



An experimental analysis of the impact of the transversal distance of cubic obstacles on the hydraulic characteristics of transverse waves in staggered arrangements

Kimiya Kamaei, Mehdi Ghomeshi* , Mehdi Daryaei, Seyed Mahmood Kashefipour

Department of Water Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

ABSTRACT: Transverse waves are formed by obstacles such as vegetation, bridge piers, and docks in the flow path. The present study investigated the effect of the transversal distance of cubic obstacles on the hydraulic characterization of transverse waves with four-wave modes in resonance. The obstacles were arranged staggered at two transversal distances and a constant longitudinal distance. All experiments were performed in a flume with a length of 16 m, a width of 1.25 m, and a height of 0.6 m. The flow discharge was varied between 30 and 38 lit/s in the experiments. The results showed that the flow regime was turbulent and sub-critical in experiments. In resonance, the Obstacle Reynolds Number and Froude Number were within the range of $2319 < Re < 5627$ and $0.055 < Fr < 0.210$ respectively. In resonance, the relative amplitude of the wave increases by increasing the transversal distance of obstacles (decreasing the density of obstacles), and the highest relative amplitude of 33% was obtained for $T/D=9.6$, wave mode IV, and $Q=30$ lit/s. With the increase in discharge, the relative amplitude of the wave in each transversal distance and all four wave modes decreased.

Review History:

Received: Jan. 29, 2023
Revised: Apr. 10, 2024
Accepted: May, 05, 2024
Available Online: May, 17, 2024

Keywords:

Transverse Waves
Cubic Obstacles
Transversal Distance
Staggered Arrangement
Strouhal Number

1- Introduction

The construction of any obstacle to the water flow path disturbs the flow lines and contributes to the formation of swirling flows. This phenomenon, in turn, exerts two oscillating forces on the obstacle; one aligns with the water flow and another perpendicular to the flow. The water passing through the obstacles downstream creates a type of disturbance called vortex. With the reciprocation of oscillating forces and their collision with the channel wall, the water surface also tends to start rippling. In certain conditions, resonance is formed if the frequency of the vortex created by the obstacle is the same as the natural frequency of oscillation in the structure, leading to transverse waves with the maximum amplitude formed across the channel. Transverse waves are also very important in terms of issues such as the stability of hydraulic structures, lateral erosion, and deposition in the bed. Thus, identifying such waves can account for the occurrence of some phenomena. In their experimental study, Poustizadeh and Ghomeshi [1] investigated the effect of transverse waves on the concentration of suspended sediments downstream of obstacles with a staggered arrangement in a rectangular flume and concluded that in the absence of waves, suspended sediments are equally or more concentrated at the end of the channel with obstacles than the end of the obstacle-free channel, and transverse waves, especially wave mode

I, reduce the suspended sediment transport in the obstacles and decrease the concentration of suspended sediments downstream of the obstacles. Strouhal Number is used in the analysis of phenomena under the influence of vortices and time-dependent phenomena. Indeed, the Strouhal Number is considered the size of the dimensionless frequency of the oscillations in this phenomenon. The present study aimed to investigate the characteristics of transverse waves in staggered arrangements with changes in the transversal distance of obstacles and the discharge rate using a physical model.

2- Methodology

All experiments were performed in a rectangular flume with a length of 16 m, a width of 1.25 m, a height of 0.6 m, and a slope of 0. The flume was equipped with a weir in to regulate the water flow depth for forming transverse waves in different modes. A digital electromagnetic flow meter (RPOMAG 53, precision: $0.001 \pm$ lit/s) installed at the flume inlet was used to measure the discharge. The experiments were performed at three discharges of 30, 34, and 38 lit/s. Wooden cubic obstacles (flow collision to the vertex) were used. The obstacles with square cross-sections with a side of 2.5 cm and a height of 40 cm were installed perpendicular to the flow direction. The obstacles were arranged staggered at transversal

*Corresponding author's email: ghomeshi@scu.ac.ir



Table 1. Range of Obstacle Reynolds Number and Froude Number in resonance

n	Reynolds Number	Froude Number
1	2319 - 2566	0.055 - 0.062
2	3688 - 3989	0.110 - 0.123
3	4609 - 5142	0.156 - 0.192
4	5421 - 5627	0.186 - 0.210

distances of 12 and 24 cm and constant longitudinal distance of 12 cm. A total of 24 experiments were performed. At the beginning of each experiment, the flow entered the flume by adjusting the discharge. The weir was adjusted to the height that the water level reached the upper edge of the obstacles. No wave was formed in this case. The weir was gradually brought down so that the wave mode I started to oscillate with low amplitude. The velocity increased as the weir was pushed down gradually, and the formed wave appeared in a more clear shape, and its amplitude was gradually increased to maximize the oscillation amplitude of wave mode I. For each weir height along the obstacle placement area, the highest and lowest water levels during an oscillation on the flume wall were recorded to determine the wave amplitude and mean flow depth. As the weir height was further lowered and the flow velocity increased, the amplitude of wave mode I started to decrease. In other words, the wave amplitude started to decrease in the opposite direction as the weir height further decreased, and the wave mode I disappeared. All the above stages were repeated to form wave modes II, III, and IV. The time for 15 oscillations was recorded using a chronometer to calculate the frequency of the vortex created by the obstacle.

3- Results and Discussion

From a physical perspective, in the flow of water passing through the piers, when the frequency caused by the vortex of the obstacle is equal to the natural frequency caused by the oscillation in the structure, resonance occurs and causes the oscillation of the water level with the maximum amplitude [2]. In this case, a correct number of nodes are placed in the width of the channel, and their number is the same as the wave mode. The flow regime in the experiments was turbulent and subcritical. The range of Obstacle Reynolds Number and Froude Number in resonance for different waves is presented in Table 1. The hydrodynamics of transverse waves suggest that they are formed in subcritical conditions, and transverse waves can only be analyzed in subcritical conditions. Furthermore, if a wave is formed in supercritical conditions, the effect of friction on the bed increases due to the low depth of the water flow. Thus, the transverse wave is not stable under these conditions and disappears quickly. In addition, Von Karman oscillating paths occur when the Obstacle Reynolds Number is within the two ranges of

$40 < Re < 3 \times 10^5$ or $Re > 3.5 \times 10^6$ [3]. In the present study, the Obstacle Reynolds Number in the resonance was in the range of $2319 < Re < 5627$, which indicates the existence of strong vortices behind each obstacle.

To assess the effect of the transverse distance of cubic obstacles on the relative amplitude of the wave in the resonance, the graph for changes in the relative amplitude of the wave (A/H) with the changes in the dimensionless transverse distance (T/D) for each wave mode at different discharge rates is shown in Fig1 .. As can be seen, with an increase in the transverse distance of the obstacles, the relative amplitude of the wave increased for all waves. Thus, for each wave mode, the relative amplitude for $T/D=9.6$ is higher than $T/D=4.8$. Accordingly, the findings showed that the relative amplitude of transverse waves has an inverse relationship with the number of obstacles in each row and a direct relationship with their distance in each row. The highest relative amplitude of the wave in the experiments was equal to 33% for $T/D=9.6$, wave mode IV and discharge rate of 30 lit/s, and the lowest was equal to 10.8% for $T/D=4.8$, wave mode IV, and discharge rate of 38 lit/s. In addition, Purmohammadi et al. [4] reported that the maximum relative amplitude was equal to 61% for cylindrical obstacles formed in $T/D=2.4$, in-line arrangement, and at a width of 74 cm. as the T/D value increased from 4.8 to 9.6, the highest increase in the relative amplitude of the wave was equal to 30%, which corresponds to the discharge rate of 38 lit/s and the wave mode IV, and the lowest relative amplitude was equal to 2.7% that occurred at a discharge rate is 34 lit/s in wave mode III.

As displayed in Fig. 1, as the discharge rate increased from 30 to 38 lit/s, the relative amplitude of the wave decreased in both transverse distances and all four wave modes. For $T/D=4.8$, the highest reduction rate in the relative amplitude of the wave was equal to 26% as the discharge rate increased from 30 to 38 lit/s in wave mode IV, and the lowest decrease was equal to 3% as the discharge rate increased from 34 to 38 lit/s in wave mode I. In addition, for $T/D=9.6$, the highest reduction rate in the relative amplitude of the wave was equal to 11% as the discharge rate increased from 30 to 38 lit/s in wave mode IV, and the lowest decrease was equal to 1.6% as the discharge rate increased from 34 to 38 lit/s in wave mode I.

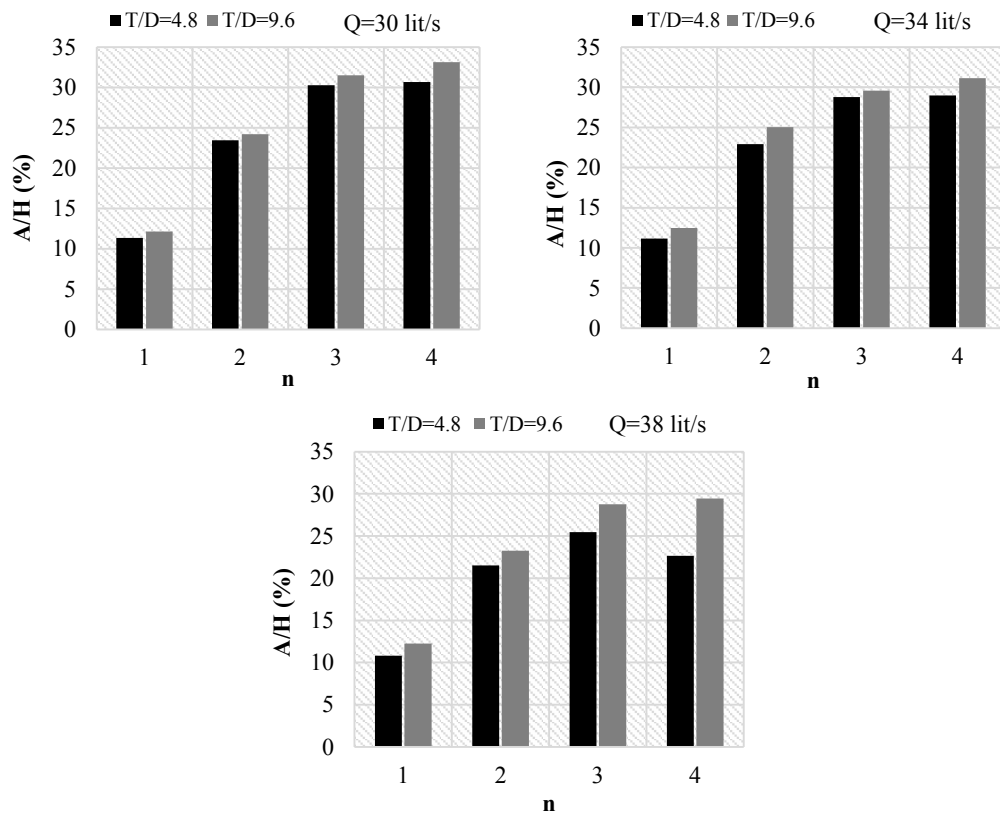


Fig. 1. Variations of the relative amplitude of the wave (A/H) by changing the dimensionless transversal distance (T/D) in different discharges

4- Conclusion

The present study examined the impact of the transverse distance of cubic obstacles with staggered arrangements on the characteristics of transverse waves in a wide flume. The findings indicated that the flow regime in the experiments was turbulent and subcritical in the resonance, the Obstacle Reynolds Number and Froude Number were in the range of $2319 < Re < 5627$ and $0.055 < Fr < 0.210$, respectively. Furthermore, as the transverse distance of the obstacles increased, the relative amplitude of the wave increased. In other words, the relative amplitude of transverse waves has an inverse relationship with the number of obstacles in each row and a direct relationship with their distance in each row. The highest relative amplitude of the wave formed in the experiments was equal to 33% for $T/D=9.6$, wave mode IV, and a discharge rate of 30 lit/s. As the discharge rate increased from 30 to 38 lit/s, the relative amplitude of the wave in each transverse distance and all four wave modes also decreased.

References

- [1] N. Poustizadeh, M. Ghomeshi, Experimental Study on the Effect of Transverse Waves on Suspended Sediment Concentration at Downstream of Obstacles in a Staggered Arrangement, *Water and Soil Science*, 26(2-1) (2016) 87-100 (in Persian).
- [2] Z. Kang, L. Jia, An experiment study of a cylinder's two degrees of freedom VIV trajectories, *Ocean Engineering*, 70 (2013) 129-140.
- [3] R.D. Blevins, *Flow-induced vibration*, New York, (1977).
- [4] M.H. Purmohammadi, M. Ghomeshi, S.H. Mosavi Jahromi, S.M. KashefiPour, M. Fathi Moghadam, The study of impact of obstacle shape on the characteristics of transverse waves, *Irrigation Sciences and Engineering*, 39(1) (2016) 11-20 (in Persian).



بررسی آزمایشگاهی تأثیر فاصله عرضی موانع مکعبی بر خصوصیات هیدرولیکی امواج عرضی در آرایش زیگزاگ

کیمیا کمائی، مهدی قمشی*^{id}، مهدی دریائی، سید محمود کاشفی پور

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

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۹
بازنگری: ۱۴۰۳/۰۱/۲۲
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۱۶
ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۰۲/۲۸

کلمات کلیدی:

امواج عرضی
موانع مکعبی
فاصله عرضی
آرایش زیگزاگ
عدد استروهل

خلاصه: امواج عرضی در اثر قرار گرفتن موانعی مانند پوشش گیاهی، پایه‌های پل و اسکله در مسیر جریان به وجود می‌آیند. در تحقیق حاضر به بررسی تأثیر فاصله عرضی موانع مکعبی بر خصوصیات امواج عرضی با چهار نوع موج در حالت تشدید پرداخته شد. کارگذاری موانع به صورت آرایش زیگزاگ، در دو فاصله عرضی ۱۲ و ۲۴ سانتیمتر و فاصله طولی ثابت ۱۲ سانتیمتر بود. کلیه آزمایش‌ها در یک فلوم به طول ۱۶ متر، عرض ۱/۲۵ متر و ارتفاع ۰/۶ متر انجام شد. دبی جریان در آزمایش‌ها بین ۳۰ تا ۳۸ لیتر بر ثانیه متغیر بود. نتایج نشان داد در حالت تشدید، با افزایش فاصله عرضی موانع (کاهش تراکم موانع)، دامنه نسبی موج افزایش یافت و بیشترین میزان دامنه نسبی موج تشکیل شده در آزمایش‌ها، برابر با ۳۳ درصد برای $T/D = 9.6$ ، موج نوع چهارم و دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه بود. با افزایش دبی، دامنه نسبی موج در هر فاصله عرضی و هر چهار نوع موج، کاهش یافت. همچنین عدد استروهل با افزایش تراکم موانع کاهش یافت. با استفاده از تحلیل ابعادی و نتایج حاصل از آزمایش‌ها، رابطه‌ای به منظور تعیین عدد استروهل در حالت تشدید با استفاده از نرم‌افزار آماری پیشرفته ارائه گردید و نتایج آنالیز حساسیت نشان داد تأثیر پارامتر عدد رینولدز مانع بر عدد استروهل از سایر پارامترها بیشتر است و با حذف این پارامتر از معادله ارائه شده برای عدد استروهل، R^2 ۴۶ درصد کم شد و خطای RMSE و MAE به طور متوسط دو برابر شد.

۱- مقدمه

وجود موانعی همچون پایه پل، پایه و شمع‌های اسکله‌های ساحلی، پوشش آبی و گیاهی در مسیر جریان و همچنین تغییر شکل ناگهانی دیواره‌های جانبی می‌تواند در جریان اغتشاش ایجاد کند و شکل و مسیر طبیعی آن را برهم زند. اضافه نمودن هرگونه مانع در مسیر جریان آب، سبب برهم زدن خطوط جریان و ایجاد جریان‌های چرخشی می‌شود که این پدیده منجر به وارد شدن نیروی نوسانی در جهت جریان و نیروی نوسانی دیگر، عمود بر جریان به مانع می‌شود. با عبور جریان از این موانع در پایین دست آنها اغتشاشی به نام گردابه^۱ ایجاد می‌شود. در واقع با رسیدن ذره سیال به لبه بالادست مانع، سرعت صفر می‌شود و فشار ذره افزایش یافته و از فشار اولیه سیال به فشار دینامیک در نقطه سکون^۲ می‌رسد. فشار بالای سیال در نزدیکی مرز مانع سبب تشکیل لایه مرزی در طرفین مانع می‌شود. با رشد

لایه مرزی و پس از طی مسافتی بر روی مرز مانع در اثر گرادیان فشار پدیده جداشدگی^۳ خطوط جریان رخ می‌دهد. در پایین دست خطوط جریانی که از مرز جدا می‌شوند دنباله^۴ و گردابه به وجود می‌آید. زمانی که گردابه‌ها به طور مرتب در دو سمت مانع ایجاد می‌شود، نیروهای تناوبی روی مانع ایجاد شده که این نیروها متقابلاً از مانع به سیال وارد می‌گردد (شکل ۱). با رفت و برگشت این نیروی تناوبی و برخورد آن با دیواره کانال سطح آب نیز متمایل به موج‌دار شدن می‌کند. در شرایط خاصی که فرکانس ناشی از گردابه موانع با فرکانس طبیعی نوسان سازه برابر گردد، حالت تشدید^۵ ایجاد شده و امواج عرضی^۶ با حداکثر دامنه در عرض کانال شکل می‌گیرد.

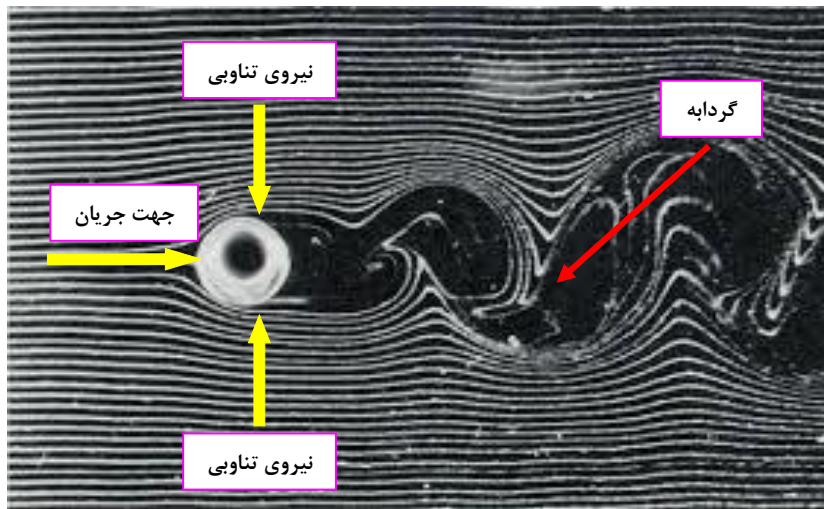
در فلوم آزمایشگاهی که دیواره جریان بسته و ثابت است پدیده تشدید را می‌توان به شکل یک موج مکانیکی عرضی کامل و ایستا (بدین معنا که در نقاطی به نام گره ثابت‌اند) در حالت‌های مختلف مشاهده نمود. در شکل ۲

- 3 Separation
- 4 Wake
- 5 Resonance
- 6 Transverse waves

- 1 Vortex
- 2 Stagnation point

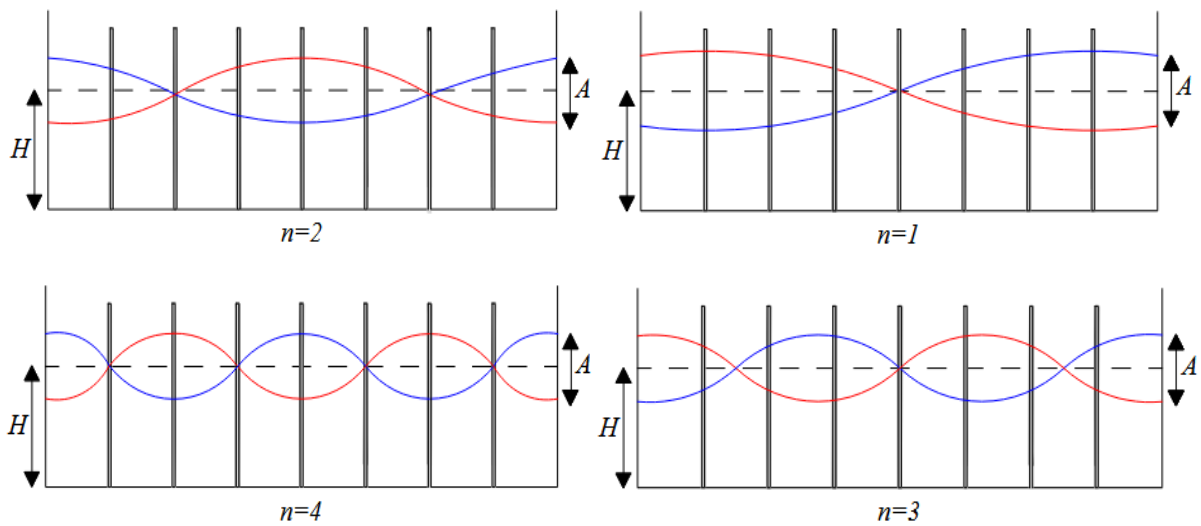
* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ghomeshi@scu.ac.ir





شکل ۱. نمای شماتیک تشکیل گردابه در پیرامون مانع

Fig. 1. Schematic view of the formation of vortex around the obstacle



شکل ۲. حالت‌های مختلف موج عرضی تشکیل شده در تحقیق حاضر

Fig. 2. Different modes of transverse wave formed in the present study

عرضی را مورد بررسی قرار دادند و رابطه‌ای برای محاسبه حداکثر دامنه نسبی^۵ امواج عرضی (نسبت دامنه موج به عمق جریان) ناشی از گردابه در جریان آزاد آب بر روی موانع ارائه نمودند. پوستی‌زاده و قمشی [۵] در یک تحقیق آزمایشگاهی به بررسی اثر امواج عرضی بر غلظت رسوبات معلق در پایین‌دست موانع با آرایش زیگزاگ در یک فلوم مستطیلی پرداختند و به این نتیجه دست یافتند که در حالت عدم وجود موج، غلظت رسوبات معلق در انتهای بازه موانع برابر یا بیشتر از انتهای بازه بدون موانع است و امواج عرضی با کاهش انتقال رسوبات معلق در بازه موانع باعث کاهش غلظت رسوبات معلق در پایین‌دست موانع می‌گردند و موج نوع یک بیشترین تأثیر را داشته است. مصطفوی و همکاران [۶] امواج عرضی در دو حالت آزاد و مستغرق را مورد بررسی قرار دادند. برای این منظور از موانع استوانه‌ای و مثلی در دو حالت برخورد جریان به رأس و برخورد جریان به ضلع استفاده نمودند. نتایج آنها نشان داد در حالت آزاد نسبت به حالت مستغرق امواج با دامنه بیشتری شکل می‌گیرد و بیشترین دامنه موج نوع یک، مربوط به موانع با مقطع مثلث در حالت برخورد جریان به ضلع بود و بیشترین دامنه موج نوع دو، مربوط به موانع استوانه‌ای بود. زیما و آکرمن^۶ [۲] در تحقیق خود با استفاده از موانع استوانه‌ای با قطرهای ۱۲٫۷ و ۲۵٫۴ میلی‌متر، به بررسی امواج عرضی پرداختند و در آزمایش‌های خود موج نوع یک و در بعضی از آزمایش‌ها موج نوع دو را مشاهده کردند. میزان حداکثر دامنه نسبی مشاهده شده در آزمایش‌های آنها برابر ۳۵ درصد بود که در موج نوع یک، $T/D=4$ (فاصله موانع در یک ردیف و D قطر موانع)، آرایش زیگزاگ و عرض ۱۵ سانتیمتر تشکیل شد. پورمحمدی و همکاران [۷] به بررسی تأثیر شکل موانع بر خصوصیات امواج عرضی پرداختند و برای این منظور از موانع استوانه‌ای و مکعبی در دو حالت برخورد جریان به رأس و برخورد جریان به ضلع در آرایش موازی و فواصل طولی و عرضی متفاوت استفاده نمودند. نتایج آنها نشان داد بیشترین میزان دامنه نسبی موج عرضی برابر ۶۱ درصد برای موانع استوانه‌ای در فاصله طولی ۱۲۰ و عرضی ۶۰ میلی‌متر بود. همچنین روابطی را برای تعیین عدد استروهل ارائه نمودند و مشخص گردید عدد استروهل با پارامتر P/D (فاصله بین ردیف‌های موانع و D قطر موانع) در موانع استوانه‌ای رابطه مستقیم و در موانع مکعبی رابطه عکس دارد. شاه‌کرمی و مقدسی [۱] به بررسی خصوصیات نوسانات سطحی و عرضی جریان ناشی از موانع استوانه‌ای در حالت‌های مختلفی که موانع درصدهای متفاوتی از عرض کانال را پوشاندند، پرداختند. نتایج آنها نشان داد با افزایش درصد

چهار حالت موج نیز نشان داده شده است که در آن A دامنه موج^۱ (حداکثر جابجایی سطح آب در دیواره کانال) و H عمق متوسط جریان است. در این شکل، موج نوع یک ($n=1$) دارای یک گره و موج نوع دو ($n=2$) دارای دو گره می‌باشد. همچنین موج نوع سه ($n=3$) و چهار ($n=4$) به ترتیب دارای سه و چهار گره می‌باشند. در تمامی موج‌ها، جریان به شکل یک موج سینوسی نوسان می‌کند.

پدیده امواج عرضی می‌تواند خسارات جبران‌ناپذیری به بار آورد. همچنین از جهت مسائلی مانند پایداری ساختمان‌های هیدرولیکی، فرسایش کناری و رسوب‌گذاری در بستر نیز بسیار حائز اهمیت است، بنابراین شناخت آن می‌تواند دلیل رویداد بعضی از پدیده‌ها باشد. هرچه دامنه موج بزرگتر و فرکانس انتشار آن کوچکتر باشد قدرت موج حاصل و تأثیرگذاری آن بر سازه‌های پیرامون خود بیشتر می‌گردد [۱]. اولین بار تأثیر متقابل جریان و سازه بر روی یکدیگر بر اثر پدیده خرابی پل تاکومانروز در سال ۱۹۴۰ مورد توجه قرار گرفت. این خرابی بسیار چشمگیر بود و دلیل آن عبور جریان هوا از بین پایه‌های پل و تولید گردابه بود [۲]. پس از آن تحقیقات فراوانی در رابطه با تشکیل گردابه و تشدید در برخورد سیالات (گازها و مایعات) با موانع مختلف صورت پذیرفت.

امواج عرضی دارای طول موج هستند که رابطه بین طول موج (λ)، عرض فلوم (b) و نوج موج (n) به شکل زیر بیان می‌شود:

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

وایت^۲ [۳] با استفاده از فرکانس امواج، عدد بدون بعد استروهل^۳ را به صورت رابطه (۲) تعریف نمود:

$$St = \frac{f_s D}{U} \quad (2)$$

در این رابطه عدد استروهل با St ، فرکانس ناشی از گردابه موانع با f_s قطر موانع با D و سرعت متوسط جریان با U نشان داده شده است.

جعفری و همکاران^۴ [۴] در یک تحقیق آزمایشگاهی دامنه ده نوع موج

5 Relative amplitude
6 Zima and Ackerman

1 Wave amplitude
2 White
3 Strouhal Number
4 Jafari et al

فاصله عرضی موانع و دبی جریان با استفاده از مدل فیزیکی و ارائه روابطی به منظور تعیین فرکانس امواج حاصل از پدیده ارتعاش ناشی از گردابه است. همچنین با توجه به اینکه اکثر مطالعات صورت گرفته در خصوص امواج عرضی در فلوم با عرض محدود و تعداد موج‌های کمتر صورت گرفته است، در این تحقیق سعی بر این بوده که با انجام آزمایش‌ها در یک فلوم عریض و ایجاد تعداد موج‌های بیشتر، به بررسی و شناخت رفتار موج در حالت‌های مختلف پرداخت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- سیستم 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 استفاده شد. فلوم دارای یک مخزن آرام‌کننده در ابتدا قبل از مقطع همگرایی ورودی و یک مخزن آرام‌کننده در انتها بعد از مقطع واگرایی خروجی به طول ۱٫۹۶ متر و عرض ۱ متر بود. همچنین فلوم در پایین دست تبدیل واگرا مجهز به یک سرریز بود که جهت تنظیم سرعت و عمق جریان آب برای تشکیل امواج عرضی در حالت‌های مختلف از آن استفاده شد. آب مورد نظر برای انجام آزمایش‌ها، از یک استخر به‌وسیله پمپ تأمین شد. برای اندازه‌گیری دبی جریان ورودی از یک دبی‌سنج 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. آزمایش‌ها در سه دبی ۳۰، ۳۴ و ۳۸ لیتر بر ثانیه انجام شدند. به‌منظور ورود جریان آرام و یکنواخت به فلوم، یک صفحه مشبک توری در قسمت میانی مقطع همگرایی ورودی نصب شد (شکل ۳).

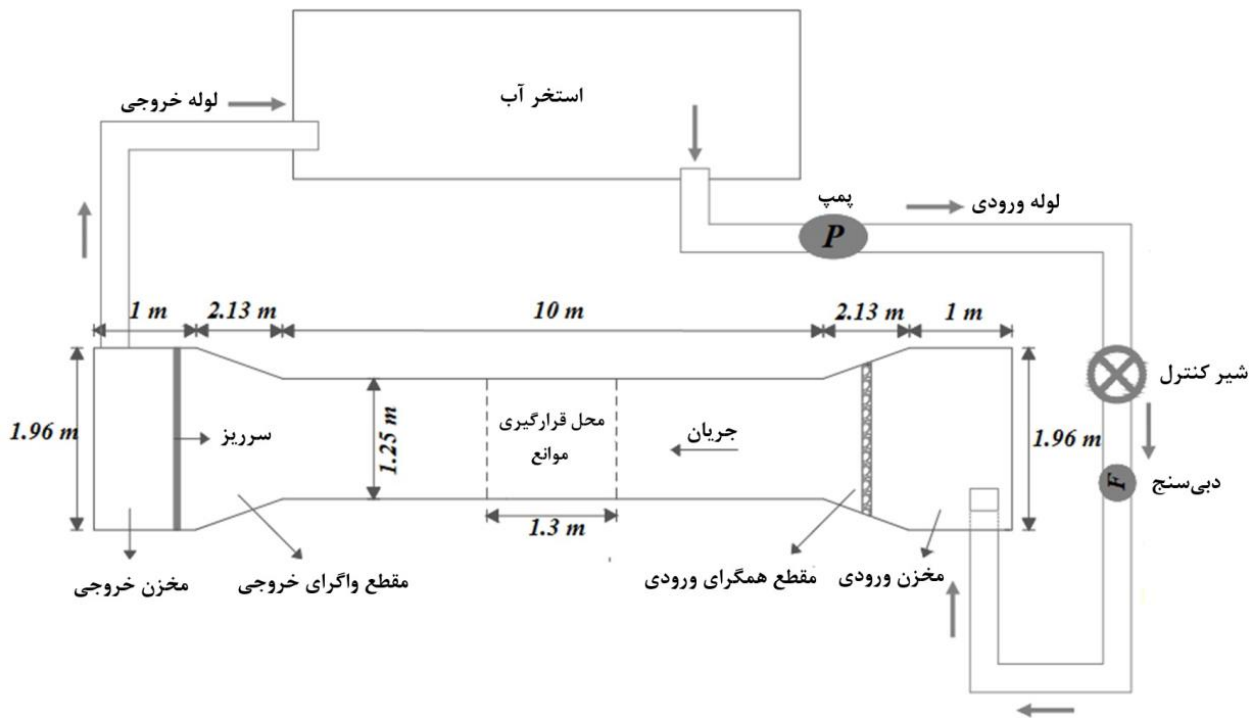
موانع مورد استفاده در این تحقیق، چوبی و به شکل مکعبی در حالت برخورد جریان به رأس بود. این موانع به‌صورت عمود بر جهت جریان نصب شدند. موانع با سطح مقطع مربع به ارتفاع ۴۰ سانتیمتر و ضلع ۲٫۵ سانتیمتر مورد استفاده قرار گرفتند. موج‌های تشکیل شده در تحقیق حاضر در حالت غیر مستغرق بودند، بنابراین ارتفاع موانع طوری انتخاب شد که با توجه به محدوده دبی مورد نظر، هر چهار نوع موج در حالت غیر مستغرق تشکیل شوند. همچنین در یک ردیف عرضی نباید فاصله موانع خیلی به هم نزدیک باشند زیرا در فواصل کم عرضی به دلیل افت انرژی زیاد موجی تشکیل نمی‌شود، بنابراین انتخاب قطر ۲٫۵ سانتیمتر برای موانع با توجه به شرایط آزمایشگاهی تحقیق حاضر معیار مناسبی بود. برای تثبیت موانع در مسیر

عرض پوشیده شده از موانع، نوسانات عرضی در عمق‌های بالاتر تشکیل می‌شود و دارای دامنه نوسان بزرگتری هستند. همچنین در یک عمق جریان ثابت با افزایش درصد عرض پوشیده شده از موانع، دامنه موج نیز افزایش پیدا می‌کند.

ژائو و همکاران^۱ [۸] در یک تحقیق آزمایشگاهی به بررسی نوسانات سطح آزاد در جریان کانال‌های روباز پرداختند. آنها آزمایش‌های خود را با استفاده از موانع استوانه‌ای در سه فاصله عرضی مختلف انجام دادند و به این نتیجه دست یافتند حداکثر نوسانات در محدوده عدد رینولدز مانع بین ۶۰۰ تا ۸۰۰ و عدد فرود در محدوده ۰٫۲۴ الی ۰٫۳۲ رخ می‌دهد. ویرو و همکاران^۲ [۹] تحقیقاتی تجربی روی امواج عرضی اطراف مجموعه‌ای از موانع استوانه‌ای انجام دادند. آنها بیان کردند عدد استروهل در حالت تشدید، به آرایش و تراکم موانع بستگی دارد و عدد استروهل در آرایش زیگزاگ بزرگتر از آرایش موازی است و با افزایش تراکم موانع نیز کاهش می‌یابد. راهمیر و همکاران^۳ [۱۰] در آزمایشگاه تحقیقات آب دانشگاه ایالتی یوتا پدیده امواج نوسانی را که در سال ۲۰۰۹ در محدوده پل I-84 در کانال نیویوک اتفاق افتاده بود، مدل‌سازی کردند و سعی در یافتن راه حلی جهت حذف این امواج نمودند. همچنین مطالعه آنها روی مدل آزمایشگاهی نشان داد که انتشار ورتکس از پایه‌ها سبب ایجاد نوسانات امواج می‌شود و شکل‌گیری گردابه در طول هر ردیف از پایه‌ها سبب می‌شود سرعت جریان در مرکز آبراهه کاهش یابد، درحالی‌که عمق جریان در آن افزایش می‌یابد. سلطانی و همکاران^۴ [۱۱] در یک تحقیق آزمایشگاهی به بررسی آبستگی موضعی پیرامون پایه‌های مکعبی در حالت برخورد جریان به رأس، هم در حضور و هم در عدم حضور امواج عرضی پرداختند. آنها در آزمایش‌های خود از گروه پایه‌هایی با سه فاصله عرضی مختلف استفاده کردند و فقط موج نوع یک را مشاهده نمودند. نتایج آنها نشان داد حداکثر عمق آبستگی و همچنین حجم آبستگی در حضور موج بیشتر از عدم حضور موج است و در هر گروه پایه، افزایش دامنه امواج عرضی منجر به افزایش عمق آبستگی می‌شود.

عدد استروهل، در تحلیل پدیده‌های تحت تأثیر گردابه و وابسته به زمان مورد استفاده قرار می‌گیرد. در واقع عدد استروهل به عنوان اندازه فرکانس بدون بعد نوسان‌های این پدیده در نظر گرفته می‌شود. هدف از تحقیق حاضر بررسی مشخصات امواج عرضی در آرایش زیگزاگ با تغییر در

- 1 Zhao et al
- 2 Viero et al
- 3 Rahmeyer et al
- 4 Soltani et al



شکل ۳. نمایی شماتیک از فلوم آزمایشگاهی و تجهیزات مرتبط با آن (دید از بالا)

Fig. 3. A schematic view of the laboratory flume and related equipment (plan view)

سرعت افزایش یافته و موج تشکیل شده شکل واضح‌تری به خود گرفته و دامنه آن به تدریج افزایش می‌یافت تا دامنه نوسان موج نوع یک حداکثر شود. بنابراین اندازه‌گیری‌ها با شروع نوسانات موج نوع یک شروع 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 پارامتر از خط‌کش‌های مدرج میلیمتری روی دیواره فلوم که در سه مقطع ابتدایی، میانی و انتهایی بازه نصب موانع قرار داده شده بودند، استفاده شد. در ادامه علیرغم 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 شروع به کاهش می‌کند و در نهایت موج نوع یک کاملاً حذف می‌شد. با ادامه این وضعیت (پایین آوردن بیشتر ارتفاع سرریز)، موج نوع دو با دامنه کم شروع به نوسان می‌کرد. سپس سرریز انتهایی به آهستگی در هر مرحله پایین آورده شد تا موج نوع دو با حداکثر دامنه شکل گیرد و عمق جریان و دامنه موج برداشت می‌شد. پس از این مرحله با کاهش ارتفاع سرریز روند اندازه دامنه برعکس شده و کاهش

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 تمام سطح صفحه پلکسی‌گلاس با فواصل طولی و عرضی ۶ سانتیمتر شبکه‌بندی و سپس رزوه شد تا بتوان موانع را روی آن پیچ نمود. موانع به صورت آرایش زیگزاگ، در فاصله طولی ثابت ۱۲ سانتیمتر و دو فاصله عرضی ۱۲ و ۲۴ سانتیمتر مورد آزمایش قرار گرفتند. فاصله‌های طولی و عرضی در این تحقیق به صورت فاصله مرکز به مرکز موانع است (شکل ۴). در مجموع ۲۴ آزمایش انجام شد.

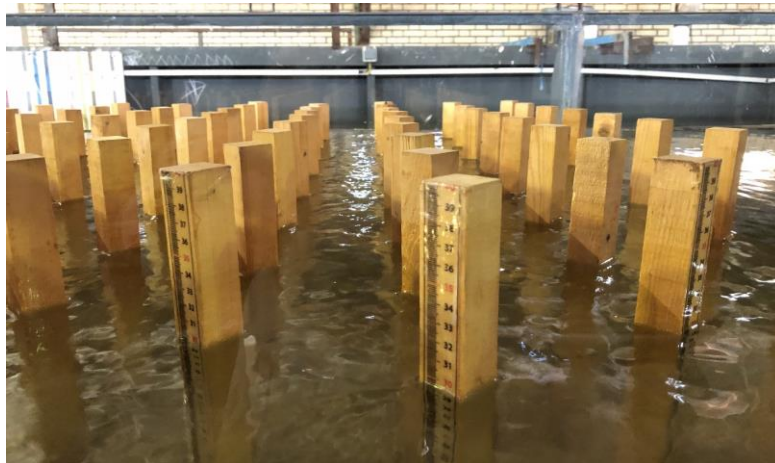
۲-۲- مشاهدات

در شروع هر آزمایش با روشن کردن پمپ و باز کردن شیر کشویی روی خط لوله نصب شده به ورودی فلوم و تنظیم دبی، جریان به درون فلوم وارد می‌شد. سرریز تا اندازه‌ای بالا آورده می‌شد که ارتفاع آب تا لبه بالایی موانع قرار گیرد. در این حالت هیچ موجی ایجاد نمی‌شد، سپس به تدریج سرریز پایین آورده می‌شد تا موج نوع یک با دامنه کم شروع به نوسان کند، در این حالت سرریز به آهستگی پایین آورده شد. با پایین آوردن تدریجی سرریز،



شکل ۴. آرایش زیگزاگ موانع مکعبی در فاصله عرضی ۱۲ و ۲۴ سانتیمتر

Fig. 4. Staggered arrangement of cubic obstacles in transversal distance of 12 and 24 cm



شکل ۵. عبور جریان آب از میان موانع مکعبی و تشکیل گردابه در سطح آب

Fig. 5. Passage of flow through cubic obstacles and formation of vortex on the water surface

پشت موانع استفاده شد و فرکانس موج‌های عرضی که همان فرکانس پشت موانع است استخراج گردید.

۲-۳- تحلیل ابعادی

برای نشان دادن فرکانس موانع می‌توان از عدد بدون بعد استروهل استفاده کرد. برای تعیین روابطی جهت محاسبه عدد استروهل، تابعی بین

می‌یافت تا اینکه موج نوع دو هم ضعیف یا حذف می‌شد. تمامی مراحل ذکر شده برای تشکیل موج نوع سه و چهار تکرار شد. با استفاده از یک کرنومتر، زمان ۱۵ نوسان موج جهت محاسبه فرکانس ناشی از گردابه موانع ثبت گردید ($f_s = N/T$) که f_s فرکانس ناشی از گردابه موانع بر حسب هرتز، N تعداد نوسانات موج و T زمان نوسانات موج بر حسب ثانیه می‌باشد. به عبارتی از تطابق موج‌های عرضی در حالت تشدید با فرکانس گردابه‌های

جدول ۱. محدوده عدد رینولدز مانع و عدد فرود در حالت تشدید

Table 1. Range of Obstacle Reynolds Number and Froude Number in resonance

Froude Number	Reynolds Number	n
۰٫۰۵۵ - ۰٫۰۶۲	۲۳۱۹ - ۲۵۶۶	۱
۰٫۱۱۰ - ۰٫۱۲۳	۳۶۸۸ - ۳۹۸۹	۲
۰٫۱۵۶ - ۰٫۱۹۲	۴۶۰۹ - ۵۱۴۲	۳
۰٫۱۸۶ - ۰٫۲۱۰	۵۴۲۱ - ۵۶۲۷	۴

عدد استروهمال و مشخصات جریان تعریف می‌شود:

$$\phi(\rho, \mu, g, Q, H, U, f_s, f_n, \lambda, n, A, D, T, P, N, b) = 0 \quad (3)$$

نتیجه این پارامتر هم از رابطه (۴) حذف شد. همچنین فاصله طولی موانع هم ثابت بود و پارامتر $\frac{P}{D}$ هم از رابطه (۴) حذف شد. با توجه به مطالب گفته شده رابطه (۴) به صورت زیر بیان می‌شود:

$$St = \phi_2\left(\frac{A}{H}, \frac{T}{D}, N, n, Re, Fr\right) \quad (5)$$

۳- نتایج و بحث

از دید فیزیکی در جریان آب و عبور از موانع، هنگامی که فرکانس ناشی از گردابه موانع با فرکانس طبیعی سازه برابر گردد حالت تشدید پدید می‌آید و سبب ایجاد نوسان سطح آب با حداکثر دامنه می‌شود [۱۲]. در این حالت تعداد صحیحی از گره‌ها در عرض کانال جای می‌گیرند که تعداد آنها همان نوع موج است. در تحقیق حاضر به بررسی تأثیر دبی و فاصله عرضی موانع مکعبی بر خصوصیات هیدرولیکی امواج عرضی در یک فلوم عریض با چهار نوع موج پرداخته شد. رژیم جریان در آزمایش‌ها، آشفته و زیر بحرانی بود. محدوده عدد رینولدز مانع و عدد فرود در حالت تشدید برای موج‌های مختلف در جدول ۱ ارائه شده است. هیدرودینامیک امواج عرضی به‌گونه‌ای است که در شرایط زیر بحرانی تشکیل می‌شود و امواج عرضی را فقط می‌توان در شرایط زیر بحرانی مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. ضمن اینکه تشکیل شدن امواج عرضی در شرایط زیر بحرانی در تحقیقات گذشته نیز ذکر شده است. از طرفی در شرایط فوق بحرانی اگر موجی تشکیل شود، به دلیل عمق کم جریان آب، اثر اصطکاک در کف افزایش می‌یابد بنابراین موج عرضی در این حالت پایدار نمی‌باشد و سریع از بین می‌رود. همچنین مسیرهای نوسانی وون کارمن^۳ زمانی اتفاق می‌افتد که عدد رینولدز مانع در

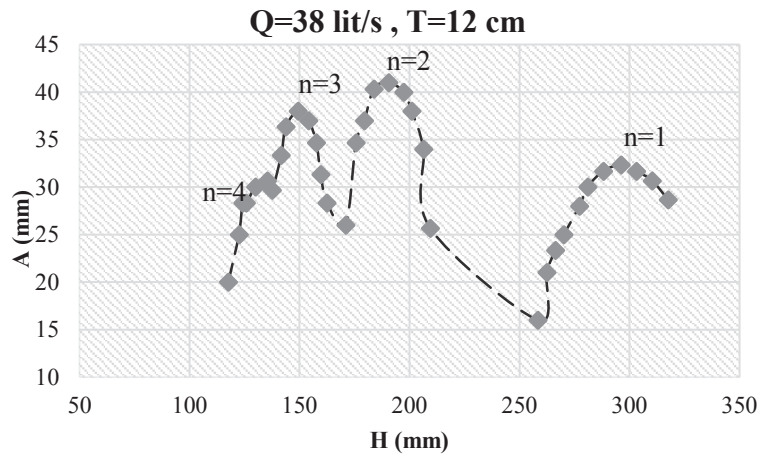
در رابطه بالا، ρ جرم واحد حجم مایع، μ لزوجت دینامیکی سیال، g شتاب گرانش، Q دبی جریان ورودی، H عمق متوسط جریان، U سرعت متوسط جریان، فرکانس گردابه ناشی از موانع، f_n فرکانس طبیعی در کانال، λ طول موج، n نوع موج، A دامنه موج، D اندازه مانع، T فاصله بین موانع در یک ردیف، P فاصله بین ردیف‌های موانع، N تعداد موانع در یک ردیف و b عرض کانال است. با استفاده از تحلیل ابعادی و تئوری - باکینگهام، رابطه (۳) را می‌توان برای به دست آوردن عدد استروهمال به صورت رابطه (۴) نوشت. این رابطه، ارتباط بین عدد استروهمال را با پارامترهای بدون بعد مؤثر بر آن نشان می‌دهد.

$$St = \phi_1\left(\frac{A}{H}, \frac{f_s}{f_n}, \frac{\lambda}{b}, \frac{T}{D}, \frac{P}{D}, N, n, \frac{\rho U D}{\mu}, \frac{U}{\sqrt{gH}}\right) \quad (4)$$

پارامتر دبی اثر خود را در پارامترهای عمق جریان، سرعت جریان و عرض کانال نشان می‌دهد، بنابراین از پارامتر دبی در رابطه (۴) صرف نظر شد. در رابطه (۴) اعداد بدون بعد رینولدز مانع^۱ و فرود^۲ وجود دارد. در حالت تشدید f_s با f_n برابر است، بنابراین در این حالت $\frac{f_s}{f_n}$ برابر یک بوده و از رابطه (۴) حذف شد. تأثیر پارامتر $\frac{\lambda}{b}$ در پارامتر نوع موج وجود داشته، در

- 1 Obstacle Reynolds Number
- 2 Froude Number

3 Von Karman Vortex Trail



شکل ۶. تغییرات دامنه موج (A) در مقابل عمق جریان (H)

Fig. 6. Variations of wave amplitude (A) versus flow depth (H)

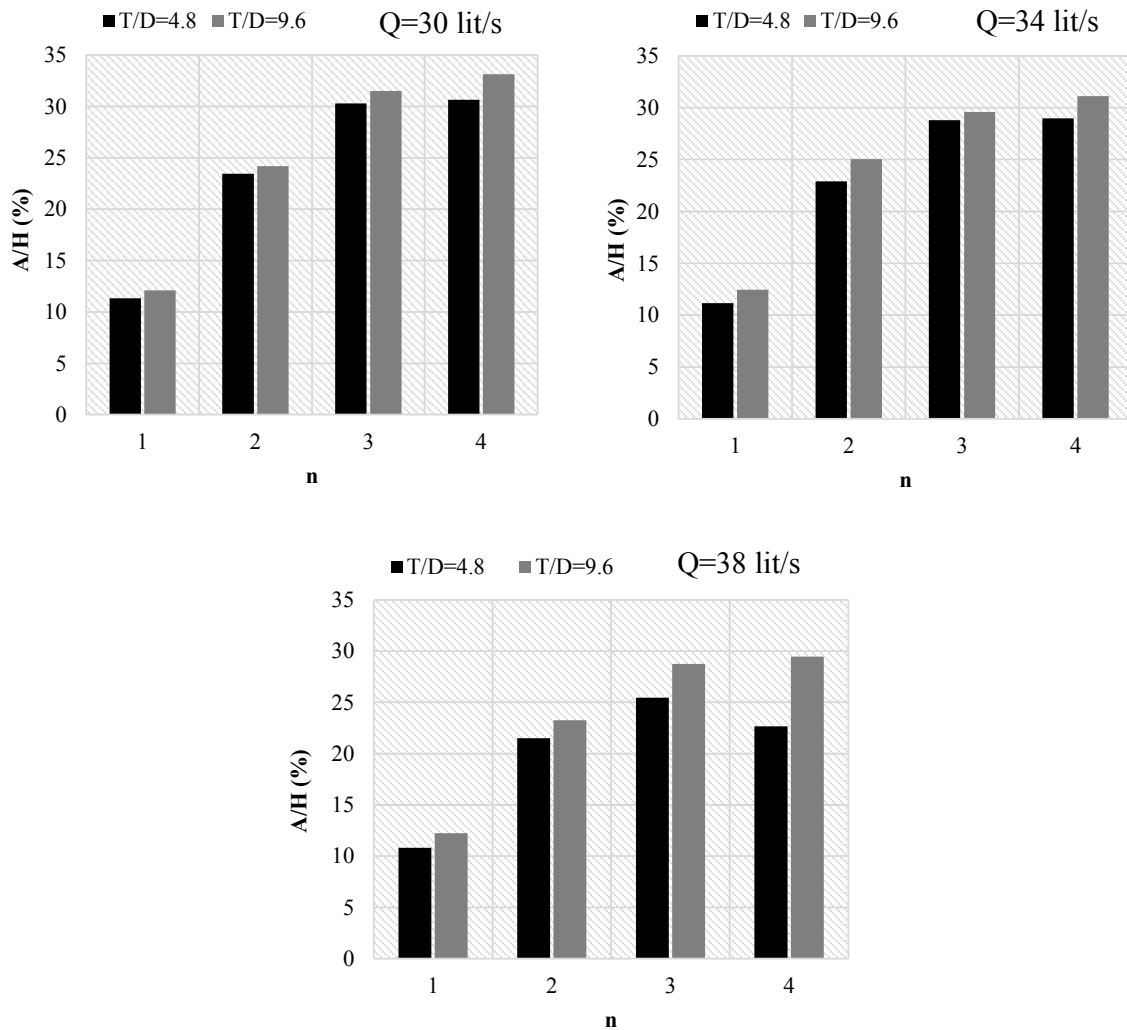
$T/D=4.8$ است. بنابراین نتایج تحقیق حاضر نشان داد دامنه نسبی امواج عرضی با تعداد موانع در هر ردیف رابطه عکس و فاصله آنها در هر ردیف رابطه مستقیم دارد. بیشترین میزان دامنه نسبی موج در آزمایش‌ها، برابر ۳۳ درصد برای $T/D=9.6$ ، موج نوع چهارم و دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه بود و کمترین آن برابر ۱۰٫۸ درصد برای $T/D=4.8$ ، موج نوع یک و دبی ۳۸ لیتر بر ثانیه بود. قمشی و همکاران [۱۴] که مطالعه خود را با موانع استوانه‌ای با سه عرض ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ سانتیمتر مورد بررسی قرار دادند، میزان حداکثر دامنه نسبی را برابر ۴۰ درصد در موج نوع سه برای $T/D=4.8$ ، آرایش موازی و در عرض ۸۰ سانتیمتر گزارش دادند. همچنین در مطالعه پورمحمدی و همکاران [۷] میزان حداکثر دامنه نسبی برابر ۶۱ درصد برای موانع استوانه‌ای بود که در $T/D=2.4$ ، آرایش موازی و در عرض ۷۴ سانتیمتر تشکیل شد. با افزایش T/D از ۴٫۸ به ۹٫۶ بیشترین میزان درصد افزایش دامنه نسبی موج، معادل ۳۰ درصد بود که مربوط به دبی ۳۸ لیتر بر ثانیه و موج نوع چهارم می‌باشد و کمترین آن معادل ۲٫۷ درصد بود که مربوط به دبی ۳۴ لیتر بر ثانیه و موج نوع سه می‌باشد.

با توجه به نتایج به‌دست آمده از شکل ۷، مشاهده شد که با افزایش دبی از ۳۰ به ۳۸ لیتر بر ثانیه میزان دامنه نسبی موج در هر دو فاصله عرضی و هر چهار نوع موج، کاهش یافت که این نتیجه با یافته‌های پورمحمدی

دو بازه $40 < Re < 3 \times 10^5$ یا $Re > 3.5 \times 10^6$ قرار گیرد [۱۳]. در تحقیق حاضر عدد رینولدز ممانع در حالت تشدید در محدوده $2319 < Re < 5627$ بود که نشان‌دهنده وجود گردابه‌های قوی پشت هر مانع می‌باشد.

برای نشان دادن شرایط هیدرولیکی جریان در حداکثر دامنه در هر یک از انواع موج، تغییرات دامنه موج در مقابل عمق جریان برای موانع مکعبی در آرایش زیگزاگ، فاصله عرضی ۱۲ سانتیمتر و دبی ۳۸ لیتر بر ثانیه در شکل ۶ نشان داده شده است. روند تغییرات دامنه موج با عمق جریان مشابه است، بدین صورت که با کاهش عمق جریان برای هر نوع موج، دامنه موج افزایش یافته و بعد از رسیدن به یک مقدار بیشینه، دوباره کاهش می‌یابد تا اینکه موج به‌طور کامل محو شود و موج بعدی تشکیل شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود در ابتدا موج نوع یک تشکیل می‌شود و به‌ترتیب موج‌های نوع دو، سه و چهار پدید می‌آیند.

به‌منظور بررسی تأثیر فاصله عرضی موانع مکعبی روی دامنه نسبی موج در حالت تشدید، نمودار تغییرات دامنه نسبی موج (A/H) با تغییر فاصله عرضی بدون بعد (T/D) برای هر نوع موج در دبی‌های مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله عرضی موانع، برای تمامی امواج میزان دامنه نسبی موج افزایش یافته، به‌طوری‌که برای هر نوع موج دامنه نسبی در $T/D=9.6$ بیشتر از



شکل ۷. تغییرات دامنه نسبی موج (A/H) با تغییر فاصله عرضی بدون بعد (T/D) در دبی‌های مختلف

Fig. 7. Variations of relative amplitude of the wave (A/H) by changing the dimensionless transversal distance (T/D) in different discharges

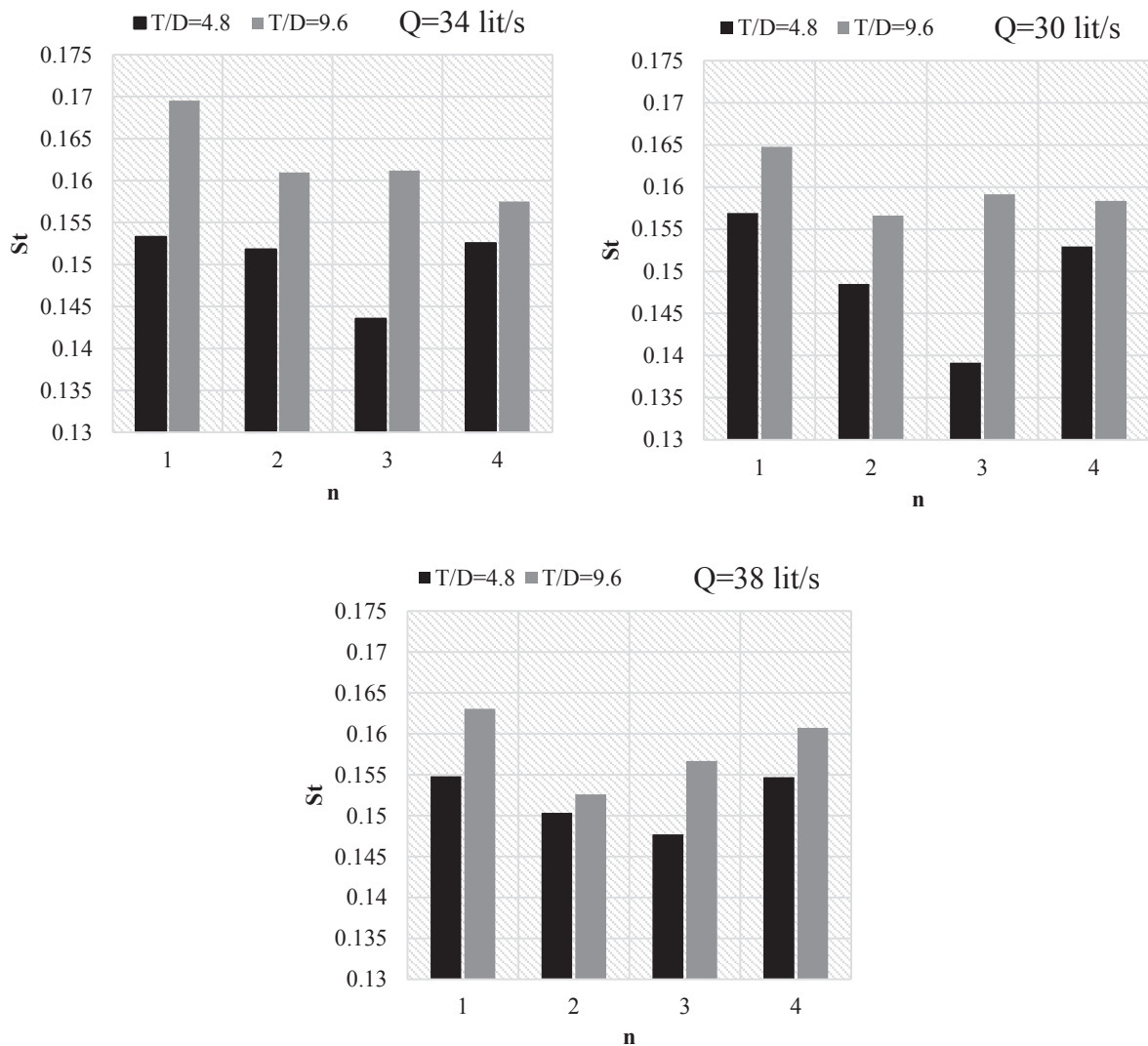
در جدول (۲)، پارامترهای هیدرولیکی موانع مکعبی با تغییر دبی جریان در حالت تشدید ارائه شده است. نتایج به‌دست آمده در این تحقیق نشان داد در هر نوع موج، عمق جریان مورد نیاز برای ایجاد حالت تشدید، با افزایش دبی جریان افزایش یافته است. می‌توان چنین تعبیر نمود که با افزایش دبی جریان، همپوشانی گردابه‌ها برای ایجاد موج در عمق بالاتری اتفاق می‌افتد. بنابراین با افزایش دبی جریان، حالت تشدید در عمق بالاتری اتفاق می‌افتد. به‌عنوان مثال در فاصله عرضی ۱۲ سانتیمتر و موج نوع یک، حالت تشدید

و همکاران [۱۵] همخوانی دارد. برای $T/D=4.8$ بیشترین میزان کاهش دامنه نسبی موج، معادل ۲۶ درصد در افزایش دبی از ۳۰ به ۳۸ لیتر بر ثانیه و موج نوع چهار بود و کمترین آن معادل ۳ درصد در افزایش دبی از ۳۴ به ۳۸ لیتر بر ثانیه و موج نوع یک بود. همچنین برای $T/D=9.6$ بیشترین میزان کاهش دامنه نسبی موج، معادل ۱۱ درصد در افزایش دبی از ۳۰ به ۳۸ لیتر بر ثانیه و موج نوع چهار بود و کمترین آن معادل ۱۶ درصد در افزایش دبی از ۳۴ به ۳۸ لیتر بر ثانیه و موج نوع یک بود.

جدول ۲. خلاصه ای از پارامترهای هیدرولیکی برای موانع مکعبی در حالت تشدید

Table 2. A summary of hydraulic parameters for cubic obstacles in resonance

f_s (Hz)	H (mm)	n	T/D	Q (lit/s)	N
۰٫۶۰۱	۲۵۰	۱			۱
۰٫۹۱۱	۱۵۶	۲	۴٫۸	۳۰	۲
۱٫۱۴۵	۱۱۶	۳			۳
۱٫۳۳۶	۱۰۹	۴			۴
۰٫۶۲۰	۲۶۹	۱			۵
۰٫۹۳۷	۱۷۶	۲	۴٫۸	۳۴	۶
۱٫۱۷۲	۱۳۳	۳			۷
۱٫۳۷۳	۱۲۰	۴			۸
۰٫۶۳۵	۲۹۶	۱			۹
۰٫۹۵۹	۱۹۰	۲	۴٫۸	۳۸	۱۰
۱٫۲۰۲	۱۴۹	۳			۱۱
۱٫۳۹۰	۱۳۵	۴			۱۲
۰٫۶۱۱	۲۵۸	۱			۱۳
۰٫۹۲۴	۱۶۲	۲	۹٫۶	۳۰	۱۴
۱٫۱۷۳	۱۳۰	۳			۱۵
۱٫۳۷۳	۱۱۰	۴			۱۶
۰٫۶۳۲	۲۹۱	۱			۱۷
۰٫۹۵۳	۱۸۳	۲	۹٫۶	۳۴	۱۸
۱٫۲۰۶	۱۴۵	۳			۱۹
۱٫۳۹۱	۱۲۳	۴			۲۰
۰٫۶۴۴	۳۰۷	۱			۲۱
۰٫۹۶۶	۱۹۲	۲	۹٫۶	۳۸	۲۲
۱٫۲۱۷	۱۵۶	۳			۲۳
۱٫۴۰۴	۱۳۹	۴			۲۴

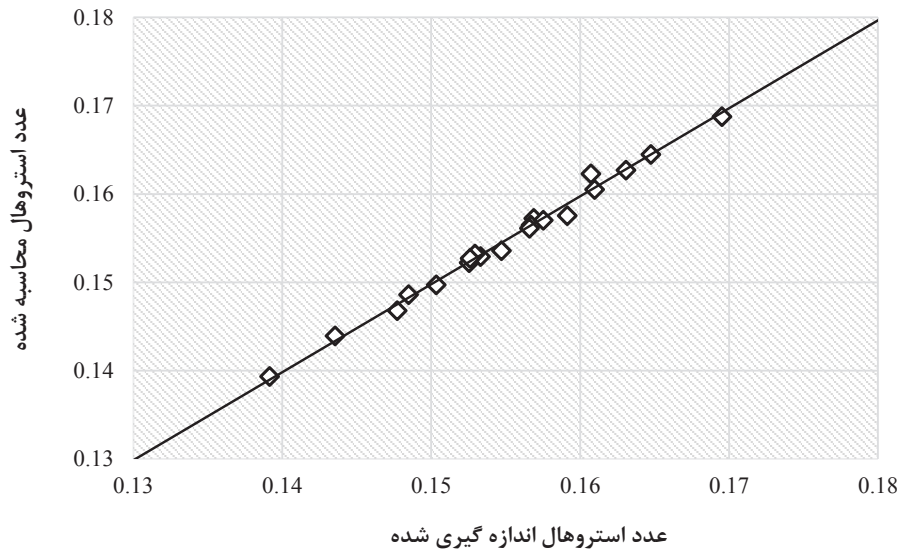


شکل ۸. تغییرات عدد استروهل (St) با تغییر فاصله عرضی بدون بعد (T/D) در دبی‌های مختلف

Fig. 8. Variations of Strouhal Number (St) by changing the dimensionless transversal distance (T/D) in different discharges

جدول (۲) نشان داده شده است، فرکانس موج با افزایش دبی جریان افزایش می‌یابد. بنابراین فرکانس موج و دبی جریان باهم رابطه مستقیم دارند. همان‌طور که عنوان شد، عدد استروهل، در تحلیل پدیده‌های تحت تأثیر گردابه و وابسته به زمان مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شکل ۸ تغییرات عدد استروهل برای موانع مکعبی با تغییر فاصله عرضی بدون بعد نشان داده شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود با افزایش فاصله عرضی موانع (کاهش تراکم موانع)، عدد استروهل افزایش می‌یابد. می‌توان چنین گفت

برای دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه در عمق ۲۵۰ میلی‌متر، برای دبی ۳۴ لیتر بر ثانیه در عمق ۲۶۹ میلی‌متر و برای دبی ۳۸ لیتر بر ثانیه در عمق ۲۹۶ میلی‌متر اتفاق افتاده است. همچنین نتایج نشان داد برای هر فاصله عرضی، در هر دبی با افزایش شماره موج، حالت تشدید در عمق پایین‌تری تشکیل می‌شود به‌طوری‌که در هر دبی بیشترین عمق تشکیل شده مربوط به موج نوع یک و کمترین آن مربوط به موج نوع چهار می‌باشد. از دیگر نتایج این بخش می‌توان به رابطه بین فرکانس موج و دبی جریان اشاره کرد. همان‌طور که در



شکل ۹. مقایسه مقادیر عدد استروهل محاسبه شده و اندازه گیری شده

Fig. 9. Comparison of calculated and measured Strouhal Number values

$$St = K \left(\frac{A}{H}\right)^a \left(\frac{T}{D}\right)^b (n)^c (Re)^d (Fr)^e \quad (۶)$$

با استفاده از رگرسیون غیرخطی توسط نرم افزار SPSS Statistic و داده های آزمایشگاهی ضرایب رابطه ۶ برای موانع مکعبی تعیین شد. بدین صورت که از مجموع آزمایش های انجام شده، ۸۵ درصد داده ها به منظور کالیبراسیون و تعیین ضرایب استفاده شدند و ۱۵ درصد داده ها که در کالیبراسیون مشارکت نداشتند به منظور صحت سنجی مورد استفاده قرار گرفتند. در نهایت رابطه ۶ به صورت رابطه ۷ برای موانع مکعبی توسعه یافت. بر این اساس مجذور ضریب همبستگی رابطه ۷، ۰٫۹۸ به دست آمد که اعتبار رابطه به دست آمده را تأیید می نماید.

$$St = 0.769 \left(\frac{A}{H}\right)^{0.078} \left(\frac{T}{D}\right)^{0.008} (n)^{0.546} (Re)^{-0.35} (Fr)^{-0.463} \quad (۷)$$

به منظور بررسی میزان دقت معادله ۷، عدد استروهل اندازه گیری شده از آزمایش ها با عدد استروهل محاسبه شده از رابطه ۷ مقایسه شد که نتیجه این مقایسه در شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به مقدار مجذور ضریب همبستگی R^2 معادله ۷ با کمترین میزان خطا تخمین زده شده است.

عدد استروهل وابسته به فرکانس موج و سرعت جریان می باشد، با توجه به نتایج جدول ۲ مشاهده شد در حالت تشدید، فرکانس موج و عمق جریان با فاصله عرضی رابطه مستقیم دارند (افزایش عمق جریان باعث کاهش سرعت جریان می شود)، بنابراین با افزایش فاصله عرضی، مقادیر فرکانس موج افزایش و سرعت جریان نیز کاهش می یابد، در نتیجه با توجه به رابطه (۲)، افزایش فرکانس و کاهش سرعت جریان با افزایش فاصله عرضی موانع، باعث افزایش عدد استروهل می گردد. ویرو و همکاران [۹] در مطالعه خود بیان کردند عدد استروهل با افزایش تراکم موانع کاهش می یابد که با نتایج مطالعه حاضر همخوانی دارد. با افزایش T/D از ۴٫۸ به ۹٫۶ بیشترین میزان درصد افزایش عدد استروهل، معادل ۱۴ درصد بود که مربوط به دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه و موج نوع سه می باشد و کمترین آن معادل ۱٫۵ درصد بود که مربوط به دبی ۳۸ لیتر بر ثانیه و موج نوع دو می باشد.

گام نهایی در تحقیق حاضر، پیش بینی رابطه عدد استروهل در حالت تشدید بود. با توجه به نتایج آنالیز ابعادی (رابطه ۵)، عدد استروهل در تحقیق حاضر تابعی از دامنه نسبی موج A/H ، فاصله عرضی بدون بعد T/D ، تعداد موانع در یک ردیف N ، نوع موج n و اعداد بدون بعد رینولدز مانع Re و فرود Fr می باشد. به دلیل اینکه تعداد موانع در یک ردیف اثر خود را در فاصله عرضی بدون بعد نشان می دهد، از رابطه ۵ حذف گردید و رابطه نهایی برای پیش بینی رابطه عدد استروهل به صورت زیر در نظر گرفته شد:

جدول ۳. نتایج آنالیز حساسیت برای معادله ۷

Table 3. Sensitivity analysis results for Eq. 7

معادله	R ²	RMSE	MAE
معادله ۷	۰٫۹۸	۰٫۰۰۱۶	۰٫۰۰۱۲
معادله ۷ بدون A/H	۰٫۹۳	۰٫۰۰۱۹	۰٫۰۰۱۶
معادله ۷ بدون T/D	۰٫۹۷	۰٫۰۰۱۴	۰٫۰۰۱۲
معادله ۷ بدون n	۰٫۶۸	۰٫۰۰۳۴	۰٫۰۰۲۵
معادله ۷ بدون Re	۰٫۵۲	۰٫۰۰۳۵	۰٫۰۰۲۷
معادله ۷ بدون Fr	۰٫۸۱	۰٫۰۰۲۵	۰٫۰۰۲۴

می‌شود. در تحقیق حاضر به بررسی تأثیر فاصله عرضی موانع مکعبی با آرایش زیگزاگ بر خصوصیات امواج عرضی در یک فلوم عریض پرداخته شد. مهمترین نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر است: رژیم جریان در آزمایش‌ها، زیر بحرانی و آشفته بود و در حالت تشدید، عدد رینولدز مانع و عدد فرود به ترتیب در محدوده $2319 < Re < 5627$ و $0.21 < Fr < 0.55$ بود.

با افزایش فاصله عرضی موانع، دامنه نسبی موج افزایش یافت و بیشترین میزان دامنه نسبی موج تشکیل شده در آزمایش‌ها، برابر ۳۳ درصد برای $T/D=9.6$ ، موج نوع چهار و دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه بود.

در هر نوع موج عمق جریان مورد نیاز برای ایجاد حالت تشدید، با افزایش دبی جریان افزایش یافت و در هر دبی با افزایش شماره موج، حالت تشدید در عمق پایین‌تری تشکیل شد. همچنین فرکانس موج نیز با افزایش دبی جریان افزایش یافت.

با استفاده از تحلیل ابعادی و نتایج حاصل از آزمایش‌ها، رابطه‌ای به منظور تعیین عدد استروهل در حالت تشدید ارائه گردید.

تشکر و قدردانی

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

نکته قابل توجه در خصوص معادله ۷ این است که تأثیر هر کدام از پارامترهای A/H ، T/D ، n ، Re و Fr روی عدد استروهل St به چه میزان است. بنابراین آنالیز حساسیت پارامترها برای معادله ۷ انجام شد. بدین صورت که در ابتدا میزان R^2 ، خطای RMSE و خطای MAE برای معادله ۷ مشخص گردید و در هر مرحله با حذف هر کدام از پارامترهای A/H ، T/D ، n ، Re و Fr از معادله ۷، میزان R^2 ، خطای RMSE و MAE محاسبه گردید و با معادله ۷ مقایسه شد. برای این منظور از ۱۵ درصد داده‌ها که برای صحت‌سنجی مورد استفاده قرار گرفته بودند، استفاده شد. در جدول ۳ نتیجه نهایی آنالیز حساسیت برای معادله ۷ نشان داده شده است. با توجه به نتایج جدول ۳ مشاهده می‌شود که تأثیر پارامتر عدد رینولدز مانع Re بر عدد استروهل از سایر پارامترها بیشتر است و با حذف این پارامتر از معادله ۷، R^2 ۴۶ درصد کم می‌شود و خطای RMSE و MAE به‌طور متوسط دو برابر می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

هنگامی که جریان آب به موانع موجود در مسیر جریان برخورد می‌کند، اغتشاشی موسوم به گردابه ایجاد می‌شود. با هم‌فرکانس شدن فرکانس ناشی از گردابه موانع با فرکانس طبیعی نوسانات سازه پدیده تشدید رخ می‌دهد و امواج عرضی با طول موج‌های متفاوت به شکل منظم در کانال تشکیل

Education, 1979.

۵- فهرست علائم

علائم انگلیسی

A	دامنه موج، m
b	عرض فلوم، m
D	قطر پایه، m
Fr	عدد فرود
f_n	فرکانس طبیعی در کانال، Hz
f_s	فرکانس ناشی از گردابه موانع، Hz
g	شتاب گرانش، m/s^2
H	عمق متوسط جریان، m
N	تعداد موانع در یک ردیف
n	نوع موج
P	فاصله بین ردیف‌های موانع، m
Q	دبی جریان ورودی، m^3/s
Re	عدد رینولدز مانع
St	عدد استروهل
T	فاصله بین موانع در یک ردیف، m
U	سرعت متوسط جریان، m/s

علائم یونانی

λ	طول موج، m
ρ	جرم واحد حجم مایع، Kg/m^3
μ	لزوجت دینامیکی سیال، Kg/ms

منابع

- [4] A. Jafari, M. Ghomeshi, M. Bina, S.M. Kashefipour, Experimental study on ten modes of transverse waves due to vertical cylinders in open channels, Journal of Food, Agriculture and Environment, 8(2) (2010) 949-955.
- [5] N. Poustizadeh, M. Ghomeshi, Experimental Study on the Effect of Transverse Waves on Suspended Sediment Concentration at Downstream of Obstacles in a Staggered Arrangement, Water and Soil Science, 26(2-1) (2016) 87-100 (in Persian).
- [6] S. Mostafavi, M. Ghomeshi, B. Shahmoradi, Resonance Frequency of Transverse Waves Due to Vortex Shedding of Obstacles with Different Arrangements, Water and Soil Science, 27(1) (2017) 147-157 (in Persian).
- [7] M.H. Purmohammadi, M. Ghomeshi, S.H. Mosavi Jahromi, S.M. KashefiPour, M. Fathi Moghadam, The study of impact of obstacle shape on the characteristics of transverse waves, Irrigation Sciences and Engineering, 39(1) (2016) 11-20 (in Persian).
- [8] K. Zhao, N.-S. Cheng, Z. Huang, Experimental study of free-surface fluctuations in open-channel flow in the presence of periodic cylinder arrays, Journal of Hydraulic Research, 52(4) (2014) 465-475.
- [9] D.P. Viero, I. Pradella, A. Defina, Free surface waves induced by vortex shedding in cylinder arrays, Journal of Hydraulic Research, 55(1) (2017) 16-26.
- [10] W. Rahmeyer, J.M. Clegg, S.L. Barfuss, Canal Wave Oscillations from Expansion of I-84 Bridge in Boise, Idaho, Transportation research record, 2309(1) (2012) 200-205.
- [11] Z. Soltani-Kazemi, M. Ghomeshi, M.B. Yarahmadi, Experimental study of local scour around diamond bridge piers subject to transverse standing waves, Ain Shams Engineering Journal, 13(3) (2022) 101598.
- [12] Z. Kang, L. Jia, An experiment study of a cylinder's two degree of freedom VIV trajectories, Ocean Engineering, 70 (2013) 129-140.
- [1] N. Shahkarami, E. Moghaddasi, Experimental Investigation of the Characteristics of Surface Oscillations due to Passing flow Through Rigid Vegetation, Amirkabir Journal of Civil Engineering, 50(5) (2018) 827-834 (in Persian).
- [2] L. Zima, N.L. Ackermann, Wave generation in open channels by vortex shedding from channel obstructions, Journal of Hydraulic Engineering, 128(6) (2002) 596-603.
- [3] F.M. White, Fluid mechanics, Tata McGraw-Hill

- 7(24) (2007) 3927-3934.
- [15] M. Purmohammadi, M. Ghomeshi, S. Musavi, Impact of Prismatic-Shaped Obstacle on the Characteristics of Transverse Waves, (2015) (in Persian).
- [13] R.D. Blevins, Flow-induced vibration, New York, (1977).
- [14] R.A. Falconer, Amplitude of wave formation by vortex shedding in open channels, Journal of Applied sciences,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

K. Kamaei, M. Ghomeshi, M. Daryaei, S. M. Kashefipour, An Experimental Analysis of the Impact of the Transverse Distance of Cubic Obstacles on the Hydraulic Characteristics of Transverse Waves in Staggered Arrangements, Amirkabir J. Civil Eng., 56(5) (2024) 551-568.

DOI: [10.22060/ceej.2024.22137.7913](https://doi.org/10.22060/ceej.2024.22137.7913)

