاد صفحه زبری در طول و عرض مورد استفاده ۲/۵ در ۲/۵ سانتی‌متر می‌باشد. آزمایش‌ها، در شرایط جریان یکنواخت و با داده‌های فرود معین

بیرجند در کانال آزمایشگاهی افقی با سطح مقطع مستطیلی شیب‌پذیر و دارای طول ۱۰ متر، عرض ۰/۳ متر و ارتفاع ۰/۵ متر انجام شد. دیواره کانال از جنس پلکسی‌گلاس با ضخامت ۱۰ میلی‌متر می‌باشد. آب مورد نیاز توسط پمپ با بیشینه دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه به درون کانال آزمایشگاهی منتقل می‌شود. به منظور اندازه‌گیری دبی جریان از دبی‌سنج الکترومغناطیسی استفاده شده است که جریان را با دقت ۰/۰۱ لیتر بر ثانیه اندازه‌گیری می‌کند. سرریز مورد بررسی در این پژوهش از نوع سرریز اوجی و از جنس پلاستیک فشرده می‌باشد. ارتفاع سرریز ۰/۲۳ متر است که طراحی و ساخت آن توجه به استانداردهای USBR می‌باشد، بر روی سرریز ۸ پیزومتر نصب شده است. میزان فشار ایستایی از طریق این پیزومترها خوانش می‌شود و برای تشخیص ارتفاع معادل فشار درون پیزومتر از ماده رنگی در

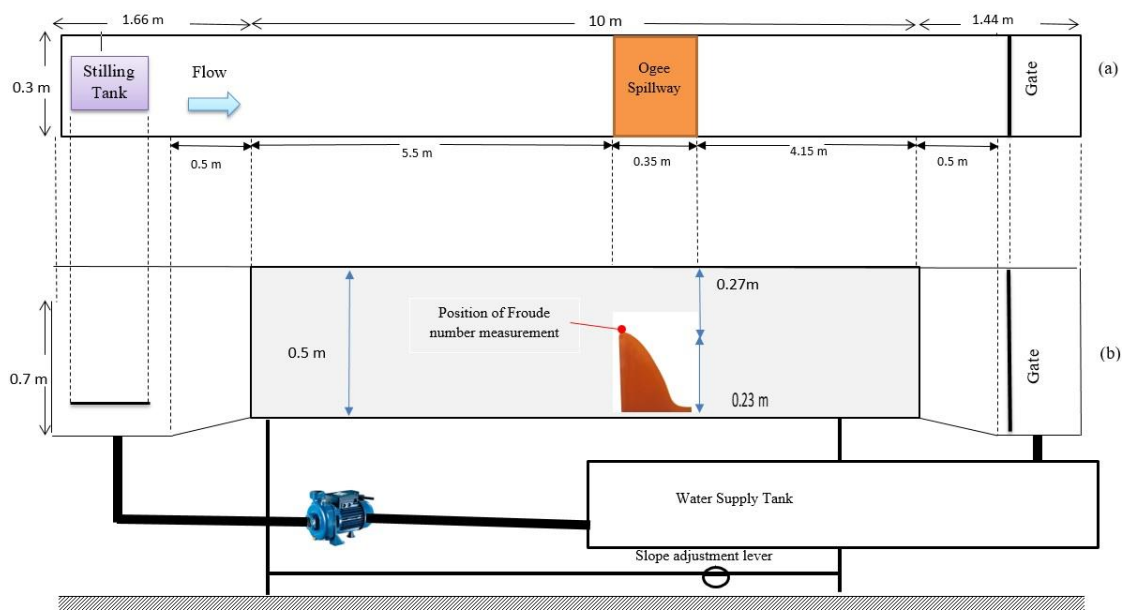


Fig. 1 A simple schematic of the laboratory channel and the peak overflow (a) up view, (b) longitudinal profile
 شکل ۱ نمای کلی ساده‌ای از کانال آزمایشگاهی و سرریز اوجی (a) نمای از بالا، (b) رخ‌نمای طولی.

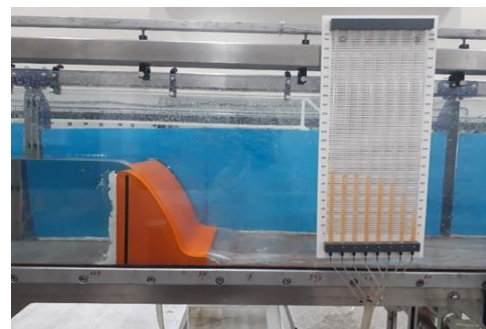
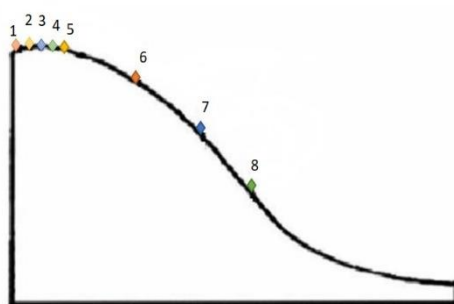


Fig. 2 View the position of the piezometers
 شکل ۲ نمایی از موقعیت نصب پیزومترها

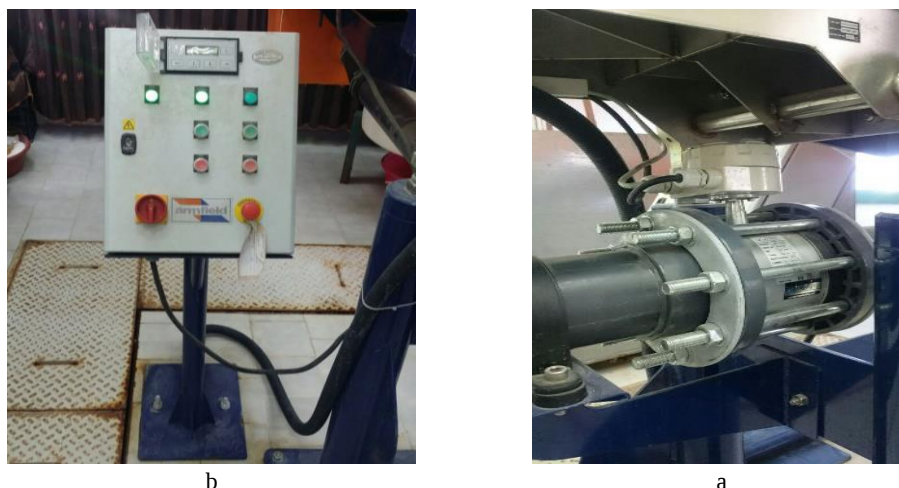


Fig. 3 Flow measurement system (a) Electromagnetic flowmeter, (b) display board
 شکل ۳ سامانه اندازه‌گیری جریان (a) صفحه نمایش گر، (b) دبی‌سنج الکترومغناطیس

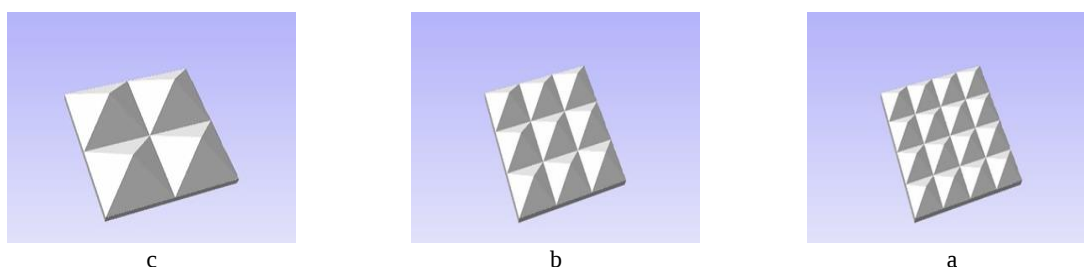


Fig. 4 Roughness plate with height (a) 2, (b) 4, (c) 6 mm
 شکل ۴ صفحه زبری با ارتفاع (a) ۲ میلی‌متر، (b) ۴ میلی‌متر، (c) ۶ میلی‌متر

انجام شد که در طول انجام یک آزمایش، این عدد ثابت بود با توجه به اینکه برای محاسبه شاخص کاویتاسیون در یک مقطع، نیاز به سرعت میانگین در آن مقطع می‌باشد، لذا با استفاده از عمق‌سنج، ارتفاع آب روی پیزومتر خوانش و پس از تصحیح لازم، عمق میانگین جریان در مقطع‌های مورد نظر و با استفاده از رابطه پیوستگی سرعت میانگین در هر مقطع محاسبه شد. آزمایش‌ها در چهار مرحله انجام شد. در آغاز، آزمایش‌های شاهد بدون وجود زبری بر روی سرریز اوجی با عددی فرود

انجام شد که در طول انجام یک آزمایش، این عدد ثابت بود با توجه به اینکه برای محاسبه شاخص کاویتاسیون در یک مقطع، نیاز به سرعت میانگین در آن مقطع می‌باشد، لذا با استفاده از عمق‌سنج، ارتفاع آب روی پیزومتر خوانش و پس از تصحیح لازم، عمق میانگین جریان در مقطع‌های مورد نظر و با استفاده از رابطه پیوستگی سرعت میانگین در هر مقطع محاسبه شد. آزمایش‌ها در چهار مرحله انجام شد. در آغاز، آزمایش‌های شاهد بدون وجود زبری بر روی سرریز اوجی با عددی فرود

۳-۱- بررسی تأثیر تغییر پذیری‌های آرایش زبری‌ها بر شاخص کاویتاسیون

در این مرحله تأثیر نصب ۱۵ عدد صفحه زبری با h برابر ۰/۰۲۶ در سه آرایش ردیفی، واگرا و همگرا تحت دو عدد فرود ۰/۹۸ و ۱/۰۸ و شیب ۰/۰۲ بستر کانال بررسی شد (شکل ۵).

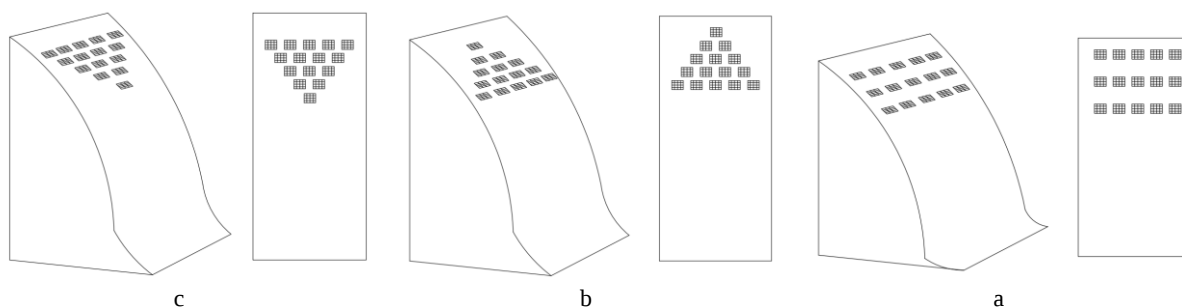


Fig. 5 Arrangement of roughness (a) row, (b) divergent, (c) convergent
 شکل ۵ آرایش زبری‌ها، (a) ردیفی، (b) واگرا، (c) همگرا

۳-۲- بررسی تأثیر تغییرپذیری‌های شمار زبری‌ها بر

شاخص کاویتاسیون

در این مرحله تأثیر شمار زبری‌های مورد استفاده در آرایش ردیفی با شمار ۹، ۱۲، ۱۵ و ۱۸ زبری با $\bar{h}$ برابر ۰/۰۲۶ تحت دو عدد فرود ۰/۹۸ و ۱/۰۸ و شیب ۰/۰۰۲ بستر کانال بررسی شد (شکل ۶).

۳-۳- بررسی تأثیر تغییرپذیری‌های ارتفاع مؤثر

زبری بر شاخص کاویتاسیون

در این مرحله تأثیر نصب ۱۵ عدد زبری با سه $\bar{h}$ برابر ۰/۰۰۸، ۰/۰۱۷ و ۰/۰۲۶ با آرایش ردیفی تحت دو عدد فرود ۰/۹۸ و ۱/۰۸ و شیب ۰/۰۰۲ بستر کانال بررسی شد.

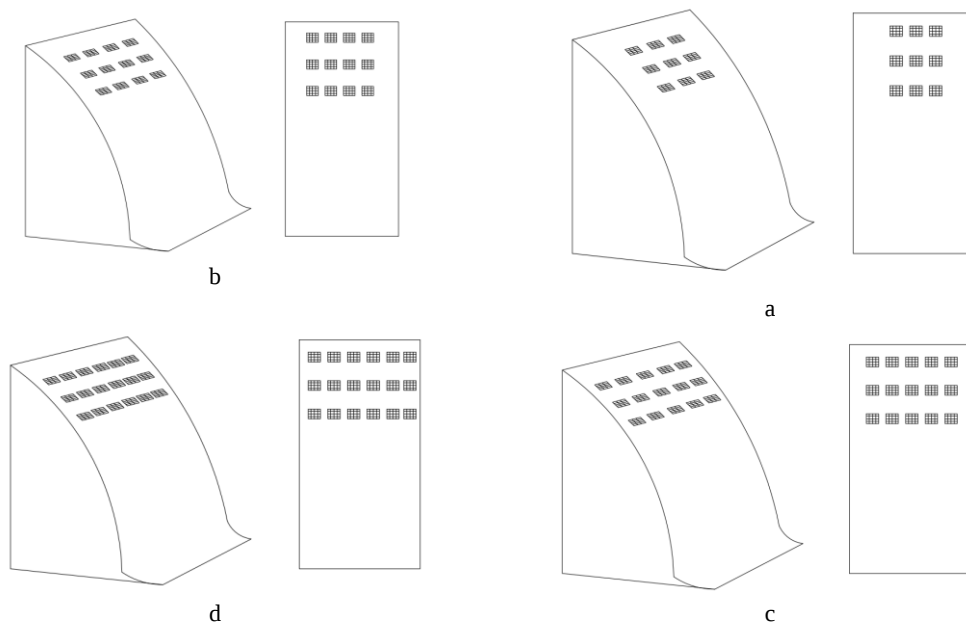


Fig. 6 Number of roughness (a) 9, (b) 12, (c) 15, (d) 18

شکل ۶ شمار زبری‌ها (a) ۹، (b) ۱۲، (c) ۱۵، (d) ۱۸

جدول ۲ جمع‌بندی مرحله‌های آزمایش

Table 2 summary of test steps

Range of parameters examined				NO.
N	$\bar{h}$	S	A	
-	-	0.02 , 0.002 , 0.0001	-	1
15	0.026	0.002	Row, divergent, convergent	2
18, 15, 12, 9	0.026	0.002	Row	3
15	0.026 , 0.017 , 0.008	0.002	Row	4

کاویتاسیون از پی‌زومتر ۱ تا ۸ برای هر سه شیب ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۲ و ۰/۰۰۲ تا اندازه‌ای قابل ملاحظه است.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- مرحله نخست، بررسی تغییرپذیری‌های

شاخص کاویتاسیون در آزمایش‌های شاهد

شکل ۷ نمودار تغییرپذیری‌های شاخص کاویتاسیون در حالت شاهد و سه شیب ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۲ و ۰/۰۰۲ را نشان می‌دهد. شکل ۷ نشان می‌دهد که افزایش عدد فرود باعث کاهش شاخص کاویتاسیون می‌گردد. همچنین روند کاهشی شاخص

۴-۲- مرحله دوم، بررسی تأثیر تغییرپذیری‌های

آرایش زبری‌ها بر شاخص کاویتاسیون

شکل ۸ نمودار تغییرپذیری‌های شاخص کاویتاسیون در آرایش همگرا و عددهای فرود ۰/۹۸ و ۱/۰۸ نسبت به حالت شاهد را

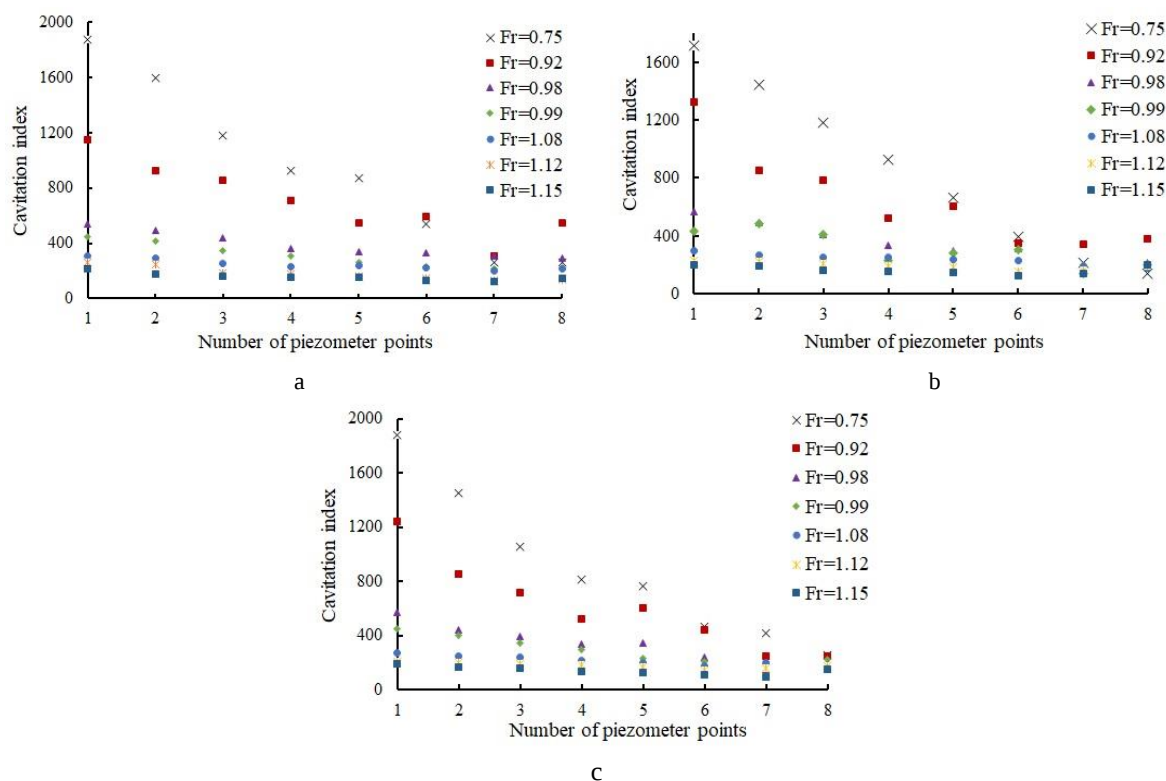


Fig. 7 Cavitation index changes in different piezometers in the control experiment under slope (a) 0.0001, (b) 0.002, (c) 0.02
 شکل ۷ تغییرپذیری‌های شاخص کاویتاسیون در پیزومترهای مختلف در آزمایش شاهد تحت شیب (a) ۰/۰۰۰۱، (b) ۰/۰۰۰۲، (c) ۰/۰۲

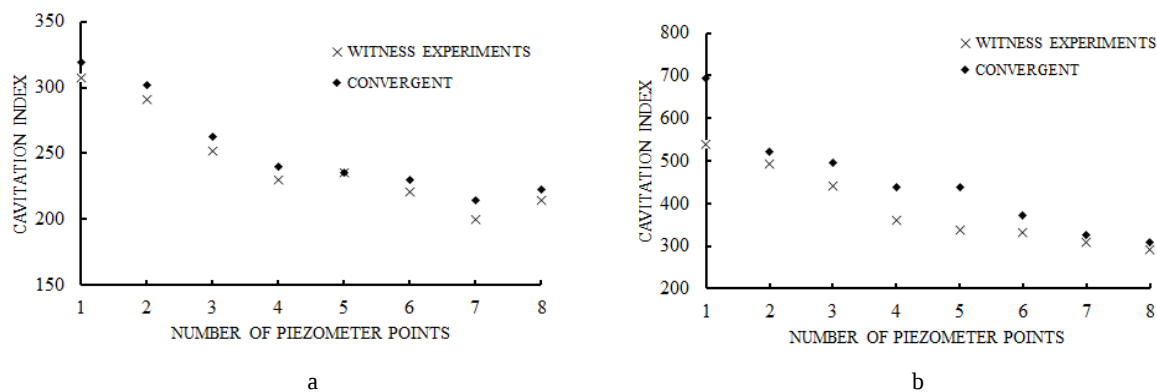


Fig. 8 Graph of cavitation index changes in convergent arrangement in froude number (a) 0.98, (b) 1.08
 شکل ۸ نمودار تغییرپذیری‌های شاخص کاویتاسیون در آرایش همگرا تحت عدد فرود (a) ۰/۹۸، (b) ۱/۰۸

دست آمده است. تغییرپذیری‌های شاخص کاویتاسیون در شکل ۸ (b) به ترتیب در پیزومترهای ۱ تا ۸، برابر ۵/۴، ۴/۲، ۳/۹، ۳/۸، ۲/۷، ۰/۴ درصد اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان می‌دهد افزایش شاخص نسبت به شاهد در نمودار با عدد فرود ۰/۹۸، بیشتر از نمودار با عدد فرود ۱/۰۸ است. شکل ۹ نمودار تغییرپذیری‌های شاخص کاویتاسیون در آرایش واگرا و عددهای فرود ۰/۹۸ و ۱/۰۸ نسبت به حالت شاهد را نشان می‌دهند. ارتفاع مؤثر زبری هر دو آزمایش ۰/۰۲۶ است.

نشان می‌دهد. ارتفاع مؤثر زبری هر دو آزمایش ۰/۰۲۶ است. با توجه به شکل ۸ (a) با پایین آمدن آب روی سرریز، شاخص کاویتاسیون کاهش می‌یابد. به طوری که کمینه شاخص کاویتاسیون در آزمایش شاهد در نقطه ۸ رخ می‌دهد. قرار دادن زبری با آرایش همگرا باعث افزایش شاخص کاویتاسیون نسبت به حالت شاهد شده است. میزان شاخص کاویتاسیون در آرایش همگرا نسبت به حالت شاهد به ترتیب در پیزومترهای ۱ تا ۸ برابر ۲۹، ۲۸/۹، ۲۱/۲، ۱۲/۶، ۱۲/۵، ۶، ۵/۹ و ۵/۳ درصد به

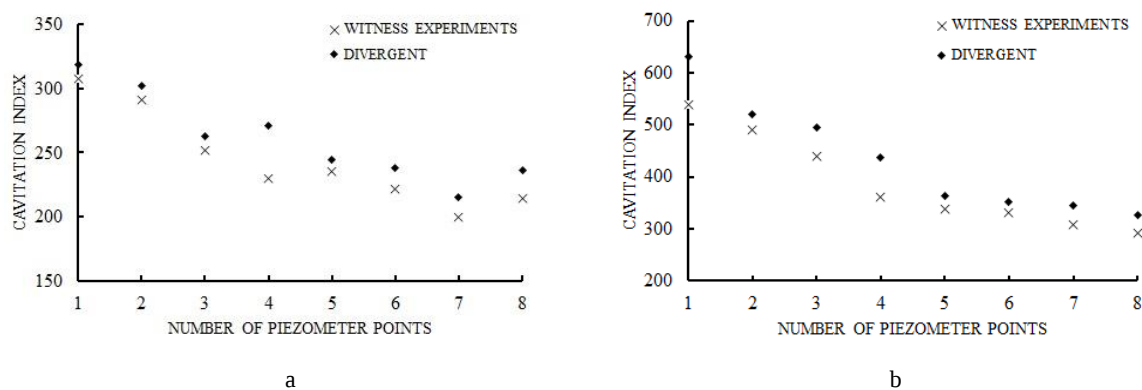


Fig. 9 Graph of cavitation index changes in divergent arrangement in froude number a) 0.98 b) 1.08

شکل ۹ نمودار تغییرپذیری‌های شاخص کاویتاسیون در آرایش واگرا تحت عدد فرود (a) ۰/۹۸ (b) ۱/۰۸

۸، برابر ۱۷/۷، ۱۰/۵، ۷/۷، ۷/۴، ۴/۲، ۴، ۳/۷، ۲/۳ درصد اندازه‌گیری شده است.

شکل ۱۰ نمودار تغییرپذیری‌های شاخص کاویتاسیون در آرایش ردیفی و عددهای فرود ۰/۹۸ و ۱/۰۸ نسبت به حالت شاهد را نشان می‌دهند. ارتفاع مؤثر زبری هر دو آزمایش ۰/۰۲۶ است.

با توجه به شکل ۹(a)، قرار دادن زبری با آرایش واگرا، باعث افزایش شاخص کاویتاسیون نسبت به حالت شاهد شده است. تغییرپذیری‌های شاخص کاویتاسیون در آرایش واگرا نسبت به حالت شاهد به‌ترتیب در پی‌زومترهای ۱ تا ۸، برابر ۲۱/۲، ۱۷، ۱۲/۶، ۱۲/۳، ۱۱/۸، ۷/۳، ۶/۲ و ۶ به دست آمد. در شکل ۹(b) تغییرپذیری‌های شاخص کاویتاسیون به‌ترتیب پی‌زومترهای ۱ تا

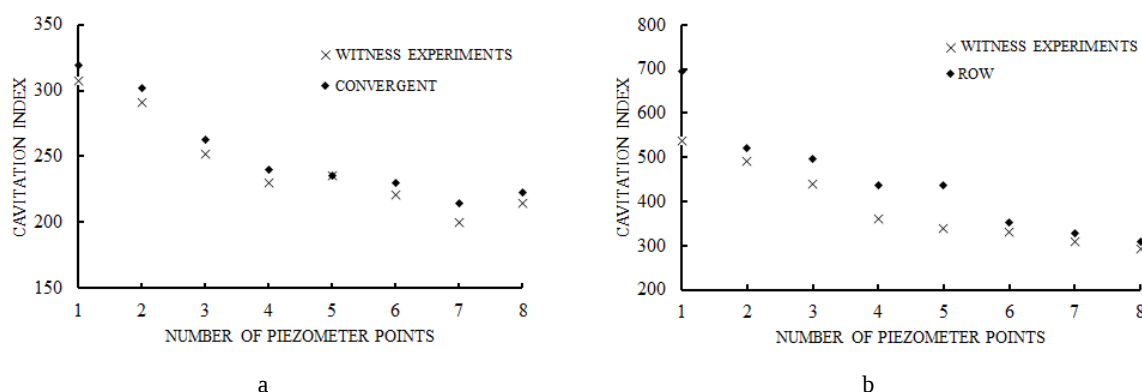


Fig. 10 Graph of cavitation index changes in row arrangement in froude number (a) 0.98, (b) 1.08

شکل ۱۰ نمودار تغییرپذیری‌های شاخص کاویتاسیون در آرایش ردیفی تحت عدد فرود (a) ۰/۹۸ (b) ۱/۰۸

۳-۴- مرحله سوم، بررسی تأثیر تغییرپذیری‌های شمار زبری‌ها بر شاخص کاویتاسیون

با قرار دادن شمار ۹، ۱۲، ۱۵ و ۱۸ زبری، تأثیر تغییرپذیری‌های شمار زبری‌ها بر شاخص کاویتاسیون در دو عدد فرود ۰/۹۸ و ۱/۰۸ تحلیل و بررسی شد که در شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ قابل مشاهده است.

با توجه به شکل ۱۱، با نصب ۹ عدد زبری، میانگین شاخص کاویتاسیون نسبت به حالت شاهد، در اعداد فرود ۰/۹۸ و ۱/۰۸ به ترتیب ۹/۳۶ و ۴/۸۳ درصد افزایش یافته است. شکل ۱۲

در شکل ۱۰ با قرار دادن زبری‌ها در حالت ردیفی، نتایج نشان می‌دهد در عدد فرود ۰/۹۸، شاخص کاویتاسیون افزایش می‌یابد. تغییرپذیری‌های آن نسبت به حالت شاهد به‌ترتیب در پی‌زومترهای ۱ تا ۸، برابر ۲۹، ۲۸/۹، ۲۱/۲، ۱۲/۶، ۶/۲، ۶/۱، ۶ و ۵/۹ درصد اندازه‌گیری شد. همان‌طور در عدد فرود ۱/۰۸ تغییرپذیری‌های شاخص کاویتاسیون به‌ترتیب نقطه‌های ۱ تا ۸، ۵/۴، ۴/۸، ۴/۲، ۴، ۳/۸، ۳/۷، ۳/۵ و ۲/۳ درصد نسبت به حالت شاهد آن افزایش پیدا کرده است.

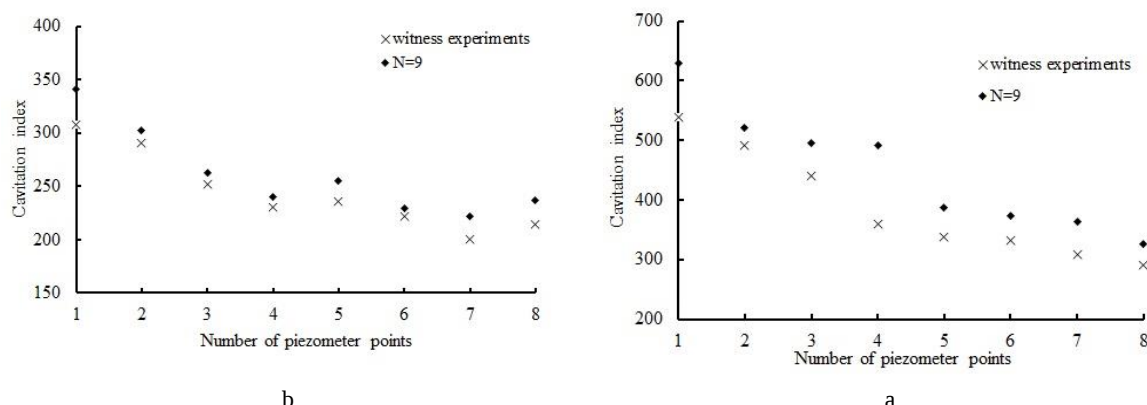


Fig. 11 Cavitation index changes in row arrangement in the installation mode of 9 roughness plates in Froude number (a) 0.98, (b) 1.08
 شکل ۱۱ تغییرپذیری‌های شاخص کاویتاسیون در آرایش ردیفی در حالت نصب ۹ صفحه زبری تحت عدد فرود (a) ۰/۹۸، (b) ۱/۰۸

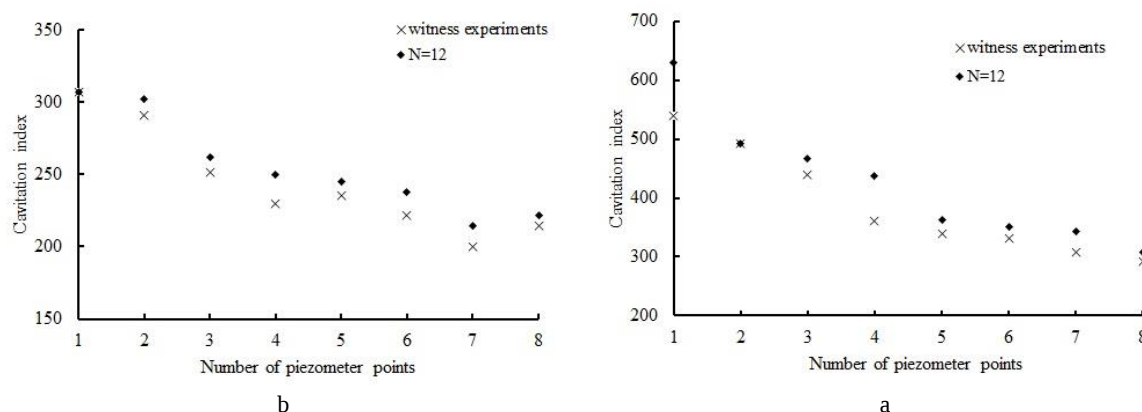


Fig. 12 Cavitation index changes in row arrangement in the installation mode of 12 roughness plates in Froude number (a) 0.98, (b) 1.08
 شکل ۱۲ تغییرپذیری‌های شاخص کاویتاسیون در آرایش ردیفی در حالت نصب ۱۲ صفحه زبری تحت عدد فرود (a) ۰/۹۸، (b) ۱/۰۸

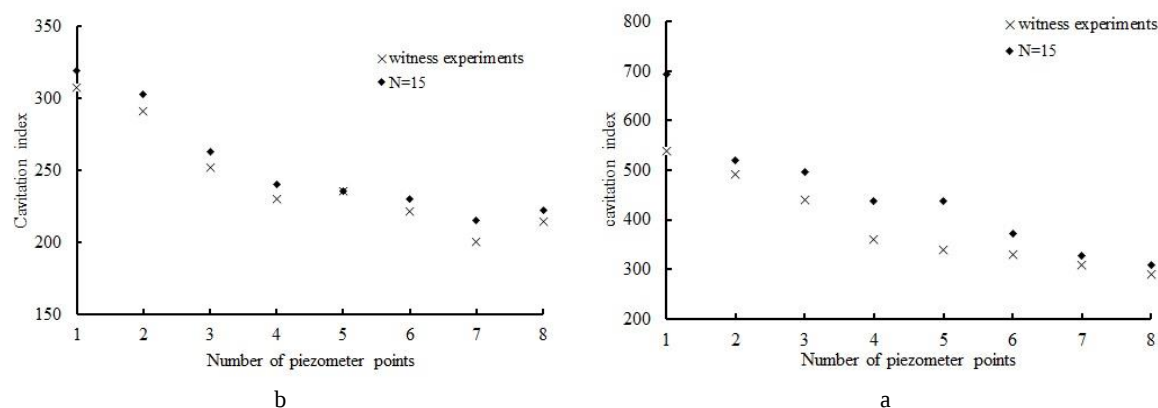


Fig. 13 Cavitation index changes in row arrangement in the installation mode of 15 roughness plates in Froude number (a) 0.98, (b) 1.08
 شکل ۱۳ تغییرپذیری‌های شاخص کاویتاسیون در آرایش ردیفی در حالت نصب ۱۵ صفحه زبری تحت عدد فرود (a) ۰/۹۸، (b) ۱/۰۸

یافته است. با توجه به شکل ۱۴، با نصب ۱۸ عدد زبری، میانگین شاخص کاویتاسیون نسبت به حالت شاهد، ۱۶/۱۴ و ۸/۰۲ درصد افزایش یافته است. نتایج نشان داد در تمامی نمودارها شاخص کاویتاسیون نسبت به حالت شاهد افزایش داشته است. لازم به ذکر است با افزایش

نشان می‌دهد با نصب ۱۲ عدد زبری، میانگین شاخص کاویتاسیون نسبت به حالت شاهد، در اعداد فرود ۰/۹۸ و ۱/۰۸ به ترتیب ۱۰/۸۶ و ۴/۹۱ درصد افزایش یافته است. شکل ۱۳ نشان می‌دهد با نصب ۱۵ عدد زبری، میانگین شاخص کاویتاسیون نسبت به حالت شاهد، ۱۶/۰۵ و ۱۷ درصد افزایش

شمار زبری، شاخص کاویتاسیون تا حدودی روند افزایشی داشته است.

۴-۴- مرحله‌ی چهارم، بررسی تأثیر تغییرپذیری‌های ارتفاع مؤثر زبری بر شاخص کاویتاسیون

در این مرحله تأثیر تغییرپذیری‌های ارتفاع مؤثر زبری بر شاخص کاویتاسیون بررسی شد. شکل ۱۵ نمودار تغییرپذیری‌های شاخص کاویتاسیون در عددهای فرود ۰/۹۸ و ۱/۰۸ و زبری با ارتفاع مؤثر ۰/۰۰۸ نسبت به حالت شاهد را نشان می‌دهد.

در شکل ۱۵ (a) شاخص کاویتاسیون نسبت به حالت شاهد به‌ترتیب نقطه‌های پیزومتری از ۱ تا ۸، برابر ۲۸/۹، ۳۶/۴، ۲۱/۸، ۱۹/۲، ۱۱/۹، ۶/۲، ۲/۳۵ درصد افزایش یافته است. در شکل ۱۵ (b) تغییرپذیری‌های افزایشی شاخص کاویتاسیون نسبت به حالت شاهد در نقطه‌های پیزومتری یاد

شده به‌ترتیب برابر ۱۳، ۸/۳، ۷/۴، ۵/۸، ۴، ۳/۹، ۳/۸ و ۳/۷ درصد اندازه‌گیری شد.

شکل ۱۶ نمودار تغییرپذیری‌های شاخص کاویتاسیون در عددهای فرود ۰/۹۸ و ۱/۰۸ و زبری با ارتفاع مؤثر ۰/۰۱۷ نسبت به حالت شاهد را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل‌های ۱۶ (a) و ۱۶ (b) تغییر در ارتفاع مؤثر زبری با افزایش شاخص کاویتاسیون نسبت به حالت شاهد همراه است. به طوری که در شکل ۱۶ (a) تغییرپذیری‌های شاخص کاویتاسیون نسبت به حالت شاهد در نقطه‌های پیزومتری ۱ تا ۸ به‌ترتیب برابر ۳۶/۶، ۲۹/۳، ۲۹، ۲۳/۸، ۱۹/۵، ۱۸/۳ و ۱۲ درصد افزایش یافته است. همچنین در شکل ۱۶ (b) درصد افزایشی شاخص کاویتاسیون نسبت به حالت شاهد برای نقطه‌های پیزومتری یاد شده به‌ترتیب برابر ۲۶/۹، ۱۲/۷، ۱۰/۶، ۷/۵، ۷/۳، ۴/۱، ۴ و ۳/۸ اندازه‌گیری شد.

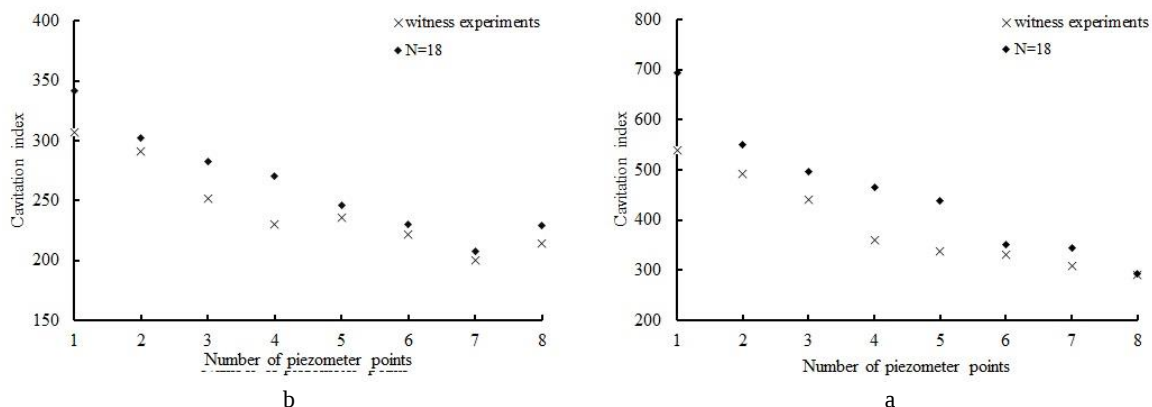


Fig. 14 Cavitation index changes in row arrangement in the installation mode of 18 roughness plates in Froude number (a) 0.98, (b) 1.08

شکل ۱۴ تغییرپذیری‌های شاخص کاویتاسیون در آرایش ردیفی در حالت نصب ۱۸ صفحه زبری تحت عدد فرود (a) ۰/۹۸، (b) ۱/۰۸

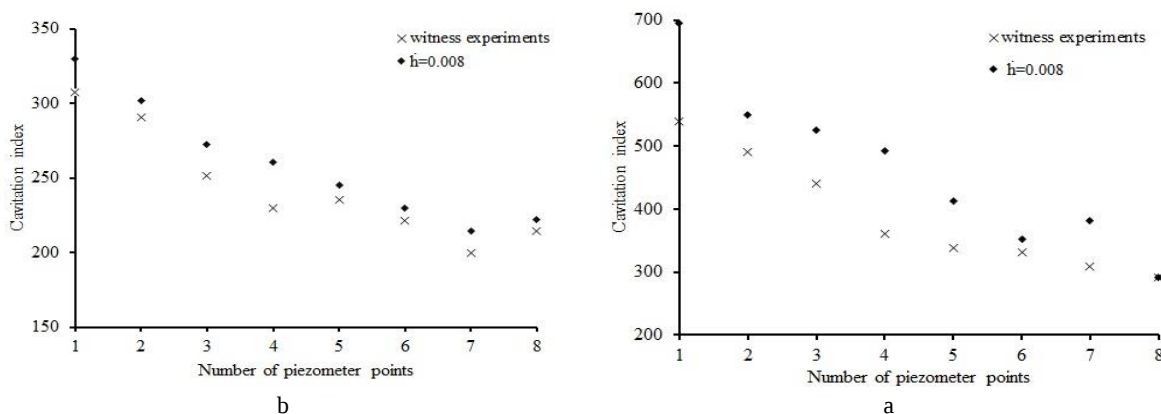


Fig. 15 cavitation index changes in row arrangement and $\bar{h}=0.008$ in froude number (a) 0.98, (b) 1.08

شکل ۱۵ تغییرپذیری‌های شاخص کاویتاسیون در آرایش ردیفی و $\bar{h}=0.008$ تحت عدد فرود (a) ۰/۹۸، (b) ۱/۰۸

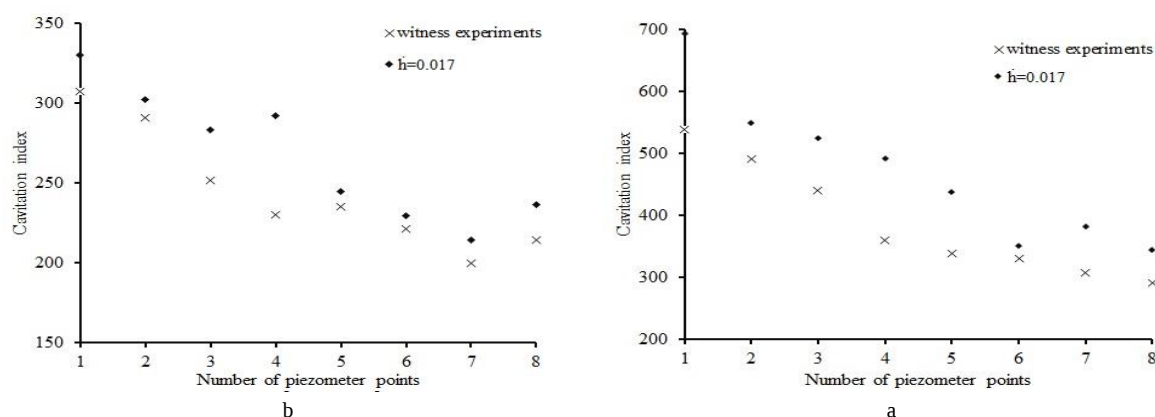


Fig. 16 cavitation index changes in row arrangement and $\bar{h}=0.017$ in froude number (a) 0.98, (b) 1.08

شکل ۱۶ تغییرپذیری‌های شاخص کاویتاسیون در آرایش ردیفی و $\bar{h}=0.017$ تحت عدد فرود (a) ۰/۹۸، (b) ۱/۰۸

همچنین در شکل ۱۷ (b) روند افزایشی شاخص کاویتاسیون نسبت به حالت شاهد برای نقطه‌های ذکر شده برابر ۴/۵، ۷/۴، ۴/۳، ۴، ۳/۹، ۳/۷ و ۲/۱ درصد به دست آمد. نتایج نشان می‌دهد در هر سه حالت افزایش شاخص کاویتاسیون نسبت به حالت شاهد وجود دارد و بیشترین تغییر در ارتفاع مؤثر ۰/۰۱۷ رخ داد.

شکل ۱۷ نمودار تغییرپذیری‌های شاخص کاویتاسیون در عددهای فرود ۰/۹۸ و ۱/۰۸ و زبری با ارتفاع مؤثر ۰/۰۲۶ نسبت به حالت شاهد در شکل ۱۷ (a) شاخص کاویتاسیون نسبت به حالت شاهد به ترتیب نقطه‌های پیژومتری ۱ تا ۸، برابر ۲۹/۲، ۲۸/۱، ۱۲/۷، ۱۲/۵، ۶/۳، ۶/۰۱، ۶ و ۴/۷ درصد افزایش داشته است.

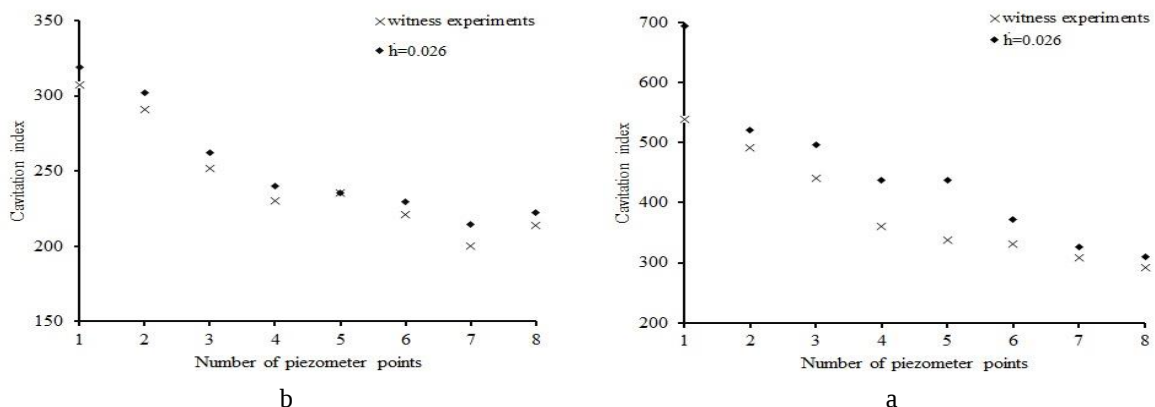


Fig. 17 cavitation index changes in row arrangement and $\bar{h}=0.026$ in froude number (a) 0.98, (b) 1.08

شکل ۱۷ تغییرپذیری‌های شاخص کاویتاسیون در آرایش ردیفی و $\bar{h}=0.026$ تحت عدد فرود (a) ۰/۹۸، (b) ۱/۰۸

می‌شود. این امر باعث جلوگیری و کاهش پدیده کاویتاسیون بر روی سرریز اوجی می‌شود. میانگین شاخص کاویتاسیون نسبت به حالت شاهد در آرایش همگرا ۱۵/۱۷، در آرایش واگرا ۱۱/۸ و در آرایش ردیفی ۱۶/۱۱ درصد افزایش یافته است. نتایج نشان می‌دهد بیشترین تغییر در آرایش ردیفی رخ می‌دهد. تغییر در ارتفاع زبری، با افزایش شاخص کاویتاسیون نسبت به حالت شاهد همراه است. نتایج نشان می‌دهد در هر سه حالت افزایش شاخص کاویتاسیون نسبت به حالت شاهد

۵- نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش گویای آن است که افزایش عدد فرود باعث کاهش شاخص کاویتاسیون می‌شود. همچنین روند کاهشی شاخص کاویتاسیون از پیژومتر ۱ تا ۸ برای هر سه شیب ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۲ و ۰/۰۲ تا اندازه‌ای قابل ملاحظه است. قرار دادن زبری روی سرریز با آرایش‌های مختلف، باعث افزایش شاخص کاویتاسیون نسبت به حالت شاهد می‌شود. وجود زبری باعث کاهش سرعت جریان و افزایش فشار بر روی سرریز

dimensional model. Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Planning of the Islamic World. Tabriz. (In Persian)

Fadaei Kermani, E., Barani, G.A. and Ghaeini-Hessaroeyeh, M. (2013). Investigation of cavitation damage levels on spillways. World Applied Sciences Journal, 21(1), 73-78.

Ghazi, B., Daneshfaraz, R. and 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.

Daneshfaraz, R., Ghaderi, A., Akhtari, A. and Di Francesco, S. (2020). On the Effect of Block Roughness in Ogee Spillways with Flip Buckets. Fluids, 5(4), 182, <https://doi.org/10.3390/fluids5040182>.

وجود دارد و بیشترین تغییر در ارتفاع مؤثر ۰/۱۷ رخ داده است. تغییرپذیری‌های شاخص کلویتاسیون در آرایش ردیفی نسبت به حالت شاهد با عدد فرود ۰/۹۸ به ترتیب نقطه‌های پیژومتري ۱ تا ۸، برابر ۰/۲۸، ۰/۵۹، ۰/۱۲، ۰/۲۱، ۰/۲۹، ۰/۶۱ و ۰/۶۲ درصد اندازه‌گیری شد. تغییر در شمار زبری با افزایش شاخص کلویتاسیون نسبت به حالت شاهد همراه بود. به طوری که در $N=18$ در آرایش ردیفی، میانگین افزایش شاخص کلویتاسیون نسبت به حالت شاهد، ۱۶/۱۴ درصد اندازه‌گیری شد.

۶- منابع‌ها

Babaian, F. and Saremi, A. (2015). Investigation of cavitation phenomenon in overflows - proposed solutions to deal with the damage caused by it and investigation of aeration method as an effective method. The Second Conference on Water, Man and Earth. Esfahan. (In Persian)

Forghani, O. and Idi, Z. (2003). Cavitation damage in overflow and ways to prevent it. 10th Civil Engineering Student Conference. Tehran. (In Persian)

Zandi, Y. (2005). Cavitation in overflows, Islamic Azad University of Tabriz. 304 p. (In Persian)

Froudi, A., Sanei, M. and Ajdari Moghadam, M. (2014). Laboratory study of cavitation index changes in ogee spillway with arc in plan and convergence of overflow walls. 8th National Congress of Civil Engineering. Noshirvani University of Technology. Babylon. (In Persian)

Navaei, B., Akhtari, A.A. and Daneshfaraz, R. (2016). Experimental Study of Flip Bucket Effect at the End of Ogee Spillway on Energy Dissipation and Jet Length. Water and Soil Science. 26(3-2), 133-142. (In Persian)

Jafari, M., Khozaymehnezhad, H. and Khakbaz, H. (2017). Laboratory study of static pressure changes on ogee spillway crest and water dump bucket in different situations. 16th Iranian Hydraulic Conference, Ardabil, <https://civilica.com/doc/727243>.

Savage, B.M. and Johnson, M.C. (2001). Flow over ogee spillway: physical and numerical model case study, J Hydraul Eng., ASCE, 127(8), 640-649.

Lahmi, S. and Mansouri, A. (2003). Investigation of cavitation simulation on ogee spillway using three-