

Experimental Investigation of the Effect of Transverse Waves 1, 2 and 3 Modes Caused by Cylindrical Pier Groups of the Bridge on Local Scour

Kimiya Kamaei¹, Mehdi Ghomeshi^{2*}, Mehdi Daryaei³, Seyed Mahmoud Kashefipour²

1- Ph.D Candidate, Department of Water Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

2- Professor, Department of Water Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

3- Associate Professor, Department of Water Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

* ghomeshi@scu.ac.ir

Received: 3 June 2023
Accepted: 14 August 2023
Discussion: 21 June 2024



J. Hydraul.
Iranian Hydraulic Association
Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: The passage of water through obstacles such as bridge piers in river, dock piers in the sea, and piers of various hydraulic structures in open channels causes the formation of a boundary layer upstream of these obstacles and the separation of flow lines downstream. This separation results in the formation of vortex flows. The overlapping vortices created by each obstacle give rise to surface waves, which propagate in a direction perpendicular to the flow. In specific conditions, when the vortex frequency matches the natural frequency of the structure's oscillation, a resonance mode is established, producing transverse waves with maximum amplitude across the flume width. The formation of transverse waves with maximum amplitude can affect the safety and stability of hydraulic structures including bridge piers. To this end, recognizing transverse waves can reveal the reasons for the occurrence of some phenomena. Most studies on transverse waves have been conducted in a flume with limited width and a few waves. This study, however, seeks to explore the impact of waves in various modes on local scour around cylindrical bridge piers by conducting experiments in a wider flume and generating a greater number of waves.

Methodology: The experiments were carried out in the Physical and Hydraulic Modeling Laboratory of the Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz, using a rectangular flume with a length of 16 m, a width of 1.25 m, a height of 0.6 m, and a zero slope with glass walls. The flume bed was covered with sediments with an average size of $d_{50} = 0.7$ mm. The experiments were conducted with cylindrical pier groups in three stages. The experiments in the first stage were carried out without sediments and the cylindrical piers were placed on a fixed bed without sediments. The first stage experiments aimed to measure the wave parameters (wave amplitude, wave frequency, and flow depth) in the resonance.

During the second stage, experiments involving sediment were carried out alongside the formation of transverse waves. Following the adjustment of the water level and the generation of the intended wave, a period of 4 hours was allotted for equilibrium. Subsequently, the pump was turned off, and the end weir was gradually opened. After the complete discharge of the flow, the topography of the bed was measured using a laser meter with an accuracy of 1 mm as 1×1 cm². The sediment

experiments were in the third stage with the removal of transverse waves (control experiments) which were performed to compare with the results of the second stage experiments. A glass sheet was used for this purpose. The glass sheet prevented matching the natural frequency of the channel and the frequency caused by the tier vortex.

Results and Discussion: To investigate the effects of transverse waves caused by cylindrical piers on the maximum scour depth, each scour in the experiment with transverse waves was compared with the corresponding experiment conducted without transverse waves. The results showed that in wave modes 1, 2, and 3, the maximum scour depth was greater in the case with waves than in the case without waves. The maximum scour depth in wave mode 1 experiments at Froude numbers 0.059, 0.057, and 0.055 was 71, 55, and 54 percent higher than the scour depth in the experiments without waves, and for wave mode 2, the maximum scour depth in the experiments with waves at Froude numbers of 0.117, 0.110 and 0.106 was 90, 76 and 66 percent higher than the maximum scour depth in the experiments conducted without waves. The maximum scour depth in the wave mode 3 experiments with waves at Froude numbers of 0.156 and 0.151 was 70 and 68 percent was higher than the scour depth in the experiments without waves. This study also examined the effect of wave mode on the maximum scour depth. The results indicated that with an increase in the wave number, the maximum scour depth increased in each discharge. On average, the maximum scour depth in wave mode 3 increased by 130 percent compared to wave mode 1 and by 43 percent compared to wave mode 2, and the maximum scour depth in wave mode 2 increased by 60 percent compared to wave mode 1. Also, the maximum scour depth in each wave mode increased with an increase in the wave amplitude, indicating the existence of a direct relationship between the wave amplitude and the maximum scour depth. In addition to the maximum scour depth, transverse waves also affected the scour volume, which was greater in the experiments conducted with waves than in the experiments without waves. On average, the scour volume was 4.3 times in wave mode 1, 3.5 times in wave mode 2, and 9 times in wave mode 3 compared to the wave-free mode.

Conclusion: The present study examined the effect of transverse waves mode 1, 2, and 3 on local scour around cylindrical piers of the bridge. It was observed that the formation of transverse waves affected the scouring of cylindrical piers, and the maximum scour depth in the experiments conducted with waves was greater than in the experiments without waves. Specifically, the maximum scour depth increased by an average of 60 percent, 78 percent, and 69 percent in wave modes 1, 2, and 3, respectively, compared to the wave-free scenario. Moreover, an increase in the wave number, led to a corresponding increase in the maximum scour depth for each discharge level, with the highest and lowest scour depths occurring in wave modes 3 and 1, respectively. In terms of scour volume, the trends mirrored those of the maximum scour depth. On average, the scour volume was 4.3 times in wave mode 1, 3.5 times in wave mode 2, and 9 times in wave mode 3 compared to the wave-free mode.

Keywords: Transverse waves, Resonance, In-line arrangement, Scour, Bridge pier.



© 2024 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 موج‌های عرضی نوع ۱، ۲ و ۳ ناشی از گروه پایه استوانه‌ای پل بر آبشستگی موضعی


کیما کمائی^۱، مهدی قمشی^{۲*}، مهدی دریائی^۳، سید محمود کاشفی پور^۲

۱- دانشجو دکتری، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۲- استاد، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

*ghomeshi@scu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۱۳، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۳، نقد و بررسی: ۱۴۰۳/۰۴/۰۱  وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: موج‌های عرضی در اثر عبور جریان سیال از پیرامون موانعی مانند پایه‌های پل در رودخانه، پایه‌های اسکله در دریا و پایه‌های هر سازه هیدرولیکی دیگر که در یک مجرای روباز قرار دارند ایجاد می‌شود. آبشستگی پایه‌های پل یکی از مسئله‌های مهم در هیدرولیک پل‌ها می‌باشد، بنابراین بررسی آبشستگی پیرامون پایه‌های پل دارای اهمیت بالایی است. در این تحقیق به بررسی تأثیر موج‌های عرضی نوع یک، دو و سه در حالت تشدید بر آبشستگی موضعی پیرامون پایه‌های استوانه‌ای پل پرداخته شد. آزمایش‌ها با گروه پایه استوانه‌ای در آرایش موازی و فاصله طولی و عرضی بدون بعد $4/8$ در سه مرحله، در یک فلوم به طول 16 متر، عرض $1/25$ متر و ارتفاع $0/6$ متر انجام شد. سرعت نسبی (U/U_c) در آزمایش‌ها بین $0/431$ تا $0/871$ متغیر بود. نتایج نشان داد که تشکیل موج‌های عرضی بر آبشستگی پایه‌های استوانه‌ای تأثیرگذار بود و عمق بیشینه آبشستگی در آزمایش‌های با موج بیشتر از آزمایش‌های بدون موج بود و به‌طور میانگین عمق بیشینه آبشستگی 60 درصد در موج نوع یک، 78 درصد در موج نوع دو و 69 درصد در موج نوع سه نسبت به حالت بدون موج افزایش یافت. در هر سه نوع موج، با افزایش دامنه موج عمق بیشینه آبشستگی افزایش یافت. تغییرات حجم آبشستگی روندی همانند تغییرات عمق بیشینه آبشستگی داشت و حجم آبشستگی در آزمایش‌های با موج بیشتر از آزمایش‌های بدون موج بود.

کلید واژگان: موج‌های عرضی، تشدید، آرایش موازی، آبشستگی، پایه پل.

۱- مقدمه

ناشی از گرداب موانع با بسامد طبیعی نوسان سازه برابر شود، حالت تشدید^۲ ایجاد شده و موج‌های عرضی با بیشینه دامنه در عرض فلوم شکل می‌گیرد (Jafari and Ghomeshi., 2011). در فلوم آزمایشگاهی که دیواره جریان بسته و ثابت است پدیده تشدید را می‌توان به‌شکل یک موج مکانیکی عرضی کامل و ایستا در حالت‌های مختلف مشاهده کرد. در شکل ۱، سه حالت موج عرضی که در این تحقیق بررسی شده، نشان داده شده است که در آن A دامنه موج^۳ (بیشینه جابه‌جایی سطح آب در دیواره آبراهه) و H عمق میانگین جریان است. در این

موج‌های عرضی^۱ پدیده‌ای هیدرودینامیکی است که در مجاری روباز در نتیجه عبور جریان سیال از پیرامون موانعی که در مسیر جریان قرار گرفته‌اند، ایجاد می‌شود. به‌عبارتی عبور جریان آب از میان موانع سبب شکل‌گیری لایه مرزی در بالادست موانع و جداسازی خطوط جریان در پایین‌دست موانع و ایجاد جریان‌های گردابی می‌شود. از همپوشانی گرداب‌های ایجاد شده از هر کدام از موانع، موج‌های سطحی که راستای انتشارشان عمود بر جهت جریان است تشکیل می‌شود. در شرایط خاصی که بسامد

2 Resonance
3 Wave amplitude

1 Transverse waves

شده‌اند. به‌عنوان مثال نخستین بار تأثیر متقابل جریان و سازه بر روی یکدیگر بر اثر پدیده خرابی پل تاکومانروز در سال ۱۹۴۰ مورد توجه قرار گرفت که دلیل آن عبور جریان هوا از بین پایه‌های پل و تولید گردابه بود (Zima and Ackerman., 2002).



Fig. 2 Collapse of Tacoma Narrows Bridge due to oscillation and vortex shedding by the interaction of air fluid with structure

شکل ۲ تخریب پل تاکومانروز در نتیجه نوسان و انتشار گردابه ناشی از تعامل سیال هوا با سازه

همچنین پدیده موج‌های عرضی توسط پایه‌های پل در آبراهه دلتا مندوتا در سال ۱۹۶۷ رخ داد که با حمایت و تصمیم اداره عمران و آبادی ایالات متحده آمریکا اقدام به ساخت و بررسی مدل آزمایشگاهی شد که Schuster (1967) به‌وسیله دو سری از پایه‌ها، نوسان‌های ناشی از پایه‌های پل را بررسی کرد. او در تحقیق خود سعی کرد اثرگذاری‌های زیانبار موج را کاهش و آن را به‌طور کامل حذف کند. نمونه دیگری از رخداد پدیده موج‌های عرضی پل I-84 است که روی آبراهه نیویورک تأسیس شد. در طی نخستین فصل آبیاری پس از ساخت پل، نوسان‌های سطحی مشاهده شد. نوسان‌های موج باعث آبشستگی و فرسایش ساحل‌های بالادست و پایین‌دست آبراهه و تکیه‌گاه‌های پل خیابان رایت که در پایین‌دست پل I-84 بود، شد (Robison., 2010). تشکیل موج‌های عرضی با بیشینه دامنه می‌تواند ایمنی و پایداری سازه‌های هیدرولیکی از جمله پایه‌های پل را تحت تأثیر قرار دهد. هرچه دامنه موج بزرگتر و بسامد انتشار آن کوچکتر باشد قدرت موج تولیدشده و تأثیرگذاری آن بر سازه‌های پیرامون خود بیشتر می‌شود (Shahkarami and

شکل، موج نوع یک ($n=1$) دارای یک گره، موج نوع دو ($n=2$) دارای دو گره و موج نوع سه ($n=3$) دارای سه گره می‌باشد (Mostafavi et al., 2017).

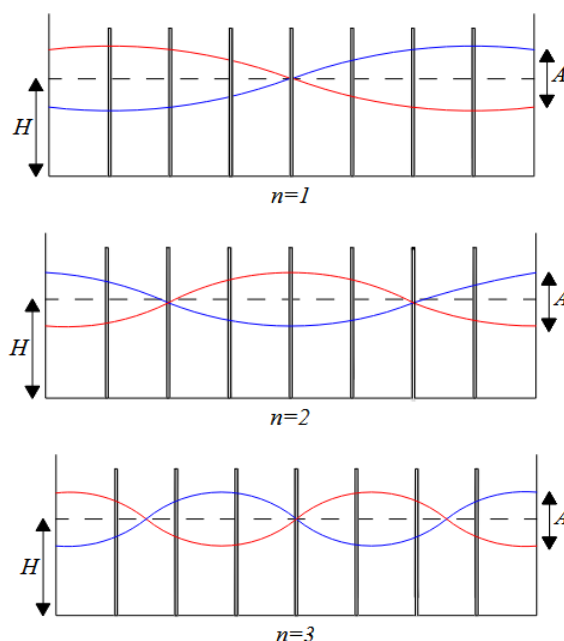


Fig. 1 Different modes of transverse wave formed in this study

شکل ۱ حالت‌های مختلف موج عرضی تشکیل‌شده در این تحقیق

موج‌های عرضی دارای طول موج هستند که رابطه بین طول موج (λ)، عرض فلوم (b) و نوع موج (n) به‌شکل زیر بیان می‌شود (Jafari et al., 2011):

$$\lambda = \frac{2b}{n} \quad (1)$$

تحقیقات انجام شده در زمینه موج‌های عرضی طی چند سال گذشته با هدف شناسایی عامل‌های مؤثر بر آنها و یافتن راه‌حلی برای رفع این مسئله بوده است. از سویی تا کنون بررسی‌های محدودی در زمینه اثر موج‌های عرضی بر آبشستگی موضعی پیرامون پایه‌های پل انجام شده است، بنابراین در این بخش در آغاز به نتایج بررسی‌های صورت‌گرفته مربوط به موج‌های عرضی اشاره می‌شود سپس به بررسی‌های انجام شده در زمینه آبشستگی موضعی پایه‌های پل پرداخته می‌شود. تا کنون موج‌های عرضی در بعضی از سامانه‌های واقعی مشاهده

(Amini and Eghbalzadeh (2012) در یک تحقیق آزمایشگاهی به بررسی تأثیر چگونگی آرایش گروه شمع‌ها در پایه‌های پل بر عمق آبشستگی پرداختند و به این نتیجه دست یافتند که با افزایش شماره شمع‌ها تا ۵ ردیف در جهت جریان، عمق آبشستگی افزایش می‌یابد و بیشتر از این شماره ردیف پایه، تغییرات عمق آبشستگی ناچیز است. همچنین بیشترین عمق آبشستگی در بالادست گروه پایه‌ها و در ردیف اول رخ می‌دهد. (Rashno et al. (2016) در تحقیق خود به بررسی آبشستگی گروه پایه‌های دوتایی و سه‌تایی استوانه‌ای با تغییر در فاصله بین پایه‌ها و تغییرات زاویه برخورد جریان پرداختند. فاصله بین پایه‌ها از ۲ تا ۱۰ برابر قطر پایه و زاویه برخورد جریان به پایه‌ها از صفر تا ۹۰ درجه متغیر بود. نتایج بررسی‌های آنان نشان داد که در گروه پایه دوتایی عمق بیشینه آبشستگی پیرامون پایه اول و دوم، با افزایش فاصله بین پایه‌ها در آغاز افزایش یافته و پس از آن کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش زاویه برخورد جریان از صفر تا ۹۰ درجه، عمق بیشینه آبشستگی پایه دوم ۱۴ درصد افزایش می‌یابد.

(Soltani et al. (2022) در یک تحقیق آزمایشگاهی به بررسی آبشستگی موضعی پیرامون پایه‌های مکعبی در حالت برخورد جریان به رأس، هم در بودن و هم در نبودن موج‌های عرضی پرداختند. آنان در آزمایش‌های خود از گروه پایه‌هایی با سه فاصله عرضی مختلف استفاده کردند و تنها موج نوع یک را مشاهده کردند. نتایج بررسی‌های آنان نشان داد که عمق بیشینه آبشستگی و حجم آبشستگی در بودن موج بیشتر از نبودن موج است و محل عمق بیشینه آبشستگی در آزمایش‌های با موج همانند با آزمایش‌های بدون موج بود. همچنین در هر گروه پایه، چاله آبشستگی پیرامون ردیف اول پایه‌ها بزرگتر و عمیق‌تر از پایه‌های پایین‌دست بود. (Salemi et al. (2023) در تحقیقی همانند به بررسی آبشستگی موضعی پیرامون پایه‌های استوانه‌ای در بودن و نبودن موج‌های عرضی پرداختند. آنان نیز در آزمایش‌های خود از گروه پایه‌هایی با سه فاصله عرضی مختلف استفاده کردند و در آزمایش‌های خود موج نوع یک و در بعضی از آزمایش‌ها موج نوع دو را مشاهده کردند. نتایج بررسی‌های آنان نشان

(Moghaddasi., 2018).

تا کنون تحقیقات فراوانی در رابطه با تشکیل گردابه و تشدید در برخورد سیال‌ها (گازها و مایع‌ها) با موانع مختلف انجام شده است. (Wang and Zhou (2005) روی ویژگی‌های موج‌های تولید شده از گرداب پشت موانع قابل ارتجاع در تکیه‌گاه‌های ثابت تحقیقاتی را انجام دادند که نتایج بررسی‌های آنان نشان داد دامنه موج‌ها در موانع با مقطع مربعی دو برابر دامنه موج‌های تولید شده در موانع با مقطع دایره‌ای است. (Howes (2011) پایان‌نامه کارشناسی ارشد خود را در دانشگاه ایالتی یوتای ایالات متحده آمریکا برای ارائه نتایج کاربردی از بررسی مدل آزمایشگاهی پل I-84 معطوف ساخت. او در بخشی از آزمایش‌های خود به بررسی تأثیر زاویه شیب کناری دیواره آبراهه پرداخت و به این نتیجه دست یافت که دیواره‌های با زاویه نزدیک به قائم عرض سطح آب را کاهش داده و در نتیجه آن دامنه نوسان‌های موج‌های عرضی را افزایش می‌دهد. (Purmohammadi et al. (2015) به بررسی تأثیر شکل موانع بر ویژگی‌های موج‌های عرضی پرداختند که برای این منظور از موانع استوانه‌ای و مثلثی در دو حالت برخورد جریان به رأس و برخورد جریان به ضلع در آرایش موازی و فاصله‌های طولی و عرضی متفاوت استفاده کردند. نتایج بررسی‌های آنان نشان داد که بیشترین میزان دامنه نسبی موج عرضی برابر ۶۱ درصد برای موانع استوانه‌ای در فاصله طولی ۱۲۰ و عرضی ۶۰ میلی‌متر بود و کمترین میزان دامنه نسبی موج عرضی برابر ۳/۴۶ درصد برای موانع مثلثی در حالت برخورد جریان به رأس در فاصله طولی ۱۲۰ و عرضی ۶۰ میلی‌متر بود. (Moghaddasi and Ghomeshi (2021) در یک تحقیق آزمایشگاهی به بررسی ویژگی‌های موج‌های عرضی در حالت مستغرق در آرایش موازی و زیگ‌زاگ پرداختند. برای این منظور از موانع استوانه‌ای به قطر ۲۵ میلی‌متر استفاده کردند و در آزمایش‌های خود موج نوع یک و دو را مشاهده کردند. نتایج بررسی‌های آنان نشان داد که با افزایش عمق استغراق موانع، دامنه و بسامد موج کاهش پیدا می‌کند. همچنین یک رابطه برای تعیین دامنه نسبی موج در حالت تشدید ارائه دادند.

۴۵ سانتی‌متر استفاده شد. برای تثبیت پایه‌ها در مسیر جریان، از یک صفحه پلکسی‌گلاس به طول ۱/۳ متر و عرض ۱/۲۴ متر که در قسمت میانی فلوم نصب شده بود، استفاده شد. به این صورت که همه سطح صفحه پلکسی‌گلاس با فاصله‌های طولی و عرضی ۶ سانتی‌متر شبکه‌بندی و سپس رزوه شد تا بتوان پایه‌ها را روی آن پیچ نمود. پایه‌ها به صورت آرایش موازی، در فاصله طولی و عرضی بدون بعد $4.8) T/D=$ که T فاصله بین پایه‌ها و D قطر پایه‌ها است) مورد آزمایش قرار گرفتند. فاصله‌های طولی و عرضی در این تحقیق به صورت فاصله مرکز به مرکز پایه‌ها است.

بستر فلوم با رسوب‌های با اندازه میانگین $d_{50} = 0.7 \text{ mm}$ پوشیده شد. انحراف معیار هندسی ذرات بستر $(\sigma_g = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}})$ برابر ۱/۲۶ بود که نشان‌دهنده یکنواختی رسوب‌های بستر است.

آزمایش‌ها با گروه پایه استوانه‌ای در سه مرحله انجام شد. آزمایش‌های مرحله اول حالت بدون رسوب بود و پایه‌های استوانه‌ای بر روی بستر ثابت بدون رسوب قرار گرفتند که هدف از انجام آزمایش‌های مرحله اول تعیین فراسنجه‌های موج (دامنه موج، بسامد موج و عمق جریان) در حالت تشدید بود. آزمایش‌های مرحله دوم حالتی بود که پایه‌های استوانه‌ای بر روی بستر رسوبی قرار گرفتند و در این مرحله آزمایش‌های رسوبی به همراه تشکیل موج‌های عرضی انجام شد. آزمایش‌های مرحله سوم، آزمایش‌های رسوبی با حذف موج‌های عرضی بود که برای مقایسه با نتایج آزمایش‌های مرحله دوم انجام شد.

برای تعیین زمان تعادل آزمایش‌های رسوبی، آزمایشی ۳۶۰ دقیقه‌ای برای بیشینه دبی ۳۸ لیتر بر ثانیه و موج نوع دو انجام شد و عمق آبشستگی در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری شد که شکل ۳ نتایج این آزمایش را نشان می‌دهد. در این شکل محور عمودی نشان‌دهنده عمق آبشستگی بدون بعد و محور افقی نشان‌دهنده زمان انجام آزمایش است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود در لحظه‌های اولیه آزمایش، روند تغییرات عمق آبشستگی زیاد بوده اما با گذشت زمان کاهش یافت و ۹۸ درصد عمق بیشینه آبشستگی در ۲۴۰ دقیقه اول رخ داده است

داد افزون بر اینکه عمق بیشینه آبشستگی و حجم آبشستگی در بودن موج بیشتر از نبودن موج است در آزمایش‌های با موج نیز عمق بیشینه آبشستگی در موج نوع دو بیشتر از موج نوع یک است. همچنین با افزایش شماره پایه‌ها در هر ردیف، دامنه موج و عمق بیشینه آبشستگی نیز افزایش یافت.

تشکیل موج‌های عرضی می‌تواند آبشستگی موضعی پیرامون پایه‌های پل را تحت تأثیر قرار دهد و با توجه به اینکه بیشتر بررسی‌های صورت گرفته در زمینه موج‌های عرضی در فلوم با عرض محدود و شماره موج‌های کمتر صورت گرفته است در این تحقیق سعی بر این بوده که با انجام آزمایش‌ها در یک فلوم عریض و ایجاد شماره موج‌های بیشتر، به بررسی و شناخت تأثیر موج در حالت‌های مختلف بر آبشستگی موضعی پیرامون پایه‌های استوانه‌ای پل پرداخته شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی دانشکده مهندسی آب و محیط زیست دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. بدین منظور از یک فلوم مستطیلی به طول ۱۶ متر، عرض ۱/۲۵ متر، ارتفاع ۰/۶ متر و شیب صفر با دیواره‌های شیشه‌ای استفاده شد. فلوم در انتها مجهز به یک سرریز بود که برای تنظیم سرعت و عمق جریان آب برای تشکیل موج‌های عرضی در حالت‌های مختلف از آن استفاده شد. جریان آب ورودی به فلوم از یک استخر به وسیله پمپ تأمین شد. برای اندازه‌گیری دبی جریان ورودی از یک سنج الکترومغناطیس دیجیتال (مدل RPOMAG 53 با دقت $\pm 0.001 \text{ lit/s}$) در ورودی فلوم استفاده شد. دبی جریان مورد نظر با کنترل شیر کشویی در ورودی فلوم تنظیم شد. دبی جریان در آزمایش‌ها بین ۳۰ تا ۳۸ لیتر بر ثانیه متغیر بود. به منظور از بین بردن آشفتگی جریان ورودی و تطبیق سریع‌تر جریان به شرایط حاکم بر فلوم، یک صفحه مشبک فلزی در قسمت میانی همگرای ورودی نصب شد. در این تحقیق از پایه‌های استوانه‌ای چوبی به قطر ۲/۵ سانتی‌متر و ارتفاع

به کلی حذف می‌شد. همه مرحله‌های یاد شده برای تشکیل موج نوع دو و سه تکرار شد. با استفاده از یک زمان‌سنج، زمان ۱۵ نوسان موج برای محاسبه بسامد ناشی از گردابه پایه‌ها ثبت شد.

در آزمایش‌های مرحله دوم، پایه‌های استوانه‌ای روی بستر رسوبی به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر قرار گرفتند که رسوب‌های بستر پیش از آغاز هر آزمایش تراز می‌شد. در این مرحله که آزمایش‌های رسوبی به همراه تشکیل موج‌های عرضی بود در آغاز فلوم با دبی کم جریان پر می‌شد تا به عمق مورد نظر برای تشکیل موج برسد. سپس سرریز انتهایی فلوم به گونه‌ای تنظیم می‌شد که سطح آب هم‌تراز با سطح آب در آزمایش‌های مرحله اول قرار گیرد. پس از تنظیم سطح آب و تشکیل موج مورد نظر، ۴ ساعت زمان تعادل در نظر گرفته می‌شد، سپس پمپ خاموش و سرریز انتهایی به آرامی باز می‌شد. همچنین سه شیر تخلیه هم که در انتهای بازه رسوب‌ها قرار داده شده بود باز می‌شد تا آب موجود در فلوم به آرامی زهکشی شده تا بر ناهمواری‌های بستر تأثیر نگذارد. پس از تخلیه کامل جریان، ناهمواری‌های بستر به وسیله متر لیزری مدل DFF03-80 با دقت ۱ میلی‌متر به صورت $1 \times 1 \text{ cm}^2$ برداشت شد.

آزمایش‌های مرحله سوم، آزمایش‌های رسوبی با حذف موج‌های عرضی (آزمایش‌های شاهد) بود که برای این منظور از ورق شیشه‌ای به طول ۱۲۵ سانتی‌متر، عرض ۶۰ سانتی‌متر و ضخامت $0.4/$ سانتی‌متر استفاده شد. به عبارتی ورق شیشه‌ای مانع از تطبیق بسامد طبیعی آبراهه و بسامد ناشی از گردابه پایه‌ها می‌شد. برای حذف موج عرضی یک و دو از یک ورق شیشه‌ای و برای حذف موج عرضی نوع سه از دو ورق شیشه‌ای استفاده شد. موقعیت قرارگیری ورق شیشه‌ای که با استفاده از آزمون و خطا تعیین شده بود در شکل ۵ نشان داده شده است. لازم به یادآوری است که همه مرحله‌های یاد شده برای انجام آزمایش‌های مرحله دوم برای آزمایش‌های مرحله سوم انجام شد. همچنین عمق و دبی جریان در آزمایش‌های بدون موج همانند با آزمایش‌های با موج بود. همه آزمایش‌ها در فاصله عرضی بدون بعد $4/8$ ، دبی 30 ، 34 و

و پس از 240 دقیقه افزایش عمق آبشستگی نزدیک به صفر بوده، بنابراین زمان تعادل برای هر آزمایش رسوبی به مدت 240 دقیقه در نظر گرفته شد.

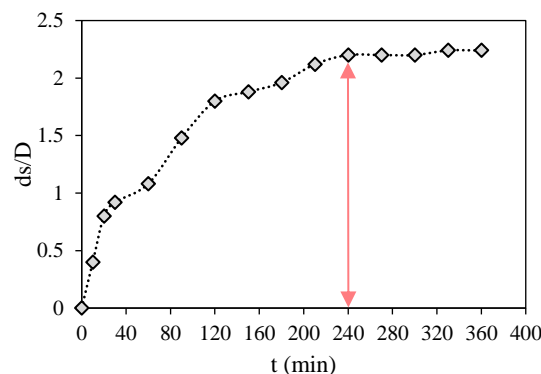


Fig. 3 Variations of scour depth versus time for discharge of 38 lit/s and wave mode 2

شکل ۳ تغییرات عمق آبشستگی در مقابل زمان برای دبی ۳۸ لیتر بر ثانیه و موج نوع دو

۲-۲- چگونگی انجام آزمایش‌ها

برای انجام آزمایش‌های مرحله اول در آغاز، جریان به درون فلوم وارد می‌شد. سرریز تا اندازه‌ای بالا آورده می‌شد که ارتفاع آب تا لبه بالایی پایه‌های استوانه‌ای قرار گیرد. سپس به تدریج سرریز پایین آورده می‌شد تا موج نوع یک با دامنه کم آغاز به نوسان کند، با پایین آوردن تدریجی سرریز، موج تشکیل شده شکل روشن تری به خود می‌گرفت و دامنه آن به تدریج افزایش می‌یافت تا دامنه نوسان موج نوع یک بیشینه شود (شکل ۴). بنابراین اندازه‌گیری‌ها با آغاز نوسان‌های موج نوع یک آغاز می‌شد. در آزمایش‌ها، به ازای هر ارتفاع سرریز در طول ناحیه مانع‌گذاری، بالاترین و پایین‌ترین سطح آب در طول یک نوسان روی دیواره فلوم خوانده شد تا دامنه موج و میانگین عمق جریان تعیین شود. برای اندازه‌گیری این دو فراسنجه از خط-کش‌های مدرج میلی‌متری روی دیواره فلوم که در سه مقطع ابتدایی، میانی و انتهایی بازه نصب پایه‌ها قرار داده شده بودند، استفاده شد. در ادامه به‌رغم پایین آوردن بیشتر ارتفاع سرریز و افزایش سرعت جریان، دامنه موج نوع یک رو به کاهش می‌گذارد. به عبارتی دامنه موج، با پایین آوردن بیشتر ارتفاع سرریز در جهت عکس حالت اولیه آغاز به کاهش می‌کرد و در نهایت موج نوع یک

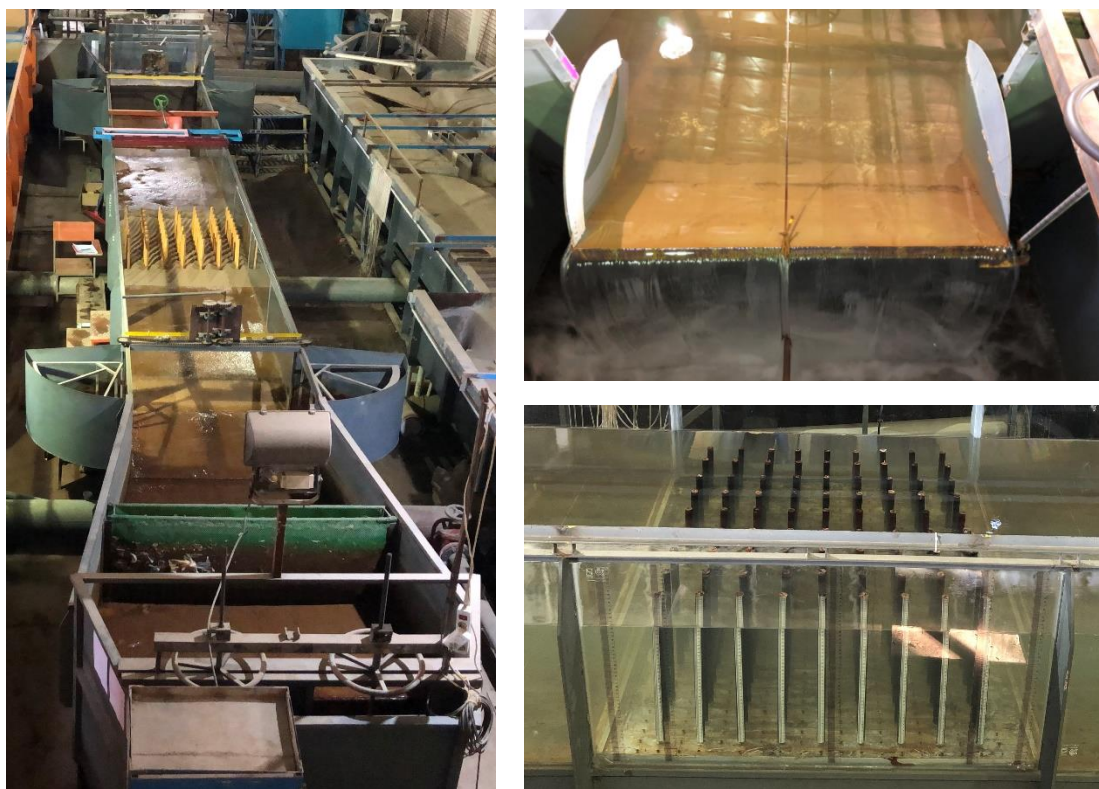


Fig. 4 A view of the flume, end weir and in-line arrangement of the cylindrical piers
 شکل ۴ نمایی از فلوم، سرریز انتهایی و آرایش موازی پایه‌های استوانه‌ای

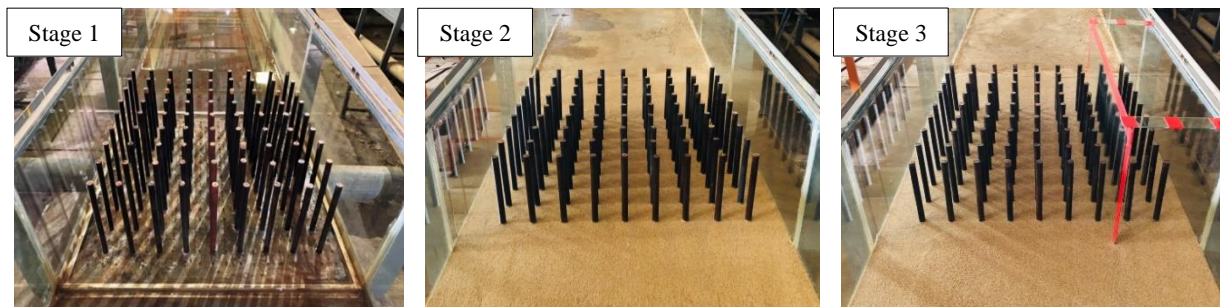


Fig. 5 Arrangement of cylindrical piers in the first (transverse waves), second (sediment with transverse waves) and third (sediment without transverse waves) stage
 شکل ۵ آرایش پایه‌های استوانه‌ای در مرحله اول (موج‌های عرضی)، دوم (رسوب به همراه موج‌های عرضی) و سوم (رسوب بدون موج‌های عرضی)

موضعی پیرامون پایه‌های استوانه‌ای پل می‌باشد که در جدول ۱ خلاصه‌ای از نتایج آزمایش‌ها در دو حالت با موج و بدون موج ارائه شده است. در این جدول، Q دبی جریان ورودی بر حسب لیتر بر ثانیه و n نوع موج می‌باشد که برای حالت شاهد از شماره موج به همراه علامت * استفاده شد. به عنوان مثال برای نشان دادن موج نوع یک از 1 و حالت شاهد آن از 1^* استفاده شد. H عمق میانگین جریان بر حسب میلی‌متر، A دامنه موج بر حسب میلی‌متر، A/H

۳۸ لیتر بر ثانیه و موج نوع یک، دو و سه انجام شدند. در هر مرحله از آزمایش‌ها، ۸ آزمایش انجام شد که در بخش موج‌های عرضی بدون رسوب ۸ آزمایش و در بخش رسوبی ۱۶ آزمایش برای دو حالت با موج و بدون موج انجام شد.

۳- نتایج و بحث

همان‌طور که عنوان شد هدف از این تحقیق، بررسی تأثیر موج‌های عرضی در حالت‌های مختلف بر آبشستگی

کمترین آن ۱۳۴ میلی‌متر برای سرعت نسبی ۰/۸۲۱ و موج نوع سه بود. با توجه به نتایج جدول ۱ مشاهده شد که در هر دبی، با افزایش شماره موج میزان دامنه نسبی موج و بسامد موج نیز افزایش یافت، به این صورت که در هر دبی بیشترین میزان دامنه نسبی موج و بسامد موج برای موج نوع سه بود و کمترین آن برای موج نوع یک بود. نتایج ارائه شده در این بخش با نتایج گزارش شده توسط Zima and Ackerman و Ghomeshi et al. (2007) و (2002) مطابقت دارد.

رژیم جریان در آزمایش‌ها، زیر بحرانی و آشفته بود. در حالت تشدید، عدد فرود در محدوده $0.059 < Fr < 0.151$ و عدد رینولدز پایه در محدوده $2352 < Re < 4750$ بود که در این تحقیق برای هر نوع موج با افزایش دبی، عدد فرود کاهش و عدد رینولدز پایه افزایش یافت.

دامنه نسبی موج، f_s بسامد گردابه ناشی از پایه‌ها بر حسب هرتز، Fr عدد فرود جریان، Re عدد رینولدز پایه، U/U_c سرعت نسبی (نسبت سرعت میانگین جریان به سرعت آستانه حرکت ذرات رسوبی) و ds/D عمق بیشینه آبستگي بدون بعد می‌باشد که D قطر پایه استوانه‌ای است.

۳-۱- تأثیر فراسنجه‌های مختلف بر موج‌های عرضی

شرایط هیدرولیکی جریان بر تشکیل موج‌های عرضی تأثیر می‌گذارد. نتایج به‌دست آمده در این تحقیق نشان داد که با افزایش سرعت نسبی، عمق جریان مورد نیاز برای ایجاد حالت تشدید برای هر نوع موج افزایش یافت و با افزایش شماره موج، حالت تشدید در عمق پایین‌تری تشکیل شد، به‌طوری‌که بیشترین عمق تشکیل شده در آزمایش‌ها ۳۱۳ میلی‌متر برای سرعت نسبی ۰/۴۴۵ و موج نوع یک بود و

جدول ۱ خلاصه‌ای از نتایج آزمایشگاهی
Table 1 A summary of experimental results

Scenario	Q (lit/s)	n	H (mm)	A (mm)	A/H	f_s (Hz)	Fr	Re	U/U_c	ds/D
With wave	30	1	255	24	0.094	0.597	0.059	2352	0.431	0.48
	34	1	282	29	0.102	0.623	0.057	2411	0.442	0.56
	38	1	313	34	0.108	0.639	0.055	2428	0.445	0.68
	30	2	162	27	0.166	0.933	0.117	3703	0.679	0.84
	34	2	183	32	0.174	0.943	0.110	3715	0.681	0.92
	38	2	202	37	0.183	0.972	0.106	3762	0.690	1
	30	3	134	31	0.231	1.171	0.156	4477	0.821	1.16
	38	3	160	38	0.237	1.244	0.151	4750	0.871	1.48
	Without wave	30	1*	255	0	0	0	0.059	2352	0.431
34		1*	282	0	0	0	0.057	2411	0.442	0.36
38		1*	313	0	0	0	0.055	2428	0.445	0.44
30		2*	162	0	0	0	0.117	3703	0.679	0.44
34		2*	183	0	0	0	0.110	3715	0.681	0.52
38		2*	202	0	0	0	0.106	3762	0.690	0.6
30		3*	134	0	0	0	0.156	4477	0.821	0.68
38		3*	160	0	0	0	0.151	4750	0.871	0.88

بدین صورت که عمق بیشینه آبستگي در آزمایش‌های موج نوع یک در اعداد فرود $0/059$ ، $0/057$ و $0/055$ به ترتیب ۷۱ درصد، ۵۵ درصد و ۵۴ درصد بیشتر از آزمایش‌های بدون موج بود و برای موج نوع دو، عمق بیشینه آبستگي در آزمایش‌های با موج در اعداد فرود $0/117$ ، $0/110$ و $0/106$ به ترتیب ۹۰ درصد، ۷۶ درصد و ۶۶ درصد بیشتر از آزمایش‌های بدون موج بود. برای موج نوع سه، عمق بیشینه آبستگي در آزمایش‌های با موج در اعداد فرود $0/156$ و $0/151$ به ترتیب ۷۰ درصد و ۶۸ درصد بیشتر از آزمایش‌های بدون موج بود. نتایج بررسی‌های (Soltani et al. (2022) و Salemi et al. (2023) نشان داد که در هر نوع موج، عمق بیشینه آبستگي در حالت با موج بیشتر از حالت بدون موج است، بنابراین مطالعه این تحقیق نتایج بررسی‌های همانند (Soltani et al. (2022) و Salemi et al. (2023) را تأیید می‌کند.

۳-۲- تأثیر موج بر عمق بیشینه آبستگي

به‌منظور بررسی تأثیر موج‌های عرضی ناشی از پایه‌های استوانه‌ای بر عمق بیشینه آبستگي، هر آزمایش آبستگي به‌همراه موج‌های عرضی با آزمایش بدون موج‌های عرضی (شاهد) متناظرش مقایسه شد. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است پایه‌های استوانه‌ای در ۹ ردیف ۹ تایی (۹ گروه پایه و در هر گروه پایه ۹ عدد پایه) به‌صورت موازی در کف فلوم قرار گرفتند. در هر آزمایش میزان آبستگي در ۳ ردیف اول پایه‌های استوانه‌ای برداشت شد. در شکل ۶ تغییرات عمق بیشینه آبستگي در هر دو حالت آزمایش‌های با موج و بدون موج برای حالت‌های مختلف موج نشان داده شده است. در این شکل، محور عمودی نشان‌دهنده عمق بیشینه آبستگي بدون بعد (ds/D) و محور افقی نشان‌دهنده عدد فرود (Fr) می‌باشد. نتایج نشان داد که در هر سه نوع موج، عمق بیشینه آبستگي در حالت با موج بیشتر از حالت بدون موج است.

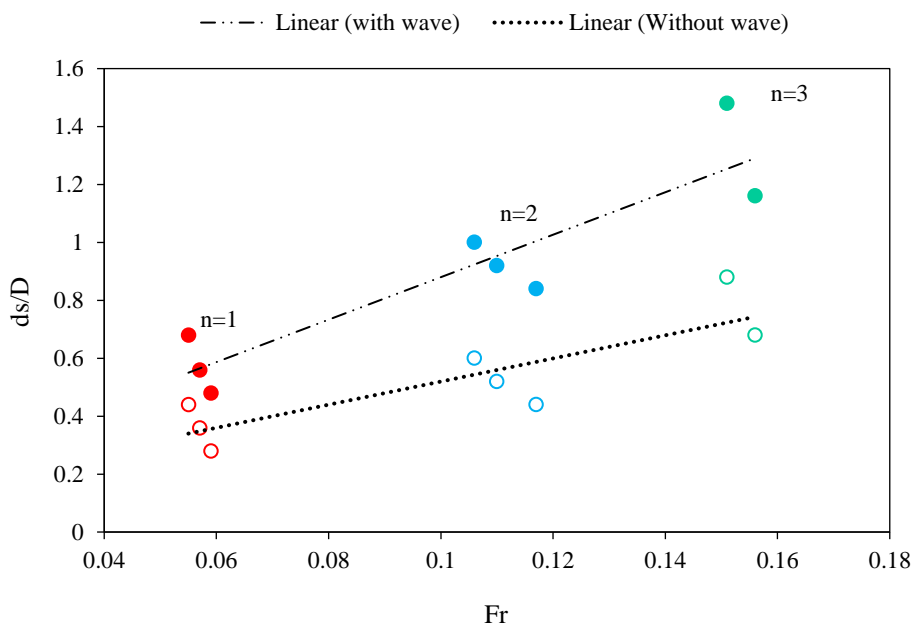


Fig. 6 Variations of the maximum scour depth versus Froude number in the situation of wave and without wave

شکل ۶ تغییرات عمق بیشینه آبستگي در مقابل عدد فرود در حالت با موج و بدون موج

افزایش می‌یابد و می‌توان گفت که دامنه موج و عمق بیشینه آبستگي باهم رابطه مستقیم دارند. به‌عبارتی

با توجه به نتایج جدول ۱ مشاهده می‌شود که برای هر نوع موج با افزایش دامنه موج عمق بیشینه آبستگي نیز

در نتیجه ایجاد موج‌های عرضی نیروهای متناوب به پایه‌ها و پیرامون آن ایجاد می‌شود که این نیروها می‌توانند بر آبشستگی موضعی پیرامون پایه‌ها تأثیرگذار باشد. در شکل ۷ نیمرخ طولی آبشستگی در حالت با موج و حالت شاهد آن برای موج نوع یک، دو و سه در دبی ۳۸ لیتر بر ثانیه رسم شده است. در این شکل، محور عمودی نشان دهنده عمق آبشستگی (ds) و محور افقی نشان‌دهنده طول فلوم (L) می‌باشد. نتایج شکل ۷ نشان داد که در هر نوع موج، آبشستگی در حالت با موج بیشتر از حالت شاهد می‌باشد. همچنین مشاهده شد که با افزایش شماره موج، اختلاف عمق آبشستگی در حالت با موج نسبت به حالت شاهد بیشتر می‌شود، بدین صورت که اختلاف عمق آبشستگی در موج نوع سه نسبت به حالت شاهد بیشتر از اختلاف عمق آبشستگی در موج نوع یک و دو نسبت به حالت شاهدشان بود.

در شکل ۸ الگوی دو بعدی آبشستگی در حالت با موج و حالت شاهد آن برای موج نوع یک، دو و سه در دبی ۳۸ لیتر بر ثانیه با استفاده از نرم‌افزار Surfer 20 رسم شده است. در این شکل، محور عمودی نشان‌دهنده عرض فلوم (b) و محور افقی نشان‌دهنده طول فلوم (L) می‌باشد. نتایج شکل ۸ نشان داد که محل عمق بیشینه آبشستگی در حالت با موج متفاوت از حالت شاهد بود. بدین صورت که محل عمق بیشینه آبشستگی در موج نوع یک، در گروه پایه سوم و ردیف سوم بود و در حالت شاهد در گروه پایه پنجم و ردیف اول بود. محل عمق بیشینه آبشستگی در موج نوع دو، در گروه پایه دوم و ردیف سوم بود و در حالت شاهد در گروه پایه اول و ردیف سوم بود. همچنین محل عمق بیشینه آبشستگی در موج نوع سه، در گروه پایه دوم و ردیف اول بود و در حالت شاهد در گروه پایه چهارم و ردیف سوم بود. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش شماره موج توسعه طولی، عرضی و عمقی چاله آبشستگی در هر دو حالت با موج و بدون موج افزایش می‌یابد. می‌توان چنین گفت که با افزایش شماره موج، عدد فرود افزایش می‌یابد و جریان در عمق پایین‌تر و سرعت طولی بالاتری تشکیل می‌شود (جدول ۱). بنابراین با افزایش سرعت طولی جریان که منجر به افزایش تنش برشی بستر

افزایش دامنه موج باعث افزایش سرعت عرضی جریان می‌شود، بنابراین با افزایش سرعت عرضی جریان که منجر به افزایش تنش برشی بستر می‌شود عمق بیشینه آبشستگی نیز افزایش می‌یابد.

از دیگر نتایج به‌دست آمده از جدول ۳ اثر نوع موج بر عمق بیشینه آبشستگی می‌باشد. نتایج نشان داد که در هر دبی عمق بیشینه آبشستگی با نوع موج رابطه دارد، به این صورت که برای هر دبی بیشترین میزان عمق بیشینه آبشستگی مربوط به موج نوع سه بود و کمترین آن مربوط به موج نوع یک بود. بنابراین موج نوع سه تأثیر بیشتری نسبت به موج نوع یک و دو بر عمق بیشینه آبشستگی داشت. نتایج این بخش با یافته‌های (Salemi et al. (2023) همخوانی دارد. (Salemi et al. (2023) که در آزمایش‌های خود موج نوع یک و دو را مشاهده کردند، نتایج بررسی‌های آنان نشان داد که عمق بیشینه آبشستگی در موج نوع دو بیشتر از موج نوع یک است. در این تحقیق به‌طور میانگین عمق بیشینه آبشستگی در موج نوع سه، ۱۳۰ درصد نسبت به موج نوع یک و ۴۳ درصد نسبت به موج نوع دو افزایش یافت. همچنین عمق بیشینه آبشستگی در موج نوع دو، ۶۰ درصد نسبت به موج نوع یک افزایش یافت.

۳-۳- تأثیر موج بر الگوی آبشستگی

در آزمایش‌های با موج در هر ردیف، آبشستگی پایه‌های استوانه‌ای در ۹ گروه پایه برداشت شد. اما در آزمایش‌های شاهد با توجه به قرارگیری دیواره شیشه‌ای بین پایه‌ها، معیار مقایسه آبشستگی در حالت با موج با حالت شاهد، آبشستگی گروه پایه‌هایی بود که تحت تأثیر دیواره قرار نگیرند. به عبارتی بررسی آبشستگی گروه پایه‌های نزدیک به دیواره در حالت شاهد در نظر گرفته نشد. بنابراین برای حالت شاهد موج نوع یک و دو که از یک دیواره شیشه‌ای برای حذف موج استفاده شده بود، آبشستگی گروه پایه اول تا ششم در نظر گرفته شد و برای حالت شاهد موج نوع سه که از دو دیواره شیشه‌ای برای حذف موج استفاده شده بود آبشستگی گروه پایه چهارم تا ششم در نظر گرفته شد.

آزمایش‌های با موج و بدون موج برای حالت‌های مختلف موج نشان داده شده است. در این شکل، محور عمودی نشان‌دهنده حجم آبستگي بدون بعد (Vs/D^3) و محور افقی نشان‌دهنده عدد فرود (Fr) می‌باشد. حجم آبستگي در آزمایش‌ها با استفاده از نرم‌افزار Surfer 20 محاسبه شد. نتایج نشان داد که در هر سه نوع موج حجم

می‌شود عمق بیشینه آبستگي افزایش می‌یابد و در نهایت توسعه طولی، عرضی و عمقی چاله آبستگي نیز افزایش می‌یابد.

۳-۴- تأثیر موج بر حجم آبستگي

در شکل ۹ تغییرات حجم آبستگي در هر دو حالت

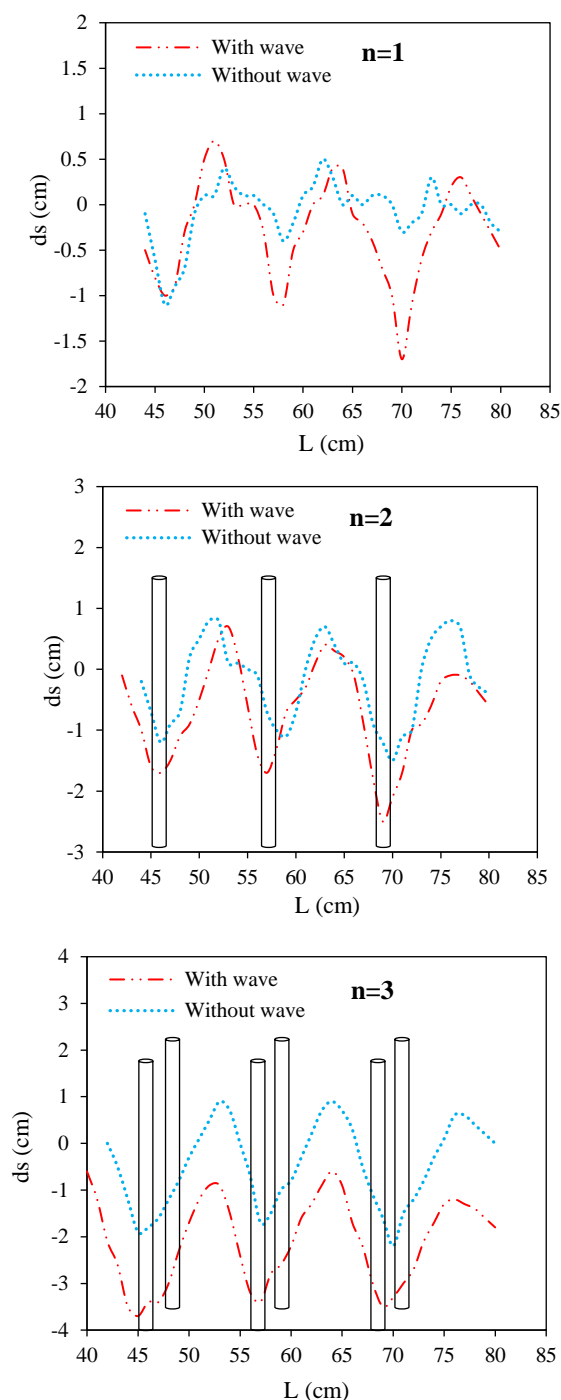


Fig. 7 Comparison of the longitudinal profile of scouring of wave mode 1, 2 and 3 with the control test in $Q=38$ lit/s
 شکل ۷ مقایسه نیمرخ طولی آبستگي موج نوع ۱، ۲ و ۳ با آزمایش شاهد در دبی ۳۸ لیتر بر ثانیه

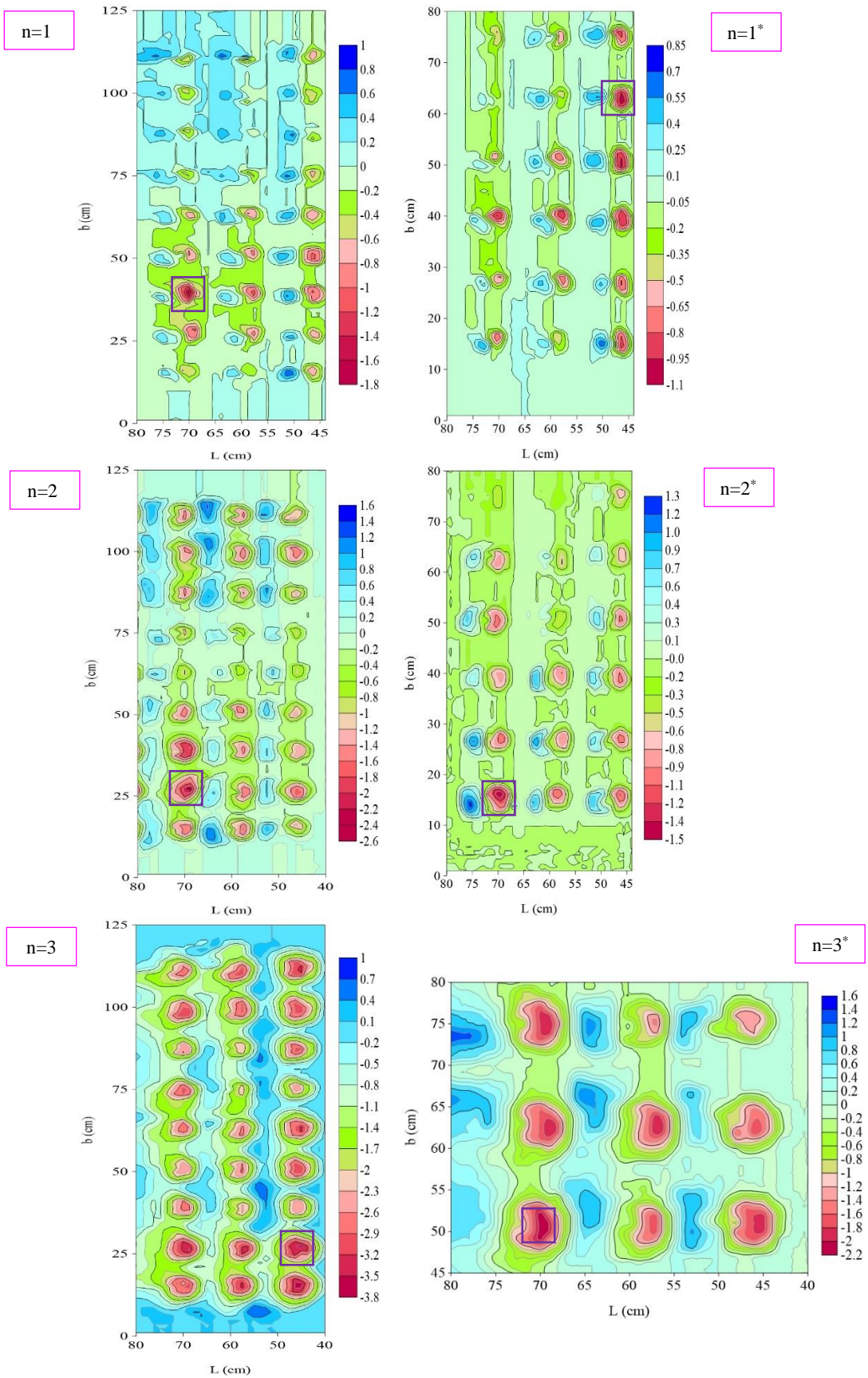


Fig. 8 Scour pattern of wave mode 1, 2 and 3 with the control test in $Q=38$ lit/s

شکل ۸ الگوی آبشستگی موج نوع ۱، ۲ و ۳ به همراه آزمایش شاهد در دبی ۳۸ لیتر بر ثانیه

نوع دو، ۸۹ درصد نسبت به موج نوع یک افزایش یافت.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی تأثیر موج‌های عرضی نوع یک، دو و سه بر آبستگي موضعی پیرامون پایه‌های استوانه‌ای پل پرداخته شد که مهم‌ترین نتایج به‌دست آمده از این تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

تشکیل موج‌های عرضی بر آبستگي پایه‌های استوانه‌ای پل تأثیرگذار بود و عمق بیشینه آبستگي در آزمایش‌های با موج بیشتر از آزمایش‌های بدون موج بود و به‌طور میانگین عمق بیشینه آبستگي ۶۰ درصد در موج نوع یک، ۷۸ درصد در موج نوع دو و ۶۹ درصد در موج نوع سه نسبت به حالت بدون موج افزایش یافت.

در هر نوع موج با افزایش دبی جریان، دامنه موج افزایش یافت و با افزایش دامنه موج عمق بیشینه آبستگي نیز

آبستگي در حالت با موج بیشتر از حالت بدون موج است. بدین صورت که حجم آبستگي در آزمایش‌های موج نوع یک در اعداد فرود ۰/۰۵۷، ۰/۰۵۹ و ۰/۰۵۵ به- ترتیب ۶/۲، ۴/۹ و ۱/۷ برابر آزمایش‌های بدون موج بود و برای موج نوع دو، حجم آبستگي در آزمایش‌های با موج در اعداد فرود ۰/۱۱۷، ۰/۱۱۰ و ۰/۱۰۶ به‌ترتیب ۳/۳، ۳/۴ و ۳/۹ برابر آزمایش‌های بدون موج بود. برای موج نوع سه، حجم آبستگي در آزمایش‌های با موج در اعداد فرود ۰/۱۵۶ و ۰/۱۵۱ به‌ترتیب ۷/۲ و ۱۰/۷ برابر آزمایش‌های بدون موج بود. نتایج بررسی‌های این پژوهش نتایج بررسی‌های (Soltani et al. و Salemi et al. (2022) را تأیید می‌کند. با افزایش شماره موج حجم آبستگي افزایش یافت و به‌طور میانگین حجم آبستگي در موج نوع سه، ۶/۷ برابر نسبت به موج نوع یک و ۳ برابر نسبت موج نوع دو افزایش یافت و حجم آبستگي در موج

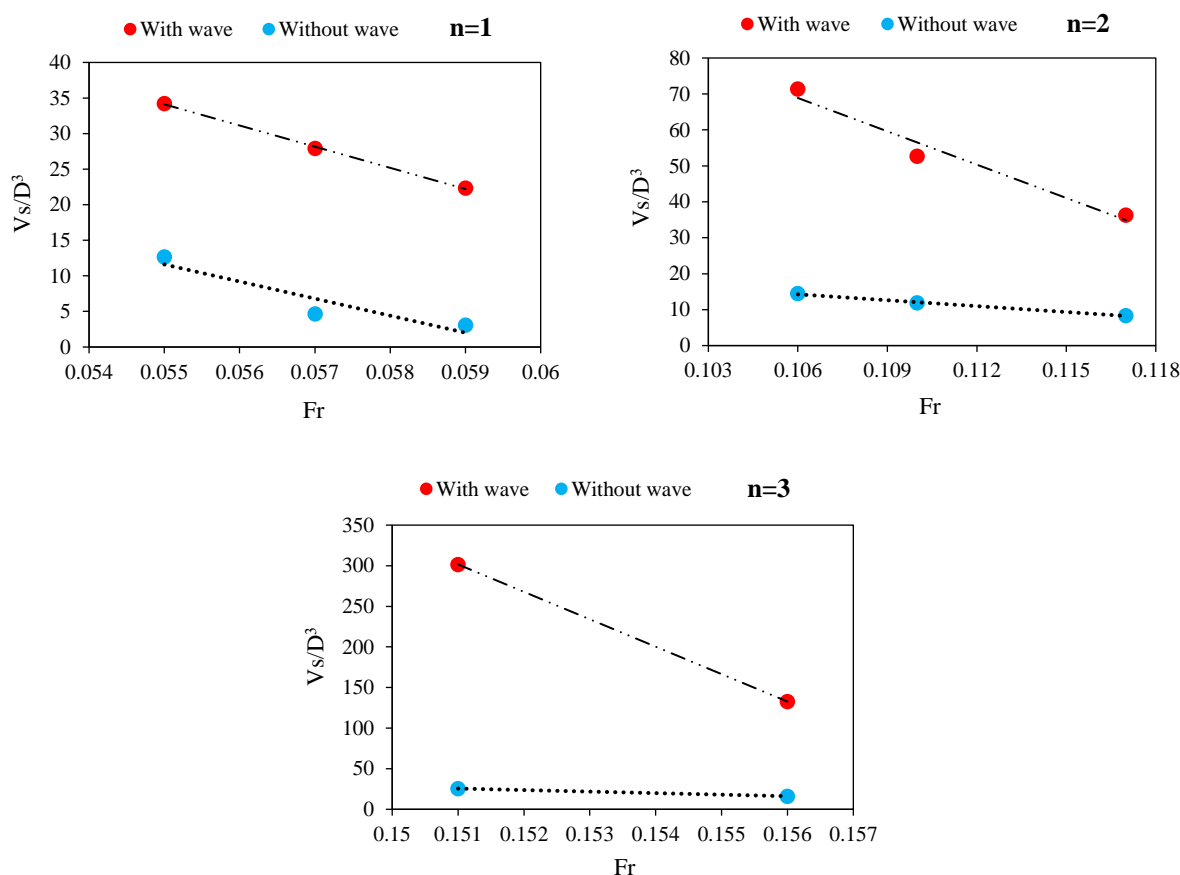


Fig. 9 Variations of the volume of scour versus Froude number in the situation of wave and without wave

شکل ۹ تغییرات حجم آبستگي در مقابل عدد فرود در حالت با موج و بدون موج

۶- سپاسگزاری

در پایان از حمایت مالی شورای پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز کمال تشکر را داریم (GN: SCU.WH1400.86).

۷- منابع

Amini, A. & Eghbal Zadeh, A. (2012). Experimental investigation of the effect of pile groups on scour depth in bridge piers. *J. Iranian Water Research*, 6(11), 95-103. (In Persian)

Ghomeshi, M., Mortazavi-Dorcheh, S.A. & Falconer, R. (2007). Amplitude of wave formation by vortex shedding in open channel. *J. Applied Sciences*, 7(24), 3927-3934.

Howes, A.M. (2011). Canal wave oscillation phenomena due to column vortex shedding. All Graduate Theses and Dissertations, Civil and Environmental Engineering, Utah State University, 945p.

Jafari, A. & Ghomeshi, M. (2011). Investigation of resonance and generated transverse waves with maximum amplitude from obstructions by use of four different sizes. *J. Irrigation and Water Engineering*, 1(2), 1-2. (In Persian)

Jafari, A., Ghomeshi, M., Bina, M. & Kashefipour, S.M. (2011). New equations to obtain the Strouhal number of waves caused by water passing through cylindrical obstacles. *J. Irrigation Sciences and Engineering*, 34(1), 45-54. (In Persian)

Moghaddasi, E. and Ghomeshi, M. (2021). Experimental investigation of the transverse wave formation due to submerge cylindrical obstacles on the channel. *J. Irrigation Sciences and Engineering*. 44(3), 89-102 (In Persian).

Mostafavi, S. Ghomeshi, M. & Shahmoradi, B. (2017). Resonance frequency of transverse waves due to vortex shedding of obstacles with different arrangements. *J. Water and Soil Science*, 27(1), 147-157. (In Persian)

Purmohammadi, M.H., Ghomeshi, M. & Musavi, S.H. (2015). Impact of prismatic-shaped obstacle on the characteristics of transverse waves. *J. Water and Soil Science*, 25(2), 117-128. (In Persian)

Rashno, E., Zarrati, A. & Karimaei Tabarestani, M. (2016). Experimental investigation of local scour around bridge pier group. *J. Experimental Research in Civil Engineering*, 3(6), 143-154. (In Persian)

افزایش یافت.

در هر دبی با افزایش شماره موج عمق بیشینه آبستگي افزایش یافت و بیشترین میزان عمق بیشینه آبستگي مربوط به موج نوع سه و کمترین آن مربوط به موج نوع یک بود و بطور میانگین عمق بیشینه آبستگي در موج نوع سه

۱۳۰ درصد نسبت به موج نوع یک و ۴۳ درصد نسبت به موج نوع دو افزایش یافت. همچنین عمق بیشینه آبستگي در موج نوع دو، ۶۰ درصد نسبت به موج نوع یک افزایش یافت.

محل عمق بیشینه آبستگي در حالت با موج متفاوت از حالت بدون موج بود و با افزایش شماره موج، اختلاف عمق آبستگي در حالت با موج و بدون موج بیشتر می شد.

تغییرات حجم آبستگي روندی همانند با تغییرات عمق بیشینه آبستگي داشت و حجم آبستگي در آزمایش های با موج بیشتر از آزمایش های بدون موج بود و به طور میانگین در حالت با موج حجم آبستگي در موج نوع یک ۴/۳ برابر، در موج نوع دو ۳/۵ برابر و در موج نوع سه ۹ برابر نسبت به حالت بدون موج بود.

۵- فهرست نشانه ها

نشانه های انگلیسی:

A	دامنه موج (m)
A/H	دامنه نسبی موج
b	عرض فلوم (m)
d_{50}	قطر میانگین ذرات رسوبی (m)
ds/D	عمق بیشینه آبستگي بدون بعد
Fr	عدد فرود
f_s	بسامد گردابه ناشی از پایه ها (Hz)
H	عمق میانگین جریان (m)
n	نوع موج
Q	دبی جریان ورودی (lit/s)
Re	عدد رینولدز پایه
Vs/D^3	حجم آبستگي بدون بعد
	نشانه های یونانی:
λ	طول موج (m)
σ_g	انحراف معیار هندسی

Robison, E.W. (2010). Oscillation phenomenon of the New York Canal at the I-84 overpass in Boise, Idaho. All Graduate Plan B and other Reports, Civil and Environmental Engineering, Utah State University, 1332.

Salemi, F., Ghomeshi, M. & Bahrami Yarahmadi, M. (2023). Experimental study of transverse waves Effects by obstacles on local scour around cylindrical pier groups of bridge. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 47, 2409-2421.

Schuster, J.C. (1967). Canal capacity studies wave formation by bridge piers, US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Office of Chief Engineer.

Shahkarami, N. & Moghaddasi, E. (2018). Experimental Investigation of the characteristics of surface oscillations due to passing flow through rigid vegetation. *J. Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 50(5), 827-834. (In Persian)

Soltani-Kazemi, Z. Ghomeshi, M. & Yarahmadi, M. B. (2022). Experimental study of local scour around diamond bridge piers subject to transverse standing waves. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(3), 101598, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.09.025>.

Wang, Z.J. & Zhou, Y. (2005). Vortex-induced vibration characteristics of an elastic square cylinder on fixed supports. *J. Fluids Engineering*, 127(2), 241-249.

Zima, L. & Ackermann, N.L. (2002). Wave generation in open channels by vortex shedding from channel obstructions. *J. Hydraulic Engineering*, 128(6), 596-603.