

# بررسی آزمایشگاهی اثر پایه‌های مکعبی مستغرق بر امواج عمود بر جریان در کانال مستطیلی

بهار شاهرادی<sup>۱</sup>، مهدی قمشی<sup>۲\*</sup> و سحر مصطفوی<sup>۳</sup>

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز  
۲- نویسنده مسئول، استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز ghomeshi@scu.ac.ir  
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۰/۲۷

تاریخ دریافت: ۹۴/۸/۱۶

## چکیده

امواج عمود بر جریان در اثر قرار گرفتن موانعی مثل پایه‌های پل، اسکله و ... در مسیر جریان به وجود می‌آید، بدین صورت که پشت موانع گردابه ایجاد شده و در اثر منطبق شدن فرکانس این گردابه‌ها با یکی از فرکانس‌های طبیعی نوسان آب، امواج عمود بر مسیر جریان تشکیل می‌شود. به منظور بررسی اثر پایه‌ها بر امواج، آزمایش‌هایی انجام گرفت. کلیه آزمایش‌های در یک فلوم با عرض ۰/۷۲ متر و ارتفاع جداره ۰/۶ متر به طول ۶ متر صورت گرفت. از تعدادی پایه مکعبی چوبی به عنوان موانع در مسیر جریان استفاده شد. دبی جریان در همه آزمایش‌ها ثابت و برابر با ۲۰ لیتر بر ثانیه و رژیم جریان زیربحرانی بود. در کلیه آرایش‌ها با کاهش ارتفاع موانع مستغرق و افزایش نسبت استغراق آن‌ها، دامنه موج نوع یک و نوع دو به تدریج کاهش یافت تا موج به طور کامل محو گردد. به طور مثال در آزمایش شماره یک در استغراق ۲۱ درصد هیچ‌گونه موجی مشاهده نشد. همچنین حداکثر دامنه در حالت آزاد بیشتر از مقدار آن در حالت مستغرق مشاهده شد. به طور مثال در آزمایش شماره یک دامنه موج نوع یک، ۴/۳ میلی‌متر بود که با مستغرق کردن موانع این دامنه کاهش یافت تا دیگر هیچ‌گونه موجی دیده نشود. در نهایت رابطه‌ای برای تخمین دامنه امواج عمود بر جریان در حالت مستغرق ارائه گردید.

کلید واژه‌ها: امواج عمود بر جریان، موانع مستغرق، گردابه، فرکانس، تشدید، دامنه.

## Experimental Investigation of the Effect of Submerged Cubic Obstacles on The Transverse Wave In A Rectangular Channel

B. Shahmoradi<sup>1</sup>, M. Ghomeshi<sup>2\*</sup> and S. Mostafavi<sup>3</sup>

- 1- M.Sc. Student, Department of Hydraulic Structures, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.  
2\* - Corresponding Author, Professor, Department of Hydraulic Structures, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.  
3- M.Sc. Student, Department of Hydraulic Structures, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

Received: 7 November 2015

Accepted: 17 January 2016

## Abstract

Vortex is created when flow passed a group of obstacles such as bridges piers, docks and etc. Transverse wave is created by overlapping the vortex that created behind obstacles and due to adapting of the vortexes frequency with natural frequency, of channel dimension. All experiments in this study are done on a flume with 6m in length, 0.72m in wide and 0.6m in height. As obstacles in the flow were, wooden cubic obstacles. The discharge of flow was equal to 20 lit/s and the regime of flow was sub-critical. In all arrangements by reducing the height of submerged obstacles and increasing their submergence ratio, gradually wave amplitude of type 1 and type 2 is reduced and the maximum amplitude was also reduce until it completely disappears. For example, in test No. 1 with 21% submergence any wave was not observed. also the maximum amplitude in the non-submerged situation was more than the submerged situation. For example, in test No. 1 the maximum amplitude of wave is type 1 was 4.3 mm, This value reduced to zero in the submerged situation. Finally a relationship is proposed to estimate of amplitude of transverse waves for submerged case.

**Keywords:** Transverse waves, Submerged obstacles, Vortex, Frequency, Resonance, Amplitude.

## مقدمه

در مجاری روباز، هنگامی که جسم ساکنی در مسیر جریان سیال قرار گیرد، سرعت سیال درروی مرزهای جسم صفر می‌شود، در نتیجه در مجاورت مرز جسم، گرادیان سرعت بزرگی به وجود می‌آید که باعث ایجاد تنش برشی شده و در نهایت سبب تشکیل لایه مرزی در پیرامون جسم می‌شود. به صفر رسیدن سرعت لایه مرزی و افزایش فشار در امتداد جریان، پدیده جدایی<sup>۱</sup> خطوط جریان رخ می‌دهد. در پایین دست نقطه جدایی، ناحیه دنباله<sup>۲</sup>، گردابه<sup>۳</sup> و لایه‌های برشی<sup>۴</sup> تشکیل می‌شود (انتظاری، ۱۳۸۱). در شکل (۱) نمای شماتیکی از تشکیل گردابه در پیرامون یک مانع نشان داده شده است.

امواج عمود بر جریان<sup>۵</sup> پدیده‌ای هیدرودینامیکی است که در مجاری روباز در اثر عبور جریان سیالات از پیرامون مواعی که در مسیر جریان قرار گرفته‌اند، ایجاد می‌شود. این پدیده در اثر منطبق شدن فرکانس گردابه ناشی از مواعی با یکی از فرکانس‌های طبیعی نوسان آب، امواج عمود بر جریان با حداکثر دامنه ایجاد می‌شوند (انتظاری، ۱۳۸۱).

کراس<sup>۶</sup> (۱۹۳۹) یافته‌های خود را در مورد امواج تولید شده در کانال‌های باز منتشر کرده است که احتمالاً اولین تحقیق در این زمینه است. شوستر<sup>۷</sup> (۱۹۶۷) برای زمانی که جاده از روی کانال عبور می‌کند، به وسیله دو سری از پایه‌ها، نوسانات ناشی از پایه‌های پل را مورد بررسی قرار داد. با حمایت و تصمیم‌گیری عمران و آبادی ایالات متحده آمریکا، با توجه به نوسان امواج عرضی که در کیلومترهای ۹۱/۰۹ و ۱۳۱/۴۸ کانال دلتا مندوتا<sup>۸</sup> مشاهده شده بود، اقدام به ساخت و بررسی مدل آزمایشگاهی آن به همراه پل موجود نمود. موج عرضی مشاهده شده در کانال، دارای دامنه‌ای به میزان ۶۱ سانتی‌متر در دبی ۸۸ مترمکعب در ثانیه بود. توجیموتو<sup>۹</sup> (۱۹۹۲) و توجیموتو و کیتامورا<sup>۱۰</sup> (۱۹۹۲) مزاحمت‌های سطحی شبیه موج در هنگام مطالعات بر روی مدل هیدرولیکی در موقع عبور جریان کانال از بین مواعی یا ساقه‌های عمودی را مشاهده نمودند. این مطالعات در فلوم با طول ۱۲ متر و عرض ۰/۴ متر صورت گرفت. ۳۰ درصد از عرض ۰/۴ متری فلوم به وسیله ساقه‌های مابمو به قطر ۱/۲ میلی‌متر پوشانده شده بود (به نقل از پورمحمدی، ۱۳۹۳).

استون<sup>۱۱</sup> (۱۹۹۷) زمانی که در حال آزمایش روی شبیه‌سازی زبری توسط مواعی چوبی واقع در کف کانال بود، متوجه وجود

نوسانات شدید در بعضی از آزمایش‌ها شدند. این آزمایش‌ها درباره افت انرژی جریان بود و سیال مورد آزمایش آب بود. زیما و اکرم<sup>۱۲</sup> (۲۰۰۲) با انجام آزمایش‌های متعددی در دو فلوم شیب‌دار یکی به عرض ۰/۱۵ متر و طول ۲/۷۵ متر با مواعی استوانه‌ای چوبی به قطر ۱۲/۷ میلی‌متر و دیگری فلومی با عرضی برابر ۰/۴۵ متر و طول ۱۲ متر با مواعی استوانه‌ای چوبی به قطر ۲۵/۴

میلی‌متر، به بررسی امواج عرضی عمود بر مسیر جریان ناشی از گردابه منتشر شده پس از برخورد جریان با مواعی پرداختند و در آزمایش‌ها خود امواج نوع یک و نوع دو را مشاهده کردند. در نهایت رابطه‌ای برای حداکثر دامنه نسبی امواج عرضی ( $A/h$ ) ارائه نمود. قمشی و همکاران<sup>۱۳</sup> (۲۰۰۷) به بررسی موج در عرض‌های متفاوت کانال با استفاده از میله‌های استوانه‌ای چوبی به قطر ۲۴ میلی‌متر و ارتفاع ۰/۳ متر پرداختند. با مشاهده امواج نوع یک، دو، سه و چهار روابطی برای محاسبه حداکثر دامنه نسبی امواج عرضی ( $A/h$ ) ارائه نمودند. جعفری و قمشی (۱۳۸۹) حالت تشدید و تشکیل امواج با حداکثر دامنه را در برخورد جریان با مواعی استوانه‌ای با استفاده از چهار قطر مختلف، بررسی نمودند. در نهایت به رابطه‌ای جهت محاسبه دامنه نسبی حداکثر امواج عمود بر جریان ( $A/H$ ) برای این مواعی دست یافتند.

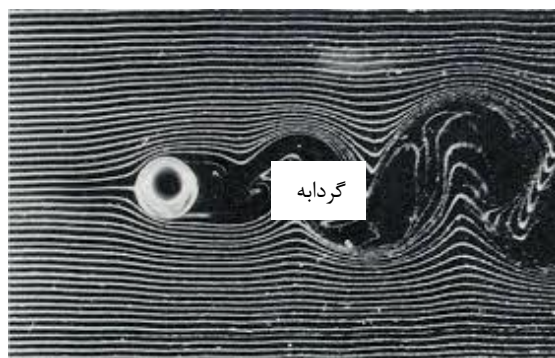
سید ابوترابی و قمشی (۱۳۹۰) تأثیر ارتفاع مواعی بر اندازه دامنه امواج حاصله را بررسی نمودند. در نهایت به روابطی برای تعیین حداکثر دامنه بی‌بعد ( $A/h$ ) امواج نوع یک و نوع دو در حالت استغراق مواعی استوانه‌ای در مجاری روباز دست یافتند. عزیززی و قمشی<sup>۱۴</sup> (۲۰۱۰) تأثیر امواج عمود بر جریان ناشی از گردابه را بر ظرفیت انتقال رسوبات در مجاری روباز، بررسی نمود و رابطه‌ای جدیدی برای محاسبه عدد استروهل (St) برای سیال مایع به دست آورد.

مقدسی (۱۳۹۳) به بررسی آزمایشگاهی امواج عمود بر جریان در اثر مواعی استوانه‌ای مستغرق پرداخت و به رابطه‌ای برای دامنه نسبی دست یافت.

با توجه به این نکته که بیشتر تحقیقات انجام شده در خصوص امواج عمود بر جریان ناشی از مواعی استوانه‌ای در حالت آزاد بوده است و در شرایط مستغرق مطالعات بسیار اندک است. در این پژوهش به بررسی امواج عمود بر جریان در اثر برخورد با پایه‌های مکعب مستطیلی در حالت مستغرق پرداخته شده است و در آن مشخصات امواج عمود بر جریان نظیر دامنه موج و فرکانس امواج با تغییر آرایش و فاصله بین مواعی ثابت و ارتباط بین آن‌ها بررسی گردیده است.

- 1- Separation
- 2- Wake
- 3- Vortex
- 4- Shear layers
- 5- Transverse waves
- 6- Crasse
- 7- Schuster
- 8- Delta Mendota Canal
- 9- Tsujimoto
- 10- Tsujimoto and Kitamura
- 11- Stone

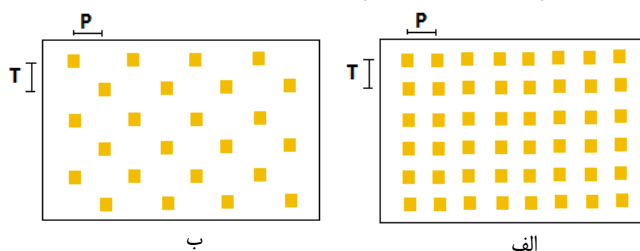
12- Zima and Ackermann  
13 - Ghomeshi *et al.*  
14 - Azizi and Ghomeshi



شکل ۱- نمای شماتیک تشکیل گردابه در پیرامون مانع



شکل ۲- فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در آزمایش‌های تحقیق



شکل ۳- آرایش‌های مختلف موانع مکعبی، الف) موازی و ب) زیگزاگی

آرایش‌های مختلف موازی و زیگزاگی و فواصل مختلف در کف فلوم مانند شکل (۳) نصب گردید.

در این پژوهش در مجموع ۱۴۹ آزمایش صورت گرفت. در جدول (۱) خلاصه‌ای از مشخصات این آزمایش‌ها آورده شده است. ستون‌های جدول (۱) به ترتیب شماره آزمایش، فاصله موانع از یکدیگر برحسب میلی‌متر، فاصله ردیف موانع از یکدیگر برحسب میلی‌متر، آرایش موانع، دبی جریان برحسب لیتر بر ثانیه، عرض فلوم آزمایشگاهی برحسب میلی‌متر، تعداد متوسط موانع در دو ردیف متوالی، تعداد آزمایش‌های موج نوع یک و دو با موانع مستغرق و غیرمستغرق است.

در هر یک از آزمایش‌ها، درپچه‌ی کشویی از یک مقدار حداکثر (برابر با ارتفاع موانع) تا ارتفاعی که موج نوع دو محو می‌شد، با گام‌های ۱۰ میلی‌متری پایین آورده شد و حداکثر میزان جابه‌جایی موج روی دیواره فلوم با استفاده از خط‌کش‌هایی که روی دیواره فلوم نصب شده بود، با دقت اندازه‌گیری  $\pm 1$  میلی‌متر اندازه‌گیری شد. در مرحله دوم، برای هر نوع آزمایش، درپچه در جایی که دامنه موج نوع یک به حداکثر مقدار خودش رسیده، ثابت

### مواد و روش‌ها

آزمایش‌های این پژوهش در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز روی یک فلوم مستطیلی به طول ۶ متر، عرض ۰/۷۲ متر و ارتفاع ۰/۶ متر انجام گرفت. نمایی از فلوم آزمایشگاهی در شکل (۲) نشان داده شده است.

به منظور تعیین دبی از دبی سنج دیجیتالی که در ابتدای سیستم ورودی تعبیه شده بود استفاده گردید. همچنین به منظور تنظیم ارتفاع آب داخل فلوم موردنظر برای بررسی حالت‌های مختلف تشکیل امواج، از درپچه‌ای که در پایین دست کار گذاشته شده بود استفاده گردید. پایه‌های چوبی با سطح مقطع مربعی با اندازه ضلع ۲۵ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰ میلی‌متر که با توجه به اینکه پایه‌های چوبی کاملاً با آب در تماس بودند، برای جلوگیری از تورم و تغییر شکل آن‌ها، با لایه‌ای از مواد پوششی جلا دهنده آغشته گردید. صفحات پلکسی گلاس شبکه‌بندی شده برای قرار دادن پایه‌ها روی آن، در کف فلوم قرار گرفت. موانع در

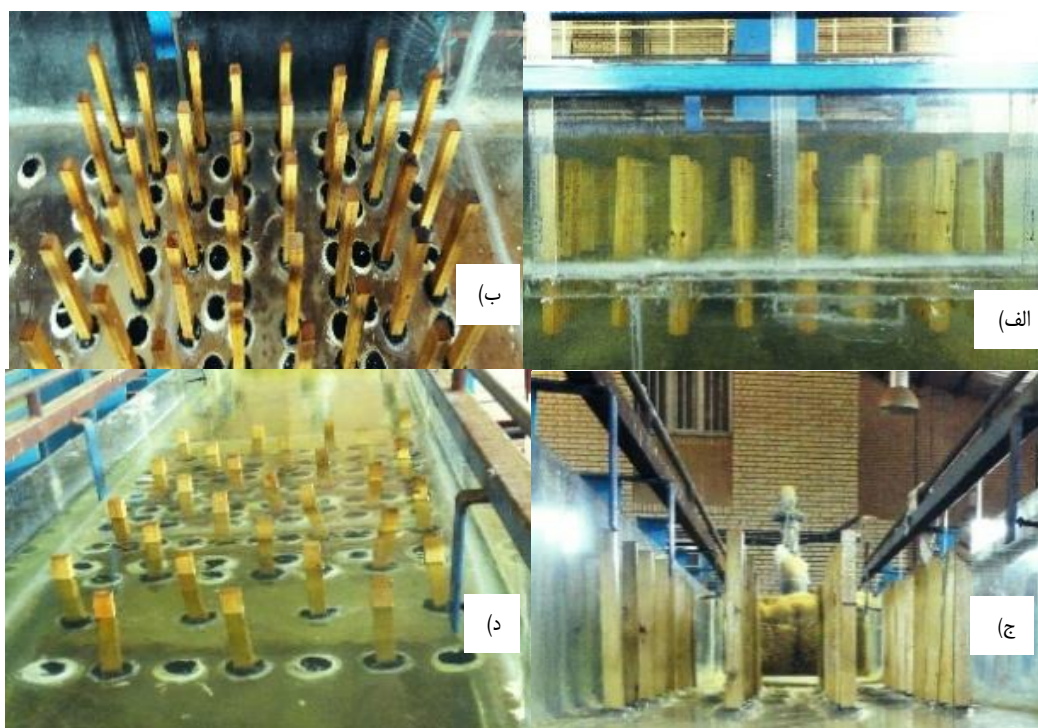
شاهمرادی و همکاران: بررسی آزمایشگاهی اثر پایه‌های مکعبی مستغرق...

زمان‌سنج، زمان ۱۰ نوسان موج نیز اندازه‌گیری و ثبت گردید. لازم به ذکر است که دبی جریان در طول آزمایش‌ها ثابت و برابر ۲۰ لیتر بر ثانیه تنظیم شد (دقت اندازه‌گیری دبی سنج  $\pm 0.1$  لیتر بر ثانیه است). در شکل (۴) نمونه‌هایی از آرایش پایه‌ها در کف فلوم آزمایشگاهی نشان داده شده است.

نگه‌داشته و با پایین بردن موانع، ارتفاعشان را کم کرده تا زمانی که موج نوع یک محو گردد. عیناً این عمل برای موج نوع دو در حداکثر مقدارش تکرار شد. همچنین در فاصله یک متر بالادست و پایین دست به منظور اندازه‌گیری عمق جریان با استفاده از خط کش‌هایی که روی دیواره فلوم در این مقاطع نصب شده بود، عمق جریان با دقت  $\pm 1$  میلی‌متر اندازه‌گیری شد. با استفاده از

### جدول ۱- آزمایش‌های اولیه انجام شده

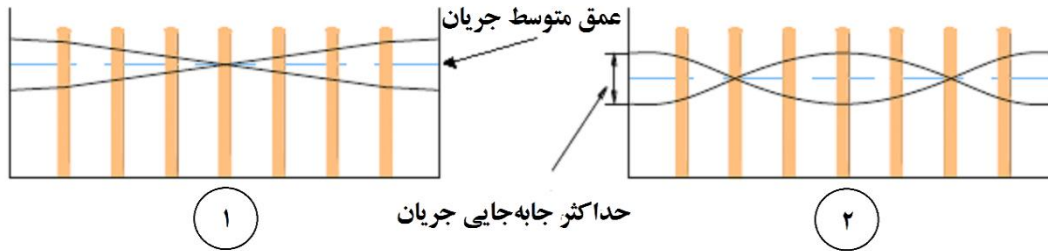
شماره آزمایش	فاصله طولی P (میلی‌متر)	فاصله عرضی T (میلی‌متر)	آرایش موانع	دبی جریان Q (لیتر بر ثانیه)	عرض فلوم b (میلی‌متر)	تعداد موانع در دو ردیف متوالی N	تعداد آزمایش‌ها		
							موج نوع یک	موج نوع دو	
۱	۱۲۰	۱۲۰	موازی	۲۰	۷۲۰	۶	۱۴	۵	
۲	۱۸۰	۱۸۰	موازی	۲۰	۷۲۰	۴	۲۱	۸	
۳	۱۲۰	۱۲۰	زیگزاگی	۲۰	۷۲۰	۵/۵	۱۶	۷	
۴	۱۸۰	۱۸۰	زیگزاگی	۲۰	۷۲۰	۳/۵	۱۹	۹	
تعداد کل آزمایش‌ها							۷۰	۲۸	۲۹
							۲۲		



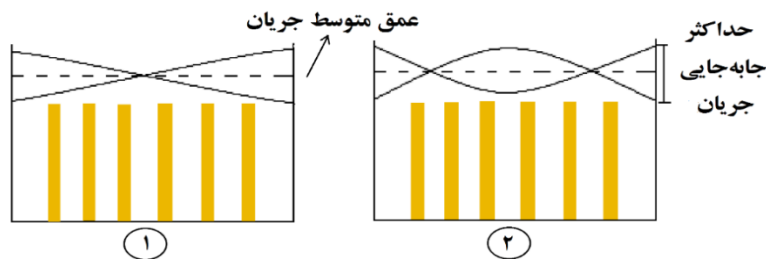
شکل ۴- نمونه‌هایی از آرایش پایه‌های چوبی در کف فلوم، (الف)  $120 \times 120$  موازی، (ب)  $120 \times 120$  زیگزاگی (ج)  $180 \times 180$  موازی، (د)  $180 \times 180$  زیگزاگی.

**جدول ۲- عدد رینولدز موانع و عدد فرود جریان در آرایش‌های مختلف موانع**

نوع آرایش	عدد رینولدز		عدد فرود	
	موج نوع یک	موج نوع دو	موج نوع یک	موج نوع دو
۱۲۰×۱۲۰ موازی	۶۳۵۴/۴	۷۴۲۱/۵	۰/۱۴	۰/۱۸
۱۲۰×۱۲۰ زیگزاگی	۳۴۳۷/۸	۸۲۶۰/۹	۰/۰۹	۰/۱۸
۱۸۰×۱۸۰ موازی	۴۳۰۰	۷۲۳۳/۸	۰/۱۳	۰/۲۹
۱۸۰×۱۸۰ زیگزاگی	۵۰۷۸/۹	۵۶۴۵/۹	۰/۱۷	۰/۲



**شکل ۵- امواج عمود بر جریان نوع یک و دو در مجاری روباز در حالت غیر مستغرق (راشکو، ۱۹۶۰)**



**شکل ۶- امواج عمود بر جریان نوع یک و دو در مجاری روباز در حالت مستغرق در این پژوهش**

بر جریان در مجاری روباز که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته‌اند، از نوع امواج ایستا و عرضی هستند. امواج به وسیله خصوصیتی مانند دامنه موج (A)، طول موج (λ)، فرکانس (f) و... از یکدیگر تفکیک می‌شوند، در امواج عمود بر جریان، در حالت حداکثر دامنه امواج (تشدید)، طول موج رابطه مستقیم با عرض فلوم دارد و از روابط (۱) و (۲) به دست می‌آید (قمشی و همکاران، ۲۰۰۷):

$$\lambda_{n=1} = 144cm \rightarrow \lambda = 2b \rightarrow n = 1 \quad (1)$$

$$\lambda_{n=2} = 144cm \rightarrow \lambda = 1b \rightarrow n = 2 \quad (2)$$

در روابط (۱) و (۲)، λ: طول موج، n: نوع موج و b: عرض کانال است و همواره رابطه  $n = \frac{2b}{\lambda}$  برقرار است. در شکل‌های (۵) و (۶) موج نوع یک و نوع دو به ترتیب برای حالت غیر مستغرق (راشکو، ۱۹۶۱) و مستغرق (در این پژوهش) نشان داده شده است.

مقادیر عدد رینولدز موانع و عدد فرود جریان در جدول (۲) ارائه شده است. با توجه به عدد فرود جریان، رژیم جریان زیر بحرانی است و مقادیر عدد رینولدز در محدوده پیشنهادی لینهارد<sup>۱</sup> (۱۹۶۶) برای ایجاد امواج عمود بر جریان است.

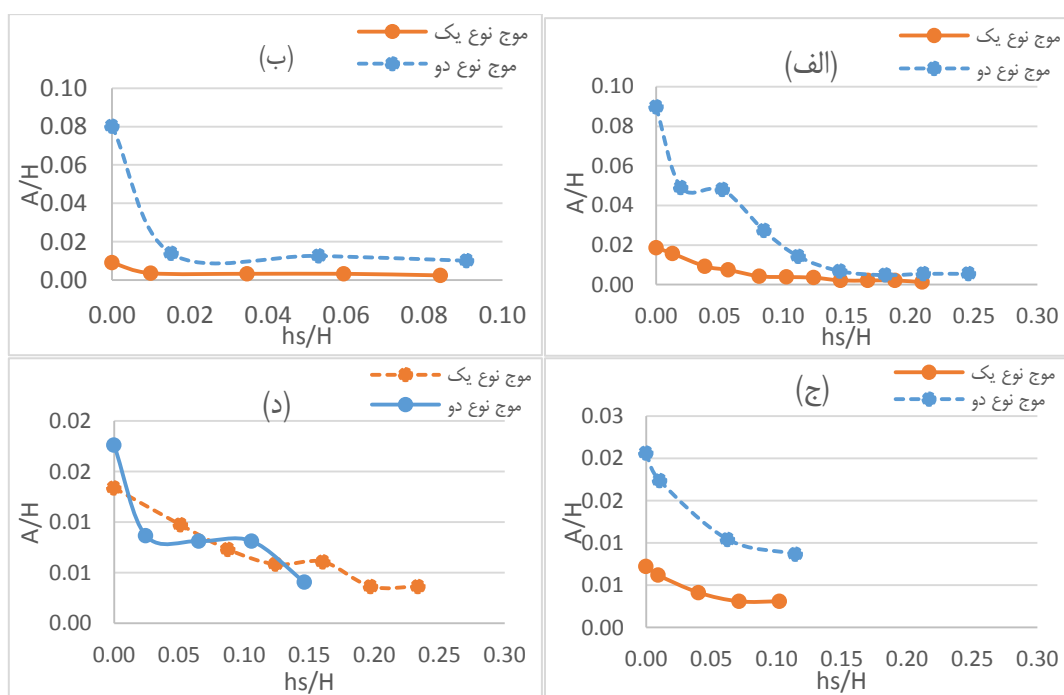
### نتایج و بحث

در اثر حرکت متناوب ذرات محیط، امواج در محیط انتشار می‌یابند. در صورتی که شکل موج با زمان حرکت نماید، نوع موج پیش‌رونده خواهد بود و چنانچه موج ایجاد شده به‌طور کامل توسط دیواره‌های قائم منعکس گردد، نوع موج ایستا خواهد بود. همچنین امواج به دودسته طولی و عرضی تقسیم می‌شوند. امواج طولی باعث تغییر شکل و جابه‌جایی ذرات محیط در جهت جریان می‌شوند در حالی که امواج عرضی باعث تغییر شکل و جابه‌جایی ذرات محیط در امتداد عمود بر جهت جریان می‌شوند (عطایی آشتیانی و بهشتی، ۱۳۸۵). با توجه به این توضیحات، امواج عمود

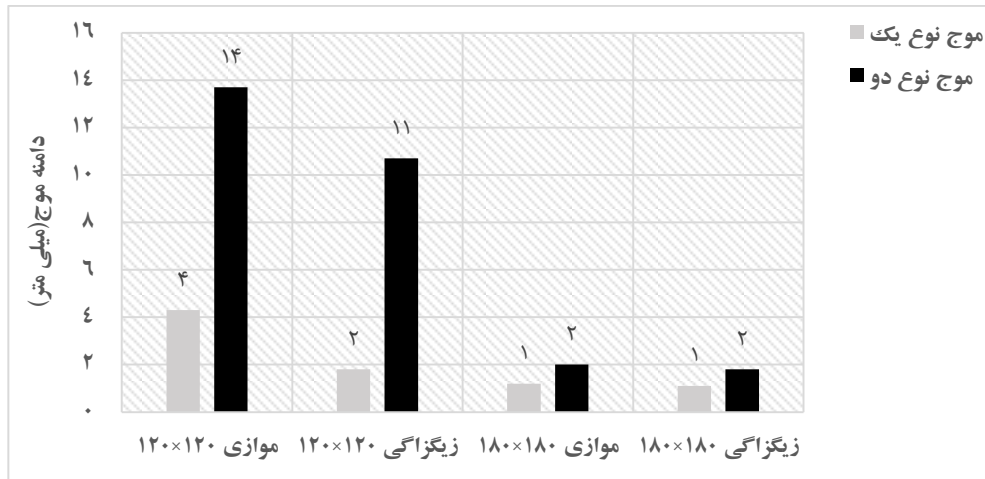
میانگین‌گیری اعداد روی سه خط‌کش میانی به‌دست‌آمده است. با توجه به این نمودار، حداکثر دامنه موج نوع یک مربوط به آرایش پایه‌ها بافاصله طولی و عرضی ۱۲۰ میلی‌متر در آرایش موازی است که برابر ۴/۳ میلی‌متر است و کمترین دامنه موج نوع یک مربوط به آرایش پایه‌ها بافاصله طولی و عرضی ۱۸۰ میلی‌متر در آرایش زیگزاگی است که برابر ۱/۱ میلی‌متر است. حداکثر دامنه موج نوع دو مربوط به آرایش پایه‌ها بافاصله طولی و عرضی ۱۲۰ میلی‌متر در آرایش موازی است که برابر ۱۳/۷ میلی‌متر است و کمترین دامنه موج نوع یک مربوط به آرایش پایه‌ها بافاصله طولی و عرضی ۱۸۰ میلی‌متر در آرایش زیگزاگی است که برابر ۱/۸ میلی‌متر است. پس می‌توان به این نتیجه دست‌یافت که با کاهش فاصله موانع و افزایش تراکم آن‌ها (آرایش موازی متراکم‌تر از آرایش زیگزاگی است)، دامنه موج بیشتری ایجاد می‌شود که با نتایج پورمحمدی (۱۳۹۳) هم‌خوانی دارد.

نمودارهای شکل (۷) تغییرات نسبت دامنه موج به عمق متوسط جریان (دامنه نسبی) را در مقابل نسبت عمق استغراق به عمق متوسط جریان (استغراق نسبی) نشان می‌دهد. با توجه به این نمودارها با افزایش عمق استغراق روی موانع، دامنه نسبی کاهش می‌یابد. در آزمایش یک و دو برای موج نوع دو، با مستغرق سازی موانع افت شدیدی (به ترتیب ۴ و ۵ درصد) در دامنه نسبی مشاهده می‌شود ولی در آزمایش سه و چهار این مقدار افت در حدود یک درصد است که می‌توان گفت در آرایش ۱۲۰×۱۲۰ نسبت به آرایش ۱۸۰×۱۸۰، استغراق موانع تأثیر بیشتری روی دامنه نسبی دارد. روند تغییرات موج نوع یک در آزمایش چهار با مستغرق سازی موانع متفاوت بوده و دیرتر (در استغراق ۲۵ درصد) محو می‌گردد.

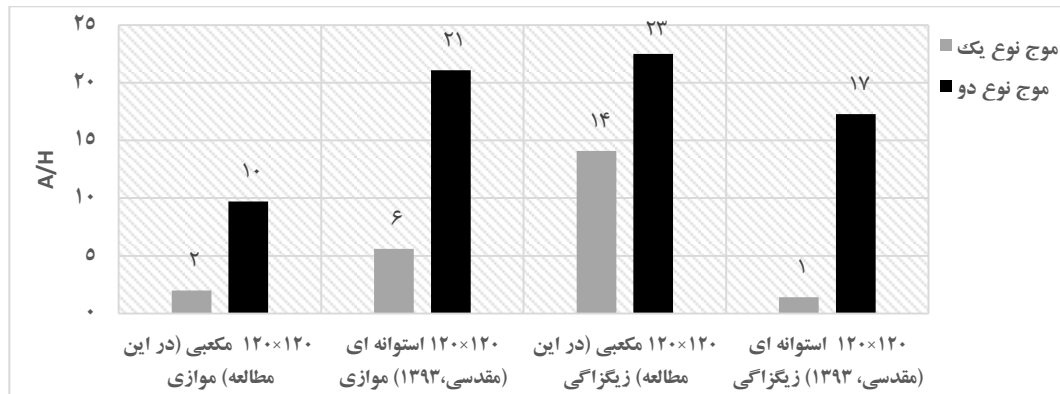
به‌منظور بررسی تأثیر فاصله موانع از یکدیگر روی دامنه امواج ایجادشده شکل (۸) ترسیم‌شده است. این شکل مقادیر حداکثر دامنه موج نوع یک و موج نوع دو را نشان می‌دهد که از



شکل ۷- تغییرات دامنه نسبی نسبت به استغراق نسبی برای پایه‌های مکعبی با آرایش‌های مختلف، (الف) آرایش ۱۲۰×۱۲۰ موازی، (ب) آرایش ۱۲۰×۱۲۰ زیگزاگی، (ج) آرایش ۱۸۰×۱۸۰ موازی، (د) آرایش ۱۸۰×۱۸۰ زیگزاگی



شکل ۸- حداکثر دماخه امواج ایجادشده در آزمایش



شکل ۹- حداکثر دماخه نسبی در آرایش موزی و زیگزگی ۱۲۰×۱۲۰

در موانع مکعبی رسیده که در حدود ۹۰ درصد افزایش را نشان می‌دهد. همچنین حداکثر دماخه موج نوع دو، ۱۷/۳ میلی‌متر در موانع استوانه‌ای به ۲۲/۵ میلی‌متر در موانع مکعبی رسیده که در حدود ۲۳ درصد افزایش را نشان می‌دهد. علت این امر این است که فاصله موانع در آرایش زیگزگی نسبت به آرایش موزی بیشتر بوده و موانع کمتر در ناحیه ورتکس یکدیگر قرار گرفته و دماخه نسبی حداکثر مشاهده شده در آزمایش‌ها به حالت واقعی نزدیک‌تر است. با توجه به مطالعات قبلی و مشاهدات این تحقیق می‌توان پارامترهای مؤثر روی امواج عمود بر جریان در برخورد به موانع موجود در مسیر جریان را به صورت زیر نوشت:

$$f(Q, v, H, D, b, P, h_{ob}, A_n, A_{sb}, \mu, \rho, n, \lambda, g, f) = 0 \quad (3)$$

که در آن، Q: دبی جریان، v: سرعت جریان، D: قطر موانع، H: عمق جریان، b: عرض فوم، P: فاصله عرضی و طولی،  $h_{ob}$ : ارتفاع موانع،  $A_n$ : دماخه موج در حالت آزاد،  $A_{sb}$ : دماخه موج در حالت مستغرق،  $\mu$ : لزجت دینامیکی،  $\rho$ : جرم مخصوص،  $n$ : نوع موج،  $\lambda$ : طول موج، g: شتاب ثقل و f: فرکانس موج است.

به منظور بررسی تأثیر شکل موانع بر دماخه نسبی ایجادشده شکل (۹) با استفاده از داده‌های پژوهش حاضر (برای موانع مکعبی) و مقدسی (۱۳۹۳) (برای موانع استوانه‌ای) رسم گردیده است. با توجه به آن، از مقایسه نمودارهای آرایش ۱۲۰×۱۲۰ موزی مشاهده می‌شود که حداکثر دماخه نسبی موج نوع یک و نوع دو برای موانع استوانه‌ای بیشتر از موانع مکعبی است. به طوری که حداکثر دماخه نسبی موج نوع یک، ۵/۶ میلی‌متر در موانع استوانه‌ای به دو میلی‌متر در موانع مکعبی رسیده که در حدود ۶۴ درصد کاهش را نشان می‌دهد. همچنین دماخه نسبی موج نوع دو، ۲۱/۱ میلی‌متر در موانع استوانه‌ای به ۹/۷ میلی‌متر در موانع مکعبی رسیده که در حدود ۵۴ درصد کاهش را نشان می‌دهد. علت این امر آن است که گردابه ایجادشده در پشت موانع مکعبی زیاد بوده و چون موانع بعدی در ناحیه گردابه این موانع قرار می‌گیرند و همدیگر را خنثی می‌کنند، در نتیجه مقدار دماخه نسبی حداکثر مشاهده شده در آزمایش‌ها نسبت به حالت واقعی در مقدار کمتری رخ می‌دهد. با مقایسه نمودارهای آرایش ۱۲۰×۱۲۰ در آرایش زیگزگی مشاهده می‌شود که در این حالت دماخه نسبی موانع مکعبی از موانع استوانه‌ای بیشتر است. به طوری که حداکثر دماخه نسبی موج نوع یک، ۱/۴ میلی‌متر در موانع استوانه‌ای به ۱۴/۱ میلی‌متر

در این رابطه،  $f$ : فرکانس موج،  $v$ : سرعت جریان،  $D$ : قطر موانع و  $St$ : عدد استروهال موانع است (قمشی و همکاران، ۲۰۰۷). با به‌کارگیری ۸۰ درصد داده‌ها، مقادیر  $a, b, c, k$  به‌دست‌آمده برای موج نوع یک و نوع دو متفاوت و به شرح جدول (۳) است. لازم به ذکر است از ۲۰ درصد باقیمانده داده‌ها جهت صحت سنجی استفاده شده است.

همچنین در رابطه (۶) به ازای مقدار  $a=0$  (بی‌تأثیر کردن پارامتر بی‌بعد مربوط به فاصله موانع)، سایر ثابت‌ها محاسبه شد که به شرح جدول (۴) است.

همچنین در رابطه (۶) به ازای مقادیر  $a=0$  و  $c=0$  (بی‌تأثیر کردن پارامترهای بی‌بعد مربوط به فاصله موانع و عدد استروهال موانع)، سایر ثابت‌ها محاسبه شد که به شرح جدول (۵) است. با توجه به جدول‌های (۳)، (۴) و (۵) و مقایسه مقادیر به‌دست‌آمده، بهترین تخمین برای به دست آوردن دامنه امواج در حالت مستغرق با استفاده از جدول (۲) و رابطه (۶) به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\frac{A_{sb}}{A_n} = 0.001 \frac{\left(\frac{P}{H}\right)^{1.629} \cdot \left(\frac{h_{ob}}{H}\right)^{6.543}}{St^{1.616}}, n = 1 \quad (۸)$$

$$\frac{A_{sb}}{A_n} = 0.029 \frac{\left(\frac{P}{H}\right)^{1.224} \cdot \left(\frac{h_{ob}}{H}\right)^{6.844}}{St^{0.437}}, n = 2 \quad (۹)$$

در این رابطه  $A_{sb}$ : دامنه موج در حالت مستغرق،  $A_n$ : حداکثر دامنه موج در حالت آزاد،  $P$ : فاصله موانع از یکدیگر،  $D$ : قطر موانع،  $St$ : عدد استروهال موانع (از رابطه (۷) به‌دست می‌آید) و  $h_{ob}$ : ارتفاع موانع می‌باشند.

با انتخاب  $\mu, V$  و  $D$  به‌عنوان پارامترهای تکراری و با استفاده از روش پای باکینگهام پارامترهای بی‌بعد زیر به‌دست آورده شد:

$$f\left(\frac{Q}{v \cdot H^2}, \frac{D}{H}, \frac{b}{H}, \frac{P}{H}, \frac{h_{ob}}{H}, \frac{A_n}{H}, \frac{A_{sb}}{H}, \frac{\lambda}{H}, \frac{\rho v H}{\mu}, \frac{gH}{v^2}, \frac{fH}{v}\right) = 0 \quad (۴)$$

با ساده کردن این پارامترهای بی‌بعد رابطه زیر به دست آورده شد:

$$\frac{A_{sb}}{A_n} = f\left(\frac{P}{H}, \frac{h_{ob}}{H}, \frac{b}{\lambda}, Re, Fr, St\right) = 0 \quad (۵)$$

که در آن،  $Re$ : عدد رینولدز موانع،  $Fr$ : عدد فرود جریان و  $St$ : عدد استروهال موانع است که با توجه به جدول (۲)، جریان زیربحرانی و عدد رینولدز در محدوده لینهارد (۱۹۶۶) است. با توجه به اینکه همواره رابطه  $n = \frac{2b}{\lambda}$  برقرار است. رابطه (۶) برای به‌دست‌آمده آوردن دامنه موج در حالت استغرق است:

$$\frac{A_{sb}}{A_n} = k \cdot \left(\frac{P}{H}\right)^a \cdot \left(\frac{h_{ob}}{H}\right)^b \cdot St^c \quad (۶)$$

در این رابطه،  $A_{sb}$ : دامنه موج در حالت مستغرق،  $A_n$ : حداکثر دامنه موج در حالت آزاد،  $P$ : فاصله موانع از یکدیگر،  $D$ : قطر موانع،  $St$ : عدد استروهال موانع (که با توجه به ثابت ماندن عمق جریان در حالت مستغرق از رابطه (۷) به دست می‌آید) و  $h_{ob}$ : ارتفاع موانع می‌باشند.

$$St = \frac{f \cdot D}{v} \quad (۷)$$

### جدول ۳- مقادیر $a, b, c, k$ برای رابطه (۶)

ضریب	موج نوع یک	موج نوع دو
a	۱/۶۲۹	۱/۲۲۴
b	۶/۵۴۳	۶/۸۴۴
c	-۱/۶۱۶	-۰/۴۳۷
k	۰/۰۰۱	۱/۴۶
$R^2$	۰/۸۹	۰/۷۴

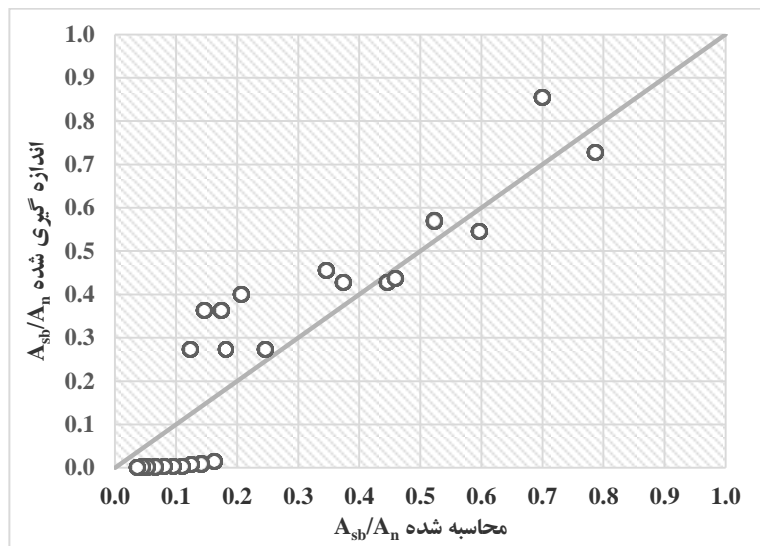
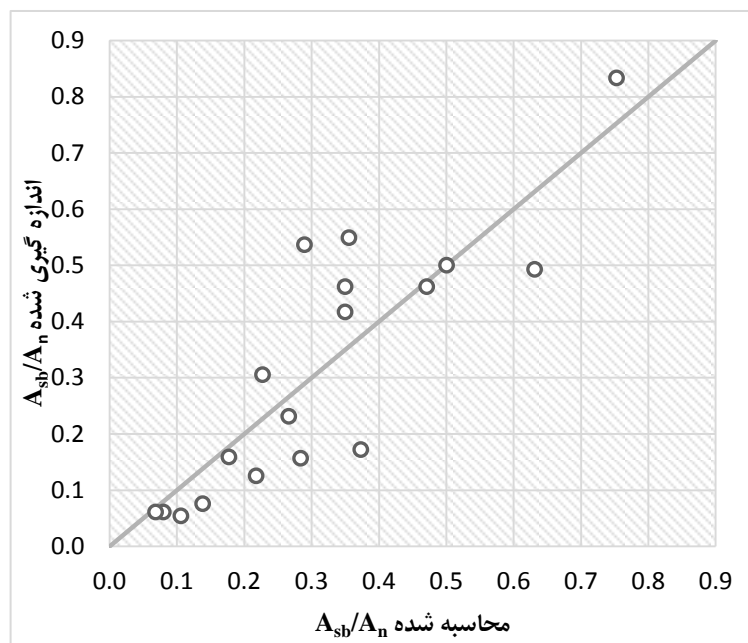
### جدول ۴- مقادیر $b, c, k$ با صفر کردن مقدار ثابت $a$ برای رابطه (۶)

ضریب	موج نوع یک	موج نوع دو
b	۷/۱۸۵	۷/۱۹۶
c	-۲/۴۵۶	-۱/۲۰۴
k	۰/۰۰۴	-۰/۰۶۲
$R^2$	۰/۸۷	۰/۸۷



جدول ۵- مقادیر c, k, با صفر کردن مقدار ثابت a و b برای رابطه (۶)

ضریب	موج نوع یک	موج نوع دو
c	-۱/۸۵	-۱/۶۲۳
k	۰/۰۰۸	۰/۰۱۴
R <sup>۲</sup>	۰/۵	۰/۲۹

شکل ۱۰- رابطه بین  $\frac{A_{sb}}{A_n}$  اندازه گیری شده و  $\frac{A_{sb}}{A_n}$  محاسبه شده برای موج نوع یکشکل ۱۱- رابطه بین  $\frac{A_{sb}}{A_n}$  اندازه گیری شده و  $\frac{A_{sb}}{A_n}$  محاسبه شده برای موج نوع دو

به صورت مستغرق عمود بر مسیر جریان در یک فلوم آزمایشگاهی قرار داشتند، مورد بررسی قرار گرفت و نتایج ذیل مشاهده گردید: در حالت استغراق موانع مکعبی، حداکثر دامنه موج نوع یک و نوع دو کمتر از حالت غیر مستغرق آن‌ها است (با توجه به اینکه آزمایش مرجع در حالت آزاد صورت گرفته است). به طور مثال در آزمایش شماره یک دامنه موج نوع یک،  $\frac{4}{3}$  میلی‌متر است که با مستغرق کردن موانع این دامنه کاهش یافته تا دیگر هیچ‌گونه موجی دیده نشود.

در حالت استغراق موانع مکعبی با کاهش تدریجی ارتفاع موانع و افزایش نسبت استغراق، حداکثر دامنه موج نوع یک و نوع دو کاهش می‌یابد تا موج به طور کامل محو گردد. به طور مثال در آزمایش شماره یک در استغراق ۲۱ درصد هیچ‌گونه موجی مشاهده نمی‌شود.

با استفاده از نرم‌افزار اس پی اس اس و بر اساس پارامترهایی نظیر فاصله موانع، ارتفاع موانع، عمق متوسط جریان، فرکانس موج، دامنه موج در حالت آزاد و دامنه موج در حالت استغراق، روابط (۸) و (۹) به دست آمده است.

شکل‌های (۱۰) و (۱۱) رابطه بین نسبت دامنه‌های اندازه‌گیری از آزمایش‌ها و نسبت دامنه‌های محاسبه شده از روابط (۵) و (۶) را نشان می‌دهد. با توجه به مقدار مجذور ضریب همبستگی، رابطه با کمترین مقدار خطا، تخمین زده شده است. با توجه به اینکه روابط سایر محققان برای موانع استوانه‌ای در حالت آزاد به دست آمده است نمی‌توان مقایسه کاملی بین روابط به دست آمده در این پژوهش با آن‌ها انجام داد. همچنین با مقایسه روابط به دست آمده با مقدسی، می‌توان گفت بهتر است در به دست آوردن رابطه بی‌بعد دامنه نسبی، تأثیر عدد استروهال و فاصله موانع را مورد توجه قرارداد تا تخمین بهتری از دامنه امواج به دست آید.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش، روند تغییرات دامنه موج نوع یک و موج نوع دو زمانی که دبی جریان ثابت و برابر ۲۰ لیتر بر ثانیه است روی آرایش‌های مختلف موانع مکعبی با کاهش ارتفاع موانع که

### منابع

- ۱- انتظاری، ع. ر. ۱۳۸۱. مکانیک سیالات. نشر نو پردازان، ۷۳۶ صفحه.
- ۲- پورمحمدی، م. ح. ۱۳۹۳. بررسی آزمایشگاهی امواج عمود بر جریان ناشی از کشش گردابه پشت موانع منشوری شکل در کانال‌های روباز. رساله دکتری، سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۳- جعفری، الف. و م. قمشی. ۱۳۸۹. بررسی حالت تشدید و تشکیل امواج با حداکثر دامنه در برخورد جریان به موانع با استفاده از چهار قطر مختلف. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، ۱ (۳): ۱-۱۲.
- ۴- سید ابو ترابی، س. و م. قمشی. ۱۳۹۰. بررسی روند تغییرات دامنه امواج عمود بر جریان ایجاد شده توسط موانع مستغرق در مجاری روباز. اولین کنفرانس بین‌المللی و سومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه‌های برق آبی، تهران.
- ۵- عطایی آشتیانی، ب. و ع. الف. بهشتی. ۱۳۸۵. مکانیک امواج آب. انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر، ۴۰۴ صفحه.
- ۶- مقدسی، الف. ۱۳۹۳. بررسی وقوع امواج عمود بر جریان ناشی از ورتکس در محدوده دو پل پنجم و نادری اهواز بر رودخانه کارون. پایان نامه کارشناسی ارشد، سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- 7- Azizi, R. and M. Ghomeshi. 2010. Relationship between the frequency of transverse waves and characteristics of the flow and obstacles in open channels. *Iran-Water Resources Research*, 6(2): 14-16.
- 8- Ghomeshi, M., Mortazavi Dorcheh, S. A. and R. Falconer. 2007. Amplitude of wave formation by vortex shedding in open channels. *Journal of Applied Sciences*, 7(24): 3927-3934.
- 9- Lienhard, J. H. 1966. Synopsis of lift, drag and vortex frequency data for rigid circular cylinders. Washington State University, College of Engineering, Research Division Bulletin 300.
- 10-Roshko, A. 1961. Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds number. *Journal of Fluid Mechanics*. 10(3): 345-356.
- 11-Stone, B. M. 1997. Hydraulics of flow in vegetated channels, M.Sc. Thesis, Department of Civil and environmental. Engineering, Clarkson University, Postdam, New York, USA.

- 12-Stone, B. M. and H.T. Shen. 1999. Hydraulics of flow in vegetated channel with cylindrical roughness. Professor, Water Resources Engineering, ASCE, Seattle.
- 13-Zima, L. and N. Ackermann. 2002. Wave generation in open channels by vortex shedding from channel obstructions. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(6): 596-603.