Shahid Chamran University of Ahvaz

Irrigation Sciences and Engineering (JISE)
Vol. 44, No. 3, Fall 2021, p. 89-102

Research Paper

Journal homepage: https://jise.scu.ac.ir

EXTENDED ABSTRACT

Experimental Investigation of the Transverse Wave Formation Due to Submerge Cylindrical Obstacles on the Channel

E. Moghaddasi[1] and M. Ghomeshi[2*]

1- Graduated Student of Water Engineering and Environment Faculty, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
2- Corresponding Author, Professor of Water Engineering and Environment Faculty, Shahid Chamran Univeristy of Ahvaz,Ahvaz, Iran. (ghomeshi@scu.ac.ir).*

ARTICLE INFO

Artlcle history:
Received: 16 October 2018
Revised: 1 February 2020
Accepted: 6 February 2020

Keywords:
Transverse wave and oscillation, Open channel flow, Amplitude and frequency of the transverse wave, cylindrical Obstacles.

TO CITE THIS ARTICLE:

Moghaddasi, E., Ghomeshi, M. (2021). 'Experimental Investigation of the Transverse Wave Formation Due to Submerge Cylindrical Obstacles on the Channel', Irrigation Sciences and Engineering, 44(3), pp. 89-102. doi: 10.22055/jise.2019.14470.

Introduction

Obstacles such as piers of a bridge inflow confuse and disturb its natural form. With passing the flow through these obstacle disturbances create downstream, called the Von Karman Street vortex shedding. When the frequency of the microwaves is equal to the natural frequency of the current approach, the resonance will form. If the flow walls are constant such as a flume, this phenomenon may see as a transversal wave. Actual examples of this phenomenon created near the bridge piers in a canal called the Delta Mendota, as well as in the New York canal around the I-84 Bridge (Schuster, 1967).

Numerous people in this field have done research that mostly with variables such as channel width, shape, and placement of obstacles in the channel to study different wave characteristics, including its amplitude and frequency. Zima, L., and Ackermann (2002), Ghomeshi et al. (2007), Jafari et al. (2010), Meile et al. (2011), and Sarkar (2012) tried to find the maximum amplitude of the created wave by using obstacles with different diameters. Zhao et a. (2014) performed their experiments to measure the coefficient and tensile force created in the vicinity of obstacles while transmitting transverse waves.

This study aimed to find a relationship between the percentage of obstacle immersion and wave characteristics.

Methodology

The experiments in this study were performed in a flume with six meters long and 75 cm wide with cylindrical barriers 30 cm long and 25 mm in diameter. The experiments were

defined in four different scenarios. The difference between which were the arrangement of the cylinders in the flow path in inline and stagger and also in the distance between the obstacles (120 and 60 mm) (Figure 1). At the beginning of each stage, the characteristics of the transverse wave due to non-submerged obstacles were recorded in two modes of I and II. Then the flow depth is kept constant, and then step by step, the obstacles are submerged by a percentage of average flow depth. At this stage, the transverse wave characteristics were recorded and the process of changing its properties were recorded. Table 1 provides a summary of laboratory data related to various parameters.

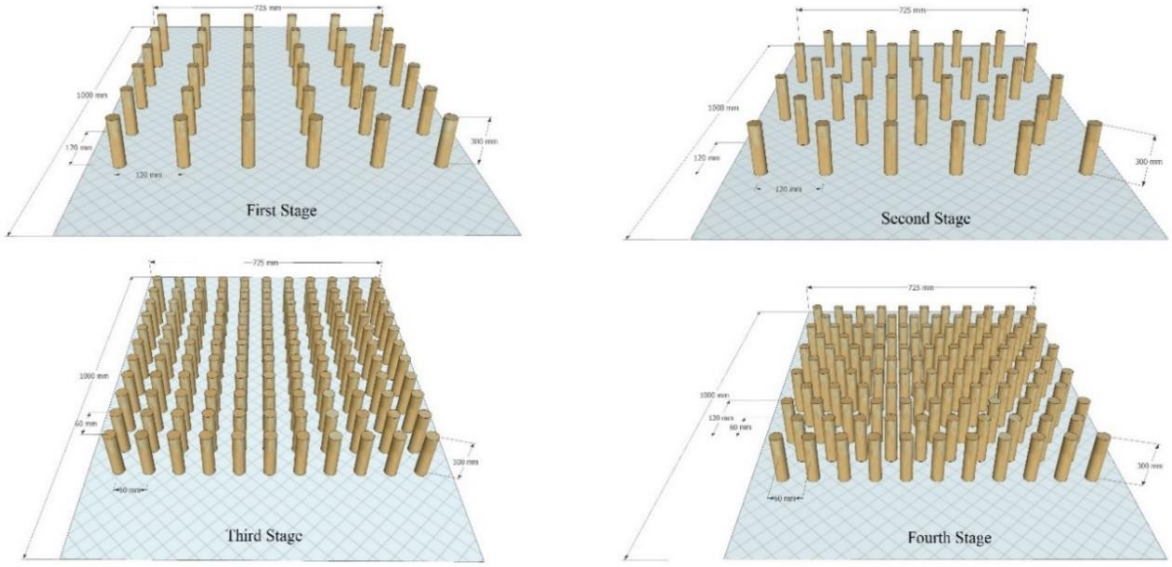


Fig. 1- A view of the arrangement of the cylinders in the various stages of the experiment

Table 1- Summary of data collected from different laboratory stages

	n	*T,P(mm)*	*A(mm)*	f_s	h_{sp}	*R*	*S*		*n*	*T,P(mm)*	*A(mm)*	f_s	h_{sp}	*R*	*S*
The 1st stage	I	120	11	1.17	0	3474	0.210	*The 3rd stage*	II	60	48	0.71	0	3276	0.132
	I	120	10	1.19	5	3474	0.213		II	60	44	0.73	5	3276	0.140
	I	120	8	1.18	10	3474	0.212		II	60	47	0.75	10	3276	0.143
	I	120	1	1.2	20	3474	0.216		II	60	48	0.73	20	3276	0.140
	II	120	32	0.73	0	5367	0.085		I	60	24	1.15	30	3276	0.220
	II	120	29.5	0.78	5	5367	0.091		I	60	21	1.18	40	3276	0.225
	II	120	20	0.80	10	5367	0.093		I	60	8	1.17	50	3276	0.224
	II	120	5	0.79	20	5367	0.091	*The 4th stage*	I	60	12	1.07	0	2492	0.269
The 2nd stage	I	120	3	1.03	0	3423	0.188		I	60	25	1.10	5	2495	0.276
	I	120	10	1.01	5	3423	0.185		I	60	2	1.15	10	2492	0.288
	I	120	1	0.99	10	3423	0.182		II	60	43	0.71	0	3500	0.128
	II	120	27	1.60	0	5166	0.194		II	60	34	0.75	5	3500	0.135
	II	120	15	1.59	5	5166	0.193		II	60	20	0.75	10	3500	0.134
	II	120	4	1.59	10	5166	0.192		II	60	9	0.70	20	3500	0.125
	II	120	1	1.57	20	5166	0.189		II	60	8	0.70	30	3500	0.125

Results and Discussion

Critical parameters that affect the characteristics of transverse waves such as amplitude A, f_s propagation frequency, n wave mode, and λ oscillation wavelength ($\lambda = {}^{2B}/_{n}$ (Dean G.D. and Dalrymple (1984))), can be the width of the flume B, the natural frequency of the flume f, average flow

depth h, number of obstacles in a row of channel width N, flow velocity U, the diameter of obstacles D, depth of immersion of obstacle h_s, the distance between obstacles in width of channel P, the distance between obstacles in the direction of channel T, gravitational acceleration Earth g and the kinematic viscosity of the fluid ν. Therefore, the variables governing the transverse wave formation phenomenon can be presented as Equation 1.

$$\phi = \begin{pmatrix} A, f_s, f, n, \lambda, B, h, N, U, D, \\ h_s, P, T, g, \nu \end{pmatrix} \quad (1)$$

Using dimensionless numbers, $\frac{U}{\sqrt{gh}}$ Froude number F, $\frac{UD}{\nu}$ Reynolds number R and $\frac{f_s D}{U}$ Strouhal number S, and according to the percentage of immersion of obstacles ($h_{sp} = \frac{h_s}{h} * 100$) and Equation 7 is obtained using Buckingham theory and dimensional analysis.

$$\frac{A}{h} = \frac{0.033 \left(\frac{\lambda}{B}\right)^{0.14} \left(\frac{D}{T}\right)^{1.4}}{S^2 \; h_{sp}^{0.58}} \quad (2)$$

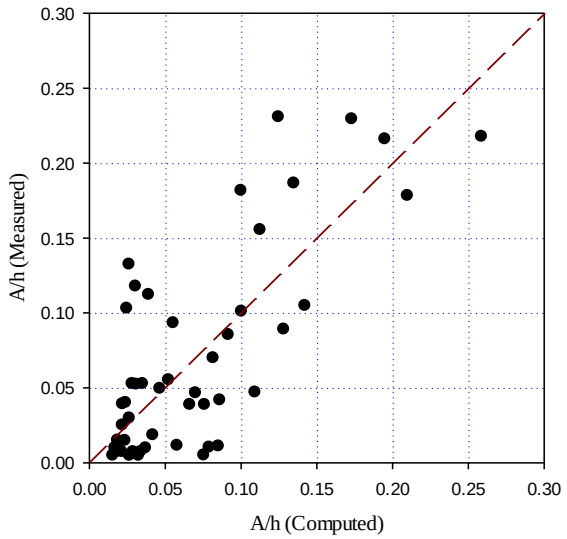


Fig. 2- Comparison of the relative amplitude obtained from the experiment and calculated using Equation (2)

In Figure (2), the relative amplitudes obtained from Equation 2 are compared with the relative amplitudes obtained from the experiment.

Conclusions

Finally, by analyzing the collected data, a relationship for predicting and estimating the transverse wave characteristics in the laboratory conditions of this research was presented according to Equation 7. In four experiments, it can be concluded that with increasing immersion depth of obstacles, mode, amplitude, and frequency of the transverse wave also decrease. The highest percentage of immersion was related to the third stage experiment, in which, despite the immersion, 68.6 percent of the mode I transverse wave with 2 mm of amplitude was formed.

Acknowledgment

The authors have used the research office of Shahid Chamran University of Ahvaz grant number 97/3/02/26247 to conduct this research, so the authors would like to appreciate the Shahid Chamran University of Ahvaz for supporting this study.

References

1- Dean, R. G. and Dalrymple, R. A. 1984. *Water wave mechanics for engineers and scientists. Advanced series on ocean engineering* (4 vols). London: World Scientific Press.

2- Ghomeshi, M., Mortazavi-Dorcheh, S. A. and Falconer, R. 2007. Amplitude of wave formation by vortex shedding in open channels. *Journal of Applied Sciences, Asian Network for Scientific Information, 24(7)*, pp. 3927-3934.

3-Jafari, A., Ghomeshi, M., Bina, M. and Kashefipour, S. M. 2010. Experimental study on ten modes of transverse waves due to vertical cylinders in open channels. *journal of food, agriculture and environment, 8(2)*, pp. 949-955.

4-Meile, T., Boillat, J.-L. and Schleiss, A. J. 2011. Water-surface oscillations in channels with axi-symmetric cavities. *Journal of Hydraulic Research, 49(1)*, pp. 73-81.

5-Sarkar, A. 2012. Vortex-excited transverse surface waves in an array of randomly placed circular cylinders. *ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, 138(7)*, pp. 610-618.

6-Schuster, J., C. 1967. *Canal Capacity studies, Wave formation by bridge piers*. Denver, Colorado: U.S.Department of the interiorHYD-485).

7-Sumer, B., Mtlu and Fredsoe, J. 1997. *Hydrodynamics around cylindrical structuresby. Advanced series on ocean Eengineering* (12 vols). London: World Scientific Publishing Co.

8-Zhao, K., Cheng, N.-S., Wang, X. and Tan, S. K. 2014. Measurements of fluctuation in drag acting on rigid cylinder array in open channel flow. *ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, 140(1)*, pp. 48-55.

9-Zima, L. and Ackermann, N. L. 2002. Wave generation in open channels by vortex shedding from channel obstructions. *ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, 128(6)*, pp. 596-603.

© 2021 Shahid Chamran Universiry of Ahvaz, Ahvaz, Iran. This article 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/).

علوم و مهندسی آبیاری جلد ٤٤، شماره‌ی۳، پاییز ۱٤۰۰، مقاله پژوهشی، ص. ۱۰۲-۸۹

بررسی آزمایشگاهی خصوصیات امواج عرضی حاصل از برخورد جریان با موانع استوانه‌ای مستغرق

احسان مقدسی[۱] و مهدی قمشی[۲*]

۱- دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد رشته مهندسی رودخانه- مهندسی عمران، داتشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۲*- نویسنده مسئول، استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز ghomeshi@scu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۷/۷/۲۴ بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۱۲ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۱۷

چکیده

موانعی همچون پایه‌های پل می‌تواند در جریان آب ایجاد اغتشاش نموده و شکل طبیعی آن را برهم زند. با عبور جریان از این موانع در پایین‌د ست آن‌ها اغت شا شی مو سوم به ورتکس نو سانی ون‌کارمن ایجاد می شود. زمانی که فرکانس این ریزموج‌ها با فرکانس طبیعی معبر جریان برابر می‌شوند، پدیده‌ی تشدید حادث می‌شود که اگر دیواره‌های جریان مانند یک فلوم آزمایشگاهی ثابت باشد، این پدیده به‌صورت یک موج عرضی قابل‌مشاهده است. هدف از این پژوهش یافتن رابطه‌ای بین درصد استغراق موانع و خصوصیات موج می‌باشد. در مطالعه‌ی حاضر، ۵۸ آزمایش در چهار مرحله آرایش‌های مختلف موانع انجام شد. دبی جریان در تمام آزمایش‌ها حدود ۲۰ لیتر بر ثانیه ثابت بود و ۱۲۱ عدد مانع ا ستوانه‌ای به قطر ۲۵ میلی‌متر به فا صله‌های طولی و عر ضی ۱۲۰ و ٦۰ میلی‌متر اس تفاده شد. شرایط آزمایش‌ها به نحوی بود که در ابتدا به‌عنوان یک آزمایش مرجع، مشخصات موج و جریان را در مرحله‌ای که موج عر ضی با حداکثر دامنه‌ی خود ت شکیل می‌گردید، ثبت شدند و در مراحل بعدی با م ستغرق نمودن ا ستوانه‌ها به میزان در صدی از عمق جریان آزمایش مرجع، خ صو صیات موج عر ضی ایجاد شده برر سی شدند. درنهایت با ا ستفاده از تحلیل ابعادی و نرم‌افزار آماری، رابطه‌ای به‌منظور برآورد دامنه نسبی موج پیشنهاد شد، همچنین داده‌های به‌دست‌آمده از رابطه‌ی پیشنهادی با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه گردید.

کلیدواژه‌ها: امواج و نوسانات عرضی، جریان در کانال روباز، دامنه و فرکانس موج عرضی، موانع استوانه‌ای.

مقدمه

موانعی همچون پا یه و کو له های پل، پا یه و شمع های اسکله‌های ساحلی، گیاهان آبزی و پوشش گیاهی ساحلی یا تالاب‌ها در مسیر یک جریان و یا جریان‌های چند شاخه‌ای (Braided) هنگام جریان سیلابی و همچنین تغییر شکل‌های ناگهانی دیواره‌های جانبی، می‌توانند در جریان، ایجاد اغتشاش نموده، شکل و مسیر طبیعی آن را برهم زنند.

با عبور جریان از این موانع در پایین‌دست آن‌ها اغتشاشی مو سوم به ورتکس (Vortex) و در بالاد ست آن‌ها امواجی مو سوم به نعل اسبی (shoe Horse) ایجاد می‌شود. فرض بر این است که با برهم‌نهی امواج حاصل از این اغتشاش یا به بیان دیگر با هم فر کانس شدن این ریزموج ها با فر کانس طبیعی جر یان آب، پدیده‌ی تشدید (Resonance) حادث می‌شود که اگر دیواره‌های جریان مانند یک فلوم آزمایشگاهی بسته و ثابت باشد، این پدیده‌ی تشدید را می‌توان به‌صورت یک موج مکانیکی عرضی کامل و ایستا در نوع‌های مختلف مشاهده نمود. البته واضح است که مجموعه‌ای از عوامل هیدرودینامیکی روی تشکیل این تشدید موج دخیل هستند. باوجوداینکه این موج عر ضی تنها محصول ورتکس گسترش‌یافته‌ی ناشی از برخورد جریان با موانع نیست، اصلی‌ترین عامل قابل استنادی است که با کمی فرضیات ساده‌سازی و صرف‌نظر از دیگر عوامل می‌توان آن را عامل تشکیل موج عرضی عمود بر مسیر جریان دانست. مکانیک اثر متقابل بین سیال و سازه زمانی موردتوجه قرار گر فت که فرایند تخر یب پل تاکو ما ناروز (Tacoma Narrows) در اثر نو سان پل درنتیجه‌ی ورتکس نا شی از جریان هوای اطراف بدنه‌ی پل رخ داد (شکل ۱).

نمونه‌ی واقعی دیگری که ازلحاظ نو سان سطح سیال به این تحقیق شباهت بیشتری دارد (در هر دو، سیال مورداستفاده آب می‌باشد)، پدیده‌ی نوسانی مشابهی بود که در سال ۱۹۶۷ در کانال دلتا مندوتا (Delta Mendota) اتفاق افتاد که موجب شد این کانال نیز امواج عمود بر مسیر جریانی را که به نظر می‌رسید ناشی از وجود پایه‌های پل در آن باشند تجربه نماید (Schuster, 1967).

همچنین نمونه‌ی دیگر پل آی -۸۴ است که در اوایل سال ۲۰۰۹ روی کانال نیویورک تأسیس شد. در طی فصل آبگیری کانال پس از ساخت پل نو ساناتی سطحی در جریان آن م شاهده شد که قدرت و میزان این نوسانات در طول فصل متغیر بود. فرسایش کناره‌ی کانال براثر این نوسانات که به هر دو صورت امواج طولی و عرضی نمود پیدا می‌کردند، موجب نگرانی مسئولان مربوطه شده بود (Howes, 2011).

DOI: 10.22055/JISE.2019.14470

با توجه به مثال‌های مختصر ذکر شده می‌توان به اهمیت این موضوع و لزوم تحقیق و پژوهش در این زمینه پی برد. به جهت بررسی پیشینه‌ی این تحقیق در ابتدا به پژوهش Zima و Ackermann (2002) اشاره می شود که با انجام آزمایش‌های متعددی در دو فلوم شیب‌دار یکی به عرض ۱۵۰ میلی‌متر و طول ۲/۷۵ متر با موانع استوانه‌ای چوبی به قطر ۱۲/۷ میلی‌متر و دیگری فلومی با عرضی برابر ۴۵۰ میلی‌متر و طول ۱۲ متر با موانع استوانه‌ای چوبی به قطر ۲۵/۴ میلی‌متر، به بررسی امواج عرضی عمود بر مسیر جریان ناشی از ورتکس منتشر شده پس از برخورد جریان با موانع در دو نوع I و II پرداختند (شکل ۲).

درنهایت ایشان رابطه‌ای جهت پیش‌بینی و تخمین دامنه‌ی نسبی موج عرضی (A/h) ارایه نمودند. (Zima and Ackermann, 2002).

آن‌ها آزمایش‌های خود را در محدوده عدد رینولدز استوانه ۸۶۸ تا ۱۲۱۷۵ هدایت نمودند، زیرا معتقد بودند شرط لازم جهت تشکیل موج عرضی قرار داشتن عدد رینولدز موانع استوانه‌ای در محدوده‌ی ۴۰ تا ۳۰۰,۰۰۰ می‌باشد.

Ghomeshi et al. (2007) نیز آزمایش‌های خود را با یک فلوم عریض به عرض ۱/۲ متر و طول ۱۲ متر انجام دادند. آن‌ها کانال آزمایشگاهی را برای بررسی تشکیل موج در عرض‌های متفاوت کانال، به دو قسمت به ابعاد ۴۰ و ۸۰ سانتی‌متر تقسیم نمودند، یعنی آن‌ها در عمل با سه عرض فلوم آزمایش‌های خویش را انجام دادند. شیب کانال مورداستفاده نیز ثابت و برابر ۰/۰۰۱ بود. برای موانع، از میله‌های استوانه‌ای شکل چوبی به قطر ۲۴ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر استفاده شد. استوانه‌ها را در کف فلوم در فواصل مختلف و با چینش‌های موازی و زیگزاگی قراردادند. اعداد رینولدز در این آزمایش‌ها در محدوده‌ی ۱۰۰۰ تا ۴۴۰۰ قرار گرفته و حداکثر دامنه‌ی موج مشاهده‌شده ۴۰ درصد عمق متوسط جریان بوده است. هم‌چنین آن‌ها یک معادله‌ی دوقسمتی برای تخمین دامنه‌ی موج عرضی که به نسبت فاصله‌ی بین موانع در هر ردیف به قطر موانع استوانه‌ای (T/D) بستگی داشت، ارایه نمودند. درنهایت آن‌ها نتیجه گرفتند که ممکن است جریان یکنواخت عبوری از موانع استوانه‌ای صلب توسط ورتکس‌های منتشر شده، امواج عرضی تولید کند و زمانی که مقدار T/D کمتر از پنج باشد، رابطه‌ی بین دامنه‌ی نسبی و بدون بعد برخلاف حالتی که T/D بزرگ‌تر و یا مساوی پنج می‌باشد، با T/D به‌صورت معکوس خواهد بود.



Fig. 1-Collapse of Tacoma Narrows Bridge due to oscillation and vortex shedding by the interaction of air fluid with structure

شکل ۱- تخریب پل تاکوماناروز در اثر نوسان و انتشار ورتکس ناشی از تعامل سیال هوا با سازه

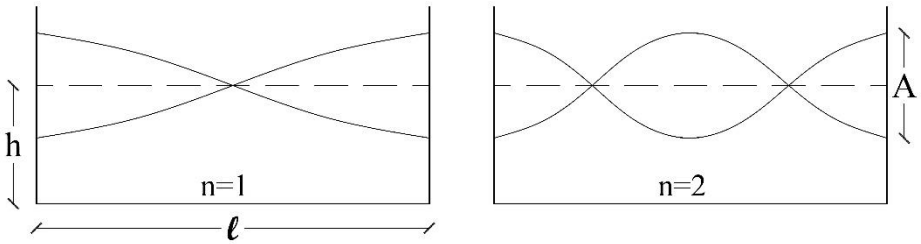


Fig. 2-Transverse wave modes in Zima and Ackermann experiments (2002)

شکل ۲- نوع امواج عرضی در آزمایش‌های Zima and Ackermann (2002)

Jafari et al. (2010) در یک پژوهش آزمایشگاهی مشابه به بررسی امواج عرضی ناشی از برخورد جریان با موانع استوانه‌ای در ده نوع پرداختند. آن‌ها از یک فلوم آزمایشگاهی به طول شش متر، عرض ۷۲ سانتی‌متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر، با موانع استوانه‌ای چوبی به قطرهای مختلف پنج، ۱۲ و ۲۵ میلی‌متر استفاده نمودند. در ابتدا آن‌ها موانع را در آرایش‌های مختلف موازی و زیگزاگی با فواصل طولی و عرضی مختلف در کف فلوم پیچ نموده سپس با عبور جریان آب با دبی‌های مختلف ۲/۲ تا ۲۰ لیتر بر ثانیه، درمجموع ۷۶۰ آزمایش مختلف انجام دادند. هم‌چنین آن‌ها امواج عرضی را در بعضی از حالات که موانع مستغرق بودند، مشاهده و گزارش نمودند درحالی‌که به بررسی دقیق آن نپرداخته بودند. عدد رینولدز موانع در آزمایش‌های ایشان بین اعداد ۱۵۲ و ۵۹۸۶ قرار داشت. در ادامه نتیجه گرفتند که: نوع موج عرضی زمانی تغییر می‌کند که عمق جریان کاهش می‌یابد. در برخی از آزمایش‌ها بااینکه موانع در میان جریان مستغرق بودند، موج تشکیل می‌گردد. هم‌چنین در این آزمایش‌ها، حداکثر دامنه‌ی موج ۴۰ درصد عمق متوسط جریان ارتفاع داشت.

Meile et al. (2011) پژوهش خود را در فلوم آزمایشگاهی به طول ۳۸/۳۳ متر و عرض ۰/۴۸۵ متر و شیب متوسط ۱/۱۴ درصد انجام دادند، آن‌ها با ایجاد حفره‌های مستطیل شکل در دیواره و ایجاد و انتشار ورتکس در اثر برخورد جریان با آن‌ها سعی در تشکیل امواج عرضی و مطالعه روی مشخصات آن‌ها نمودند. به‌طوری‌که طول اسمی این حفره‌ها ۰/۵، یک و دو متر، فاصله‌ی بین دو حفره‌ی متوالی را ۰/۵، ۱/۰ و ۲/۰ متر و بعد جانبی حفره‌ها را ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ متر در نظر گرفتند که به‌این‌ترتیب آزمایش‌ها را در ۳۶ حالت مختلف و در مجموع به تعداد ۴۲۹ آزمایش برنامه‌ریزی و به انجام رساندند. در نهایت رابطه‌ای برای پیش‌بینی فرکانس نوسان عرضی جریان ارایه دادند.

Sarkar (2012) پژوهشی آزمایشگاهی را در زمینه‌ی تشکیل امواج عرضی ناشی از ورتکس، در یک فلوم آزمایشگاهی با دیواره‌های شیشه‌ای به طول ۹ متر، عرض ۰/۴ متر و عمق ۰/۵ متر، مرکب از ۱۵۴۷ مانع استوانه‌ای شیشه‌ای مستغرق که به طور تصادفی در ۲/۹۴ متر از طول کل فلوم توزیع شده بودند، انجام داد. او در نهایت بدین نتیجه رسید که دامنه‌ی امواج عرضی در ابتدا با افزایش عمق جریان آب افزایش پیدا کرده، اما بعد از رسیدن به یک مقدار حداکثر، به سرعت کاهش پیدا می‌کند. به‌طوری‌که می‌توان گفت دامنه‌ی موج در یک عمق بحرانی از جریان آب، به مقدار حداکثر خود می‌رسد. هم‌چنین اشاره نمود که با افزایش قطر استوانه‌ها، مقدار حداکثر دامنه‌ی موج عرضی نیز افزایش پیدا می‌کند. حداکثر دامنه‌ی موج در عرض آرایش با افزایش عدد رینولدز، افزایش می‌یابد. برای شکل‌گیری امواج عرضی سطحی با حداکثر دامنه نیز یک مقدار بحرانی برای عدد رینولدز وجود دارد. حداکثر دامنه‌ی موج تقریباً در یک پنجم طول کل آرایش، از لبه‌ی بالادست آن شکل می‌گیرد. او هم‌چنین یک مدل ریاضی برای محاسبه‌ی دامنه‌ی نسبی امواج عرضی، برای شرایط آزمایشگاهی خود، با فرض اینکه نیروی وارده به هر استوانه مجموعی است از نیروهای بالابری، جرم هیدرودینامیکی و Froude-Krylov ، به‌صورت معادله‌ی (۱) ارائه نمود (Sumer and Fredose, 1997):

$$\frac{A}{h} = \frac{K\,N\,D^3 L}{B\,S^2[2h - \pi N\,D\,L]} \qquad (۱)$$

در این فرمول A دامنه‌ی موج عرضی، h عمق متوسط جریان، B عرض فلوم آزمایشگاهی، S عدد استروهال ($S = \frac{f_s D}{U}$)، N تعداد مانع استوانه‌ای در واحد سطح، D قطر مانع استوانه‌ای و L طول مانع استوانه‌ای می‌باشد. هم‌چنین K عددی ثابت است که توسط ضریب بالابری C_L، به‌صورت معادله‌ی (۲) تعریف می‌شود.

$$K = \frac{C_L}{4} \qquad (۲)$$

Zhao et al. (2014) آزمایش‌های خود را با هدف اندازه‌گیری ضریب کشش و نیروی کشش ایجادشده جلوی موانع موجود در مسیر جریان براثر ورتکس منتشرشده از مانع، هنگام تشکیل موج عرضی، در دو فلوم آزمایشگاهی و با موانع استوانه‌ای

DOI: 10.22055/JISE.2019.14470

با ۱۱ سانتی‌متر طول و ۰/۸۳ متر قطر که در سه حالت با فاصله‌های ۰/۰۳، ۰/۰۶ و ۰/۰۹ در کف فلوم قرار گرفته‌اند، انجام دادند. در طول آزمایش‌ها نیز توسط تنظیم شیب بستر، دریچه‌ی انتهایی و دبی، جریان را یکنواخت نگه‌داشته بودند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها این بود که مقادیر S در ابتدا با افزایش R تا موقعی که $R<$ ۶۰۰ است، کاهش پیدا می‌کند. پس از آن در بازه‌ی $600<R<800$ مقدار St افزایش یافته، در نهایت در محدوده‌ی $R>1000$ تا حدود ۰/۲ کاهش پیدا می‌کند. آن‌ها دریافتند که حداکثر میزان نوسانات امواج عرضی نیز در همان محدوده‌ی تغییر برای عدد استروهال ($600<R<800$) اتفاق می‌افتد که نیروی کششی، سرعت و عمق جریان اندازه‌گیری شده در آزمایش‌ها نیز تصدیق‌کننده‌ی این امر است.

Mostafavi et al. (2015) تحقیق خود را با ۷۱ آزمایش در آرایش‌های مختلف موانع منشوری با مقطع مثلث در چینش‌های موازی و زیگزاگی با فواصل ۱۲۰ میلی‌متری انجام دادند و درنهایت با استفاده از تحلیل ابعادی و نرم‌افزارهای آماری، رابطه‌ای برای برآورد دامنه نسبت به عمق جریان در زمان تشدید به‌صورت معادله‌ی (۳) پیشنهاد کردند.

$$\frac{A}{h}=\frac{0.023}{(\frac{h_s}{h})^{0.496}N^{9.414}n^{0.08}S^{7.733}} \qquad (۳)$$

باید اشاره نمود که تحقیقات Mostafavi et al. (2015) در ادامه‌ی پژوهش حاضر بوده که با تغییر شکل مقطع موانع دایره‌ای به مثلثی سعی در یافتن رابطه‌ای مشابه برای پیش‌بینی دامنه‌ی نسبی موج عرضی داشته‌اند. لذا اختلاف این دو پژوهش تنها در شکل مقطع موانع می‌باشد.

هدف مقاله حاضر یافتن رابطه‌ای منطقی بین دامنه بی‌بعد امواج عرضی و سایر متغیرهای وابسته، خصوصاً در صد استغراق موانع بوده که مهم‌ترین تفاوت این پژوهش با تحقیقات گذشته نیز دخیل نمودن میزان استغراق موانع در رابطه خصوصیات موج عرضی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

فلوم آزمایشگاهی استفاده شده، فلومی با مقطع مستطیل به ابعاد ۷۵ سانتی‌متر عرض و ۶۰ سانتی‌متر ارتفاع است که طول آن با در نظر گرفتن حوضچه‌ی آرامش طراحی‌شده در ابتدای آن شش متر می‌باشد. در شکل (۳) شماتیکی از آن نشان داده شده است. به‌منظور مانع‌گذاری در قسمتی از طول فلوم و گسترده در تمام عرض آن، استوانه‌هایی چوبی به قطر ۲/۵ سانتی‌متر و طول ۳۰ سانتی‌متر و به تعداد ۱۲۱ عدد تهیه شد. با توجه به این‌که استوانه‌های چوبی در تمام طول آزمایش کاملاً با آب در تماس بودند، جهت جلوگیری از تورم و تغییر شکل آن‌ها، با لایه‌ای از مواد پوشش جلادهنده پوشش داده شده، سپس در آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفتند.

آزمایش‌ها در چهار نوع آرایش، طوری انجام پذیرفته است که در ابتدا پس از آماده‌سازی کف و ورقه‌ی پلکسی مناسب با نحوه‌ی آرایش و قرار دادن استوانه‌ها در آن، دبی جریان توسط یک شیر پروانه‌ای و دستگاه دبی سنج در یک عدد ثابت که در تمام آزمایش‌ها ۲۰ لیتر بر ثانیه (۰/۰۲ مترمکعب بر ثانیه) در نظر گرفته شده بود، تنظیم می‌شد.

پس از آن ارتفاع آب داخل فلوم را تا بالاترین حد ممکن توسط دریچه‌ی کشویی انتهای فلوم بالا برده، سپس با افزایش سرعت جریان توسط پایین آوردن دریچه سعی شد، موج عرضی نوع یک و در پی آن موج نوع دو با حداکثر دامنه (رخداد تشدید، امواج ناشی از ورتکس پشت موانع) تشکیل و مشخصات آن‌ها ثبت گردد. آن‌گاه در مراحل بعدی آزمایش، استوانه‌ها را به میزان درصدی از همین ارتفاع که موج با حداکثر دامنه تشکیل شده است، مستغرق ساخته و مشخصات موج تشکیل‌شده ثبت گردید. این عمل تا جایی ادامه داشت که دیگر موجی عرضی در فلوم تشکیل نشده و به‌طور کامل حذف گردد.

نحوه‌ی چینش استوانه‌ها در مرحله‌ی اول از آزمایش به این صورت بود که ۳۶ عدد استوانه به صورت موازی در شش ردیف طولی و شش ردیف عرضی عمود برهم در وسط فلوم آزمایشگاهی قرار می‌گیرند. به‌طوری‌که فاصله بین موانع در جهت عرض و طول کانال ۱۲ سانتی‌متر است. استوانه‌ها تا جای ممکن با حداکثر ارتفاع خود در مقابل جریان قرار داده می‌شوند. سپس جریان را با دبی ثابت ۲۰ لیتر بر ثانیه درون فلوم هدایت نموده تا امواج عرضی تشکیل‌شده در حالت غیر مستغرق، با حداکثر دامنه خود مشاهده و مشخصاتشان ثبت گردد.

پس از برداشت دامنه و فرکانس (بسامد) امواج تشکیل‌شده و اعماق متوسط جریان در بالادست و پایین‌دست موانع، جریان را متوقف نموده (چون لازم است عمق و سرعت جریان در طول این مرحله از آزمایش ثابت بماند) و ارتفاع دریچه در همان عمقی که موج با حداکثر دامنه‌ی خود تشکیل گردید، ثابت نگه داشته شد، سپس با پایین بردن استوانه‌ها (مستغرق نمودن موانع) به میزان درصدی از همان ارتفاع، مشخصات موج تشکیل‌شده ثبت گردید. عمل پایین بردن استوانه‌ها در عمق ثابتی از جریان آب در کانال تا جایی ادامه یافت که دیگر هیچ موج عرضی در فلوم تشکیل و مشاهده نگردد.

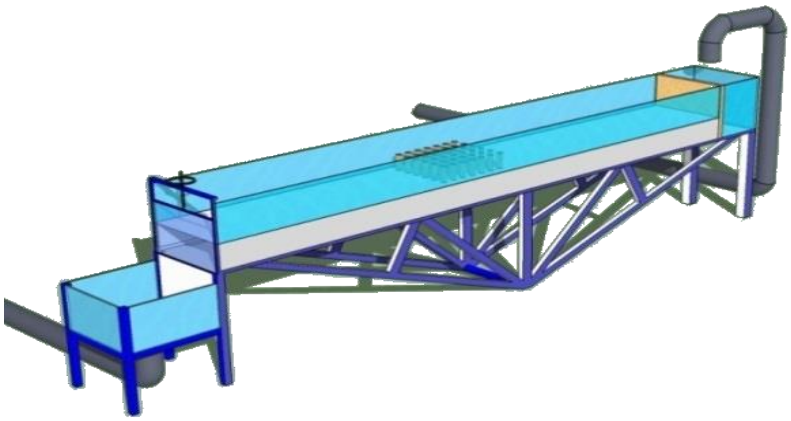


Fig. 3- Schematic Figure of the flume
شکل ۳- شماتیکی از فلوم آزمایشگاهی

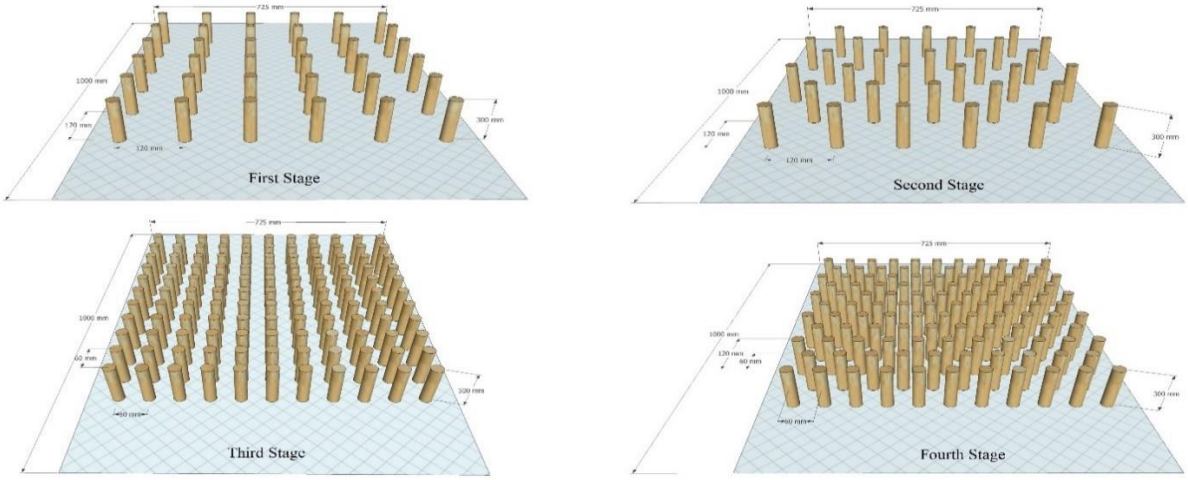


Fig. 4- A view of the arrangement of the cylinders in the various stages of the experiment
شکل ٤- نمایی از آرایش استوانه‌ها در مراحل مختلف آزمایش

نحوه‌ی چینش استوانه‌ها در مرحله‌ی دوم آزمایش، به صورتی بود که ۳۳ عدد استوانه به‌صورت زیگزاگی مطابق شکل (۴)، در شش ردیف طولی و شش ردیف عرضی عمود برهم که یک‌درمیان حاوی شش و پنج عدد استوانه هستند، در وسط فلوم آزمایشگاهی قرار گرفتند، به‌طوری‌که فاصله بین موانع در جهت طول و عرض کانال ۱۲ سانتی‌متر بود. روند انجام این مرحله از آزمایش نیز هم‌چون مرحله‌ی اول بود.

در مرحله‌ی سوم از آزمایش، نحوه‌ی چینش استوانه‌ها به این صورت بود که ۱۲۱ عدد استوانه به صورت موازی مثل شکل (۴) در ۱۱ ردیف طولی و ۱۱ ردیف عرضی عمود برهم که هر ردیف حاوی ۱۱ عدد استوانه بود، در وسط فلوم آزمایشگاهی قرار گرفتند. به‌طوری‌که فاصله بین موانع در جهت طول و عرض کانال شش سانتی‌متر بود. روند انجام این مرحله از آزمایش نیز هم‌چون دو مرحله‌ی قبل بود.

نحوه‌ی چینش استوانه‌ها در مرحله‌ی چهارم آزمایش، به صورتی بود که ۱۱۶ عدد استوانه به صورت زیگزاگی به

A view of the arrangement of the cylinders in the various stages of the experiment

شکل ۴) در ۱۱ ردیف طولی و ۱۱ ردیف عرضی عمود برهم یک‌درمیان که حاوی ۱۱ و ۱۰ عدد استوانه بودند، در وسط فلوم آزمایشگاهی قرار گرفتند. به‌طوری‌که فاصله بین موانع در جهت طول و عرض کانال شش سانتی‌متر است. روند انجام این مرحله از آزمایش نیز هم‌چون سه مرحله‌ی پیشین بود.

متغیرهای آزمایشگاهی در این پژوهش به مشخصات موج، یعنی دامنه و فرکانس آن محدود می‌شوند. به‌طوری که برای اندازه‌گیری دامنه‌ی موج عرضی تشکیل‌شده در فلوم آزمایشگاهی، نوسان سطح آب را با ارتفاع‌سنج‌هایی که در سه نقطه از محل قرارگیری موانع موجود در فلوم، روی دیواره‌ی شیشه‌ای آن نصب گردیده‌اند، اندازه‌گیری نموده، آن‌گاه میانگین این سه بازه به‌عنوان دامنه‌ی نوسان موج عرضی تشکیل‌شده محسوب می‌گردد. هم‌چنین برای دست آوردن عمق متوسط جریان، در فلوم، دو ارتفاع‌سنج در بالادست و پایین‌دست ناحیه‌ی قرارگیری موانع روی

DOI: 10.22055/JISE.2019.14470

فلوم نصب نموده، با میانگین‌گیری اعداد نشان‌داده شده در آن‌ها، عمق متوسط جریان به دست آمد. برای محاسبه‌ی فرکانس موج، با یک کرنومتر، زمان ده نوسان موج اندازه‌گیری شد، سپس با محاسبه‌ی معکوس یک‌دهم عدد مشاهده‌شده در کرنومتر، فرکانس یا بسامد موج نیز به دست آمد.

باید اشاره نمود که در این پژوهش برای اندازه‌گیری دامنه موج از ارتفاع‌سنج‌هایی با دقت میلی‌متر و همچنین برای اندازه‌گیری فرکانس یا بسامد موج از کرنومتری با دقت صدم ثانیه استفاده شده است.

نتایج و بحث

از پارامترهای مهمی که روی مشخصات امواج عرضی مانند دامنه A، فرکانس انتشار f_s، نوع موج n و طول‌موج λ نوسان ($\lambda = 2B/n$ Dean. و Dalrymple (1984)) تأثیر دارد، می‌توان به عرض کانال B، فرکانس طبیعی کانال f، عمق متوسط جریان h، تعداد موانع در یک ردیف از عرض کانال N، سرعت جریان U، قطر موانع D، عمق استغراق مانع h_s، فاصله‌ی بین موانع در عرض کانال P، فاصله‌ی بین موانع در جهت طول کانال T، شتاب گرانشی زمین g و ویسکوزیته‌ی سینماتیک سیال ν اشاره نمود. بنابراین متغیرهای حاکم بر پدیده‌ی تشکیل موج عرضی به صورت معادله‌ی (۴) قابل ارایه هستند.

$$\phi = \begin{pmatrix} A, f_s, f, n, \lambda, B, h, N, U, D, \\ h_s, P, T, g, \nu \end{pmatrix} \qquad (۴)$$

حال با بی بعد نمودن، معادله‌ی (۴) به صورت معادله‌ی (۵) نوشته می‌شود.

$$\frac{A}{H} = \phi\left(\begin{matrix} \frac{U}{\sqrt{gh}}, \frac{UD}{\nu}, \frac{f_s D}{U}, \frac{h_s}{h}, \\ \frac{\lambda}{B}, \frac{D}{T}, \frac{D}{P}, \frac{f_s}{f}, n, N \end{matrix}\right) \qquad (۵)$$

که در رابطه‌ی فوق $\frac{U}{\sqrt{gh}}$ عدد فرود F، $\frac{UD}{\nu}$ عدد رینولدز R و $\frac{f_s D}{U}$ عدد بی‌بعد استروهال S می‌باشد. حال با توجه به این‌که هدف از این پژوهش بررسی خصوصیات موج عرضی در حالت تشدید و حداکثر دامنه‌ی آن می‌باشد، طبق مطالب یادشده، شرط لازم برای این موضوع برابری فرکانس انتشار ورتکس از موانع با فرکانس طبیعی فلوم خواهد بود که در نتیجه‌ی آن مقدار فرکانس نسبی ($\frac{f_s}{f}$) در معادله‌ی(۵) برابر یک می‌شود. درصد استغراق موانع نیز به صورت معادله‌ی (۶) تعریف می‌شود.

$$h_{sp} = \frac{h_s}{h} * 100 \qquad (۶)$$

همچنین با کم اثر بودن عدد فرود و رینولدز موانع در میزان دامنه نسبی و حذف آن‌ها از معادله‌ی (۵) و جای‌گذاری معادله‌ی (۶) به جای نسبت بی‌بعد $\frac{h_s}{h}$ و با استفاده از تئوری باکینگهام و آنالیز ابعادی و با کمک نرم افزار SPSS معادله‌ی (۷) به‌دست می‌آید.

$$\frac{A}{h} = \frac{0.033\left(\frac{\lambda}{B}\right)^{0.14}\left(\frac{D}{T}\right)^{1.4}}{S^2\ h_{sp}^{0.58}} \qquad (۷)$$

در شکل (۵)، دامنه‌ی نسبی به دست آمده از معادله‌ی (۷) با دامنه‌ی نسبی حاصل از آزمایش مقایسه شده است. با توجه به معادله‌ی (۷)، درصد عمق استغراق و عدد استروهال بیشترین اثر را بر روی دامنه نسبی موج عرضی دارد. برای ایجاد این مدل از ۹۰ درصد داده‌های آزمایشگاهی کمک گرفته و از ده درصد مابقی برای صحت سنجی آن استفاده شد. مجذور ضریب همبستگی معادله‌ی (۷) برابر ۰/۸۳۳ می‌باشد. همان‌طور که از پیشینه‌ی پژوهش ارایه شده می‌توان دریافت، تاکنون پژوهشی به طور خاص روی موج عرضی حاصل‌شده از برخورد جریان با موانعی که به تدریج مستغرق می‌گردند، صورت نپذیرفته است. لذا داده‌ها و رابطه‌های ارایه‌شده در این مقاله با نتایج سایر محققین قابل مقایسه نمی‌باشد. البته در مطالعه‌ی Jafari et al. (2010) موج عرضی در حالتی که موانع مستغرق بودند مشاهده شده که نتایج آن با حالت غیرمستغرق به‌طور تجمعی مورد بررسی قرار گرفته است و با یک‌دیگر مقایسه نشده‌اند. همچنین در اکثر پژوهش‌هایی که از موانع به عنوان مدلی از پوشش گیاهی موجود در مسیر جریان استفاده شده است، موانع موجود در جریان به صورت مستغرق هستند، اما هدف از انجام آن‌ها بررسی خصوصیات امواج عرضی نبوده است.

آزمایش‌های این پژوهش در چهار مرحله انجام شد که در هرکدام خصوصیات دو نوع موج عرضی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش اولیه در هر مرحله، آزمایش شاهدی است که ارتفاع موانع برابر با عمق جریانی است که حداکثر دامنه‌ی موج در آن تشکیل می‌شود و از آن به بعد موانع به میزان درصدی از آن مستغرق می‌گردند (جدول ۱). در آزمایش مرحله‌ی سوم به علت محدودیت در ارتفاع موانع استوانه‌ای و فلوم آزمایشگاهی، موج نوع I تشکیل نشد، اما در طی آزمایش‌های مراحل سوم و چهارم که فاصله‌ی بین موانع کمتر و نصف آزمایش‌ها مراحل اول و دوم می‌بود، در بررسی خصوصیات موج عرضی نوع II در شرایط وجود موانع مستغرق، دقیقاً در جایی‌که استوانه‌ها به میزان ۳۰ درصد عمق جریان مستغرق بودند، نوع موج از II به I تغییر یافته و در این مرحله نیز، با افزایش عمق و درصد استغراق از میزان دامنه‌ی موج کاسته می‌شود. با توجه به این که در هر آزمایش عمق متوسط کانال، قطر استوانه‌ها و فاصله‌ی بین آن‌ها ثابت می‌باشد.

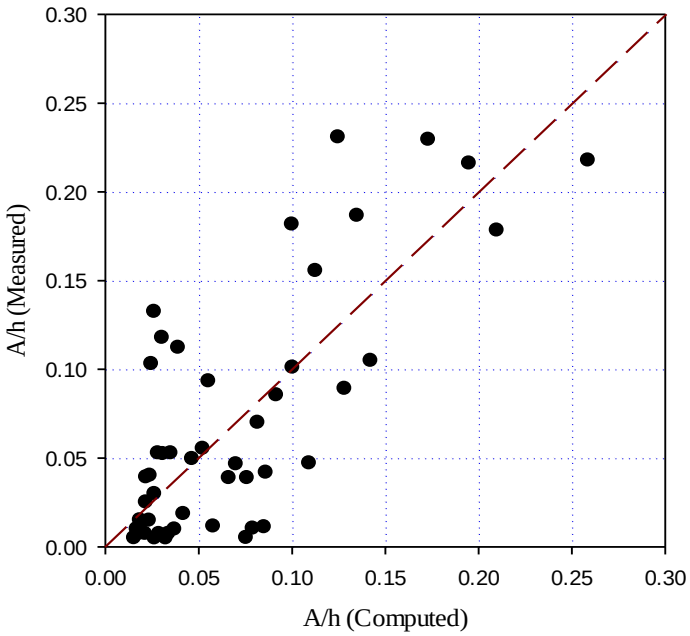


Fig. 5 - Comparison of the relative amplitude obtained from the experimental and calculated results using equation (7)

شکل ۵-مقایسه دامنه‌ی نسبی به‌دست‌آمده از آزمایش و محاسبه‌شده به کمک معادله‌ی (۷)

جدول ۱- خلاصه‌ای از داده‌های مراحل مختلف آزمایشگاهی

Table 1- Summary of data from different laboratory stages

	n	T,P(mm)	A(mm)	f_s	h_{sp}	R	S		n	T,P(mm)	A(mm)	f_s	h_{sp}	R	S
The 1st stage	I	120	11	1.17	0	3474	0.210	The 3rd stage	II	60	48	0.71	0	3276	0.132
	I	120	10	1.19	5	3474	0.213		II	60	44	0.73	5	3276	0.140
	I	120	8	1.18	10	3474	0.212		II	60	47	0.75	10	3276	0.143
	I	120	1	1.2	20	3474	0.216		II	60	48	0.73	20	3276	0.140
	II	120	32	0.73	0	5367	0.085		I	60	24	1.15	30	3276	0.220
	II	120	29.5	0.78	5	5367	0.091		I	60	21	1.18	40	3276	0.225
	II	120	20	0.80	10	5367	0.093		I	60	8	1.17	50	3276	0.224
	II	120	5	0.79	20	5367	0.091	The 4th stage	I	60	12	1.07	0	2492	0.269
The 2nd stage	I	120	3	1.03	0	3423	0.188		I	60	25	1.10	5	2495	0.276
	I	120	10	1.01	5	3423	0.185		I	60	2	1.15	10	2492	0.288
	I	120	1	0.99	10	3423	0.182		II	60	43	0.71	0	3500	0.128
	II	120	27	1.60	0	5166	0.194		II	60	34	0.75	5	3500	0.135
	II	120	15	1.59	5	5166	0.193		II	60	20	0.75	10	3500	0.134
	II	120	4	1.59	10	5166	0.192		II	60	9	0.70	20	3500	0.125
	II	120	1	1.57	20	5166	0.189		II	60	8	0.70	30	3500	0.125

DOI: 10.22055/JISE.2019.14470

در ادامه در شکل‌های (۶) و (۷) تغییرات دامنه‌ی نسبی موج با درصد استغراق موانع مقایسه شده است. با توجه به این نمودارها می‌توان متوجه شد که با افزایش درصد استغراق موانع دامنه موج عرضی کاهش می‌یابد.

در شکل‌های (۸) و (۹) تغییرات دامنه‌ی نسبی موج عرضی با عدد بی‌بعد استروهال در مرحله‌ی اول آزمایش، به عنوان نمونه ارایه شده است. از این نمودارهای این مطلب برداشت می شود که با افزایش عدد استروهال ($\frac{fsD}{U}$) که نتیجه‌ی افزایش فرکانس انتشار موج می‌باشد، دامنه‌ی نسبی موج عرضی نیز کاهش خواهد یافت.

از این جهت می‌توان گفت افزایش عدد استروهال حاصل افزایش فرکانس انتشار موج است، که در هر مرحله از آزمایش‌های این پژوهش قطر موانعD، دبیQ و سرعت جریانU ثابت می‌باشد.

در شکل (۱۰) دامنه‌ی نسبی به‌دست‌آمده از آزمایش‌های حاضر با رابطه‌های پیشنهادی Ghomeshi et al. (2007) و Jafari et al. (2010) مقایسه شده است. همان‌طور که در آن مشخص است، با توجه به این‌که در این پژوهش ارتفاع و عمق متوسط جریان در هر مرحله از آزمایش ثابت بوده و ارتفاع مانع متغیر می‌باشد، نمی‌توان داده‌های به‌دست‌آمده را با تحقیقاتی که شرایط آزمایش‌هایشان عکس این موضوع است، مقایسه نمود.

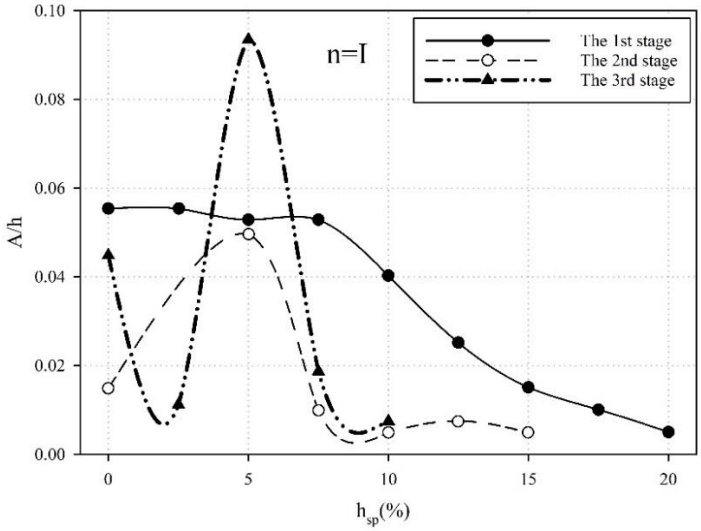


Fig. 6 - Graph of changes in the relative amplitude of the wave compared to the percentage of immersion of obstacles in the type I wave

شکل ٦-نمودار تغییرات دامنه‌ی نسبی موج در مقایسه با درصد استغراق موانع در موج نوع I

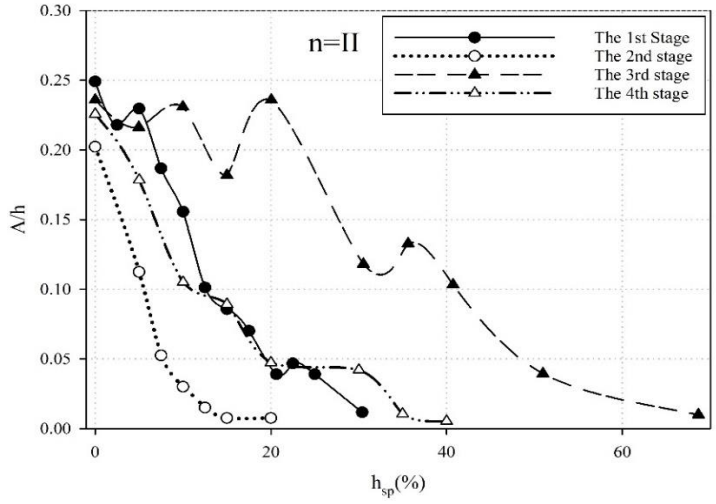


Fig. 7 - Graph of changes in the relative amplitude of the wave compared to the percentage of immersion of obstacles in the type II wave

شکل ۷- نمودار تغییرات دامنه‌ی نسبی در مقایسه با درصد استغراق موانع در موج نوع II

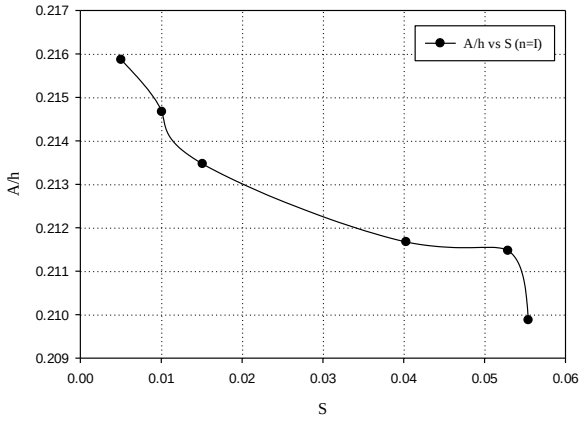


Fig. 8- Diagram of the changes in the relative amplitude of the type I wave relative to the dimensionless number of Strohall in the first stage experiment

شکل ۸- نمودار تغییرات دامنه نسبی موج نوع I نسبت به عدد بی‌بعد استروهال در آزمایش مرحله اول

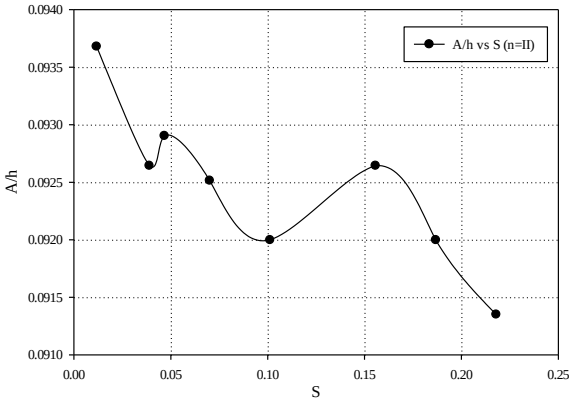


Fig. 9- Diagram of the changes in the relative amplitude of the type II wave relative to the dimensionless number of Strohall in the first stage experiment

شکل ۹- نمودار تغییرات دامنه نسبی موج نوع II نسبت به عدد بی‌بعد استروهال در آزمایش مرحله اول

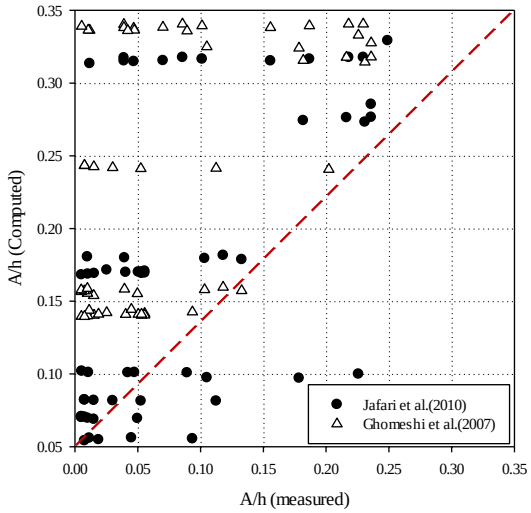


Fig. 10- Comparison of formulas proposed by other researchers with laboratory results of this research

شکل ۱۰-مقایسه‌ی فرمول‌های پیشنهادی سایر محققین با نتایج آزمایشگاهی این پژوهش

DOI: 10.22055/JISE.2019.14470

نتیجه‌گیری

آزمایش‌ها در این پژوهش در یک فلوم به طول شـــش متر و عرض ۷۵ ســانتی‌متر و با موانعی اســتوانه‌ای شــکل به طول ۳۰ ســانتی‌متر و قطر ۲۵ میلی‌متر، انجام پذیرفت. آزمایش‌ها در چهار مرحله تعریف شـــده بودند که اختلاف آن ها در نحوه‌ی چینش مجموعه‌ی ا ستوانه‌ها در مسیر جریان به صورت موازی و زیگزاگی و دیگری در فا صله‌ی بین ا ستوانه‌ها (۱۲۰ و ۶۰ میلی‌متر) بود. در ابتدای هر مرحله مشخصات موج عرضی تشکیل‌شده در اثر برخورد جریان با موانع به‌صـــورت غیرمســـتغرق را در دو نوع I و II ثبت نموده، سپس عمق جریان را ثابت نگه‌داشته و آن‌گاه مرحله‌به‌مرحله اســتوانه‌ها به میزان درصــدی از عمق متوســط جریان مســتغرق گردیدند. در این هنگام مشخصات موج عرضی تشکیل‌شده ثبت و روند تغییر خصوصیات آن مورد بررسی قرار گرفت.

در نهایت نیز با تجزیه‌وتحلیل داده های جمع‌آوری‌شـــده، رابطه‌ای برای پیش‌بینی و تخمین مشـــخصـــات موج عرضـــی در شرایط آزمایشگاهی این پژوهش مطابق معادله‌ی (۷) ارایه گردید و به‌طورکلی با توجه به شـــکل‌های (۶) تا (۹) به جزء موارد اســـتثنا رخ‌داده در مراحل ســه و چهار آزمایش، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش عمق اســـتغراق موانع، مد (نوع)، دامنه و فرکانس موج عرضی نیز کاهش پیدا می‌کند. بیشترین درصد استغراق مربوط به آزمایش مرحله ســوم بود که با وجود اســتغراق ۶۸/۶ درصــد موج عرضی نوع I با دامنه دو میلی‌متر تشکیل گردید.

تقدیر و تشکر

نویسندگان برای انجام این تحقیق از اعتبار پژوهانه به شماره ۲۶۲۴۷/۰۲/۳/۹۷ استفاده نموده اند لذا از دانشگاه شهید چمران اهواز به جهت حمایت از این مطالعه تشکر و قدردانی می گردد.

Refrences

1-Dean, R. G. and Dalrymple, R. A. 1984. *Water wave mechanics for engineers and scientists. Advanced series on ocean engineering* (4 vols). London: World Scientific Press.

2-Ghomeshi, M., Mortazavi-Dorcheh, S. A. and Falconer, R. 2007. Amplitude of wave formation by vortex shedding in open channels. *Journal of Applied Sciences, Asian Network for Scientific Information, 24(7)*, pp. 3927-3934.

3-Howes, A. M. 2011. *Canal wave oscillation phenomena due to column vortex shedding.* Master of Science Thesis, Utah State University, Logan, Utah.

4-Jafari, A., Ghomeshi, M., Bina, M. and Kashefipour, S. M. 2010. Experimental study on ten modes of transverse waves due to vertical cylinders in open channels. *journal of food, agriculture and environment, 8(2)*, pp. 949-955.

5-Meile, T., Boillat, J.-L. and Schleiss, A. J. 2011. Water-surface oscillations in channels with axi-symmetric cavities. *Journal of Hydraulic Research, 49(1)*, pp. 73-81.

6-Mostafavi, S., Ghomeshi, M. and Shahmoradi, B. 2015. Study of maximum relative amplitude formation due to vortex shedding of submerged obstacles. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering, 39(3)*, pp. 209-215. (in Persian).

7-Sarkar, A. 2012. Vortex-excited transverse surface waves in an array of randomly placed circular cylinders. *ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, 138(7)*, pp. 610-618.

8-Schuster, J., C. 1967. *Canal Capacity studies, Wave formation by bridge piers*. Denver, Colorado: U.S.Department of the interiorHYD-485).

9-Sumer, B., Mtlu and Fredsoe, J. 1997. *Hydrodynamics around cylindrical structuresby. Advanced series on ocean Eengineering* (12 vols). London: World Scientific Publishing Co.

10-Zhao, K., Cheng, N.-S., Wang, X. and Tan, S. K. 2014. Measurements of fluctuation in drag acting on rigid cylinder array in open channel flow. *ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, 140(1)*, pp. 48-55.

11-Zima, L. and Ackermann, N. L. 2002. Wave generation in open channels by vortex shedding from channel obstructions. *ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, 128(6)*, pp. 596-603.