

## فرکانس تشدید امواج عرضی در اثر گرداب ناشی از برخورد جریان به موانع با آرایش‌های مختلف

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

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۴/۰۶

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۹/۰۲

<sup>۱</sup> دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

<sup>۲</sup> استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

<sup>۳</sup> دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: S.mostafavi109@gmail.com

### چکیده

عبور آب از بین موانع موجود در مسیر جریان همچون پایه‌های پل سبب ایجاد جریان‌های گردابی می‌شود. از هم‌پوشانی گرداب ایجاد شده از هر یک از موانع، امواج عرضی عمود بر جریان آب منتشر می‌شود. هنگامی که فرکانس نیروی گردابه با فرکانس طبیعی جریان برابر شود، پدیده تشدید رخ می‌دهد و امواج عرضی با بیشترین دامنه شکل می‌گیرد که می‌تواند امکان خرابی سازه را فراهم سازد. این امواج همچنین می‌تواند به تهنشین شدن رسوبات معلق کمک کند. در این پژوهش، هدف بررسی و مقایسه فرکانس گردابه در آرایش‌های مختلف موانع موجود در مسیر آب در هنگام تشدید امواج آب و تأثیر متغیرهای مختلف جریان بر آن است. از این رو از یک فلوم مستطیلی جهت انجام آزمایش‌ها در دبی ثابت با به‌کارگیری موانع منشوری با مقطع مثلث در دو حالت برخورد جریان به ضلع و رأس و موانع استوانه‌ای استفاده شده است. آزمایش‌ها در دو آرایش موازی و زیگزاگ در فواصل مختلف در دو حالت موانع مستغرق و آزاد صورت گرفت. با برداشت مشخصات جریان در دو نوع موج یک و دو، فرکانس موانع با فرکانس طبیعی جریان در آرایش‌ها و موانع مختلف مقایسه شد. در حالت آزاد نسبت به حالت مستغرق امواج با دامنه بیشتر شکل گرفته و فرکانس امواج آب به فرکانس گرداب ناشی از موانع نزدیک‌تر بوده است. در ادامه با به‌کارگیری روش‌های آماری و تجزیه و تحلیل داده‌ها، روابطی جهت تعیین عدد استروهل برای انواع موانع به دست آمد.

**واژه‌های کلیدی:** امواج عمود بر جریان، تشدید، عدد استروهل، فرکانس، گردابه

## Resonance Frequency of Transverse Waves Due to Vortex Shedding of Obstacles with Different Arrangements

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

Received: 27 June 2015

Accepted: 22 November 2016

<sup>1</sup> Former M.Sc. Student, Dept. of Hydraulic Structures, Faculty of Water Sci. Engin., Shahid Chamran Univ. of Ahwaz, Iran

<sup>2</sup> Prof., Dept. of Hydraulic Structures, Faculty of Water Sci. Engin., Shahid Chamran Univ. of Ahwaz, Iran

<sup>3</sup> Former M.Sc. Student, Dept. of Hydraulic Structures, Faculty of Water Sci. Engin., Shahid Chamran Univ. of Ahwaz, Iran

\* Corresponding Author, Email: s.mostafavi109@gmail.com

### Abstract

Water flow through obstacles such as bridge piers results vortex waves. The overlap of vortices resulted from any obstacles, contributes to transverse waves, perpendicular to stream. When the vortex frequency and stream natural frequency become equal resonance occurs and the maximum amplitude resulting from transverse waves may cause destruction of the structure. These waves can also affect suspended sediment transportation. This study was carried out to determine the vortex frequency of obstacles at various arrangements through stream during wave resonance and the effect of flow variations on vortex frequency. Therefore, some experiments were conducted with a rectangular flume at constant discharge using cylindrical and prismatic obstacles with triangular cross section and with water flow directed at the edge or face. The frequency of waves for in-line and staggered arrangements was determined for the two oscillation modes. The obstacles frequency and flow natural frequency were compared at different arrangements and various obstacles with collecting flow characteristics at two modes. Non-submerged obstacles produced larger wave amplitude than submerged obstacles, with the frequency of stream being close to the vortex frequency. Finally, some equations were developed for determining the Strouhal Number of different obstacles using statistical methods and data analysis.

**Keyword:** Frequency, Resonance, Strouhal number, Transverse waves, Vortex

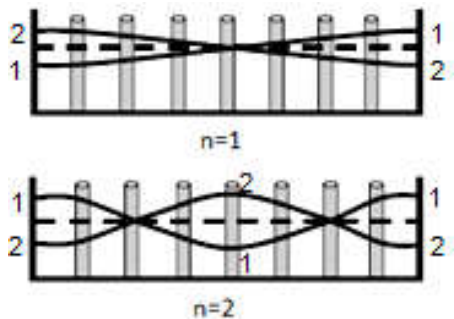
### مقدمه

موجود در مسیر جریان، مانند پایه‌های پل، پایه‌های اسکله دریا، گیاهان و درختان در بستر رودخانه، امواج عمود بر جریان که از نوع امواج عرضی<sup>۱</sup> هستند، ایجاد می‌شود. با رسیدن زره سیال به لبه جلویی جسم جامد سرعت صفر می‌شود و فشار زره افزایش یافته و از فشار اولیه سیال به فشار دینامیک در نقطه سکون

به‌ندرت می‌توان مایعی را در تماس با جو پیدا کرد که در سطح خود موج نداشته باشد. با وارد کردن نیرویی مثل باد یا انداختن سنگ در آب موج ایجاد می‌شود. موج عبارت است از آشفتگی یا تغییر شکل متناوب محیطی که موج در آن منتشر می‌شود (دین و دالریمپل ۱۹۸۴). با عبور سیالات از اطراف موانع

<sup>۱</sup> Transverse wave

در نقاطی به نام گره ثابت‌اند. در هر دو نوع موج امواج از موقعیت ۱ به ۲ و برعکس نوسان می‌کنند.



شکل ۲- موج نوع یک در بالا و موج نوع دو در پایین (جعفری و همکاران ۱۳۹۰).

رابطه بین طول موج ( $\lambda$ ) به عرض فلوم (b) و عدد موج (n) به شکل زیر بیان می‌شود (جعفری و همکاران ۱۳۹۰):

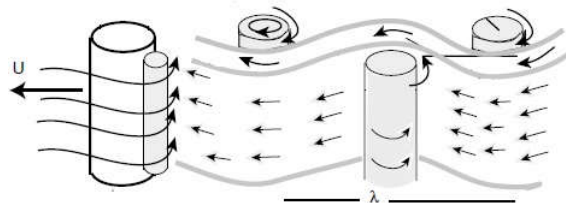
$$b = n\lambda/2 \quad [1]$$

بیشتر تحقیقات در زمینه گرداب‌های حاصل از عبور سیالات از پیرامون موانع موجود در مسیر جریان به گازه‌ها مربوط می‌شود، بیشتر این تحقیقات توسط فیتزهاگ (۱۹۷۳)، بلوین (۱۹۷۷) و زوکاوسکاس و همکاران (۱۹۸۸) صورت گرفته است.

در برابر تحقیقات صورت گرفته در زمینه گرداب ناشی از موانع در گازه‌ها، تحقیقاتی که به تشکیل موج‌های عمود بر جریان و پدیده‌های مرتبط با آن پرداخته باشند، کمتر است. شوستر (۱۹۶۷) نوسانات ناشی از پایه‌های پل را به وسیله دو سری از پایه‌ها، در زمانی که جاده از روی کانال عبور کرده را مورد بررسی قرار داد. دین و دالریمل (۱۹۸۴) با استفاده از نظریه امواج کم‌عمق، نشان دادند که طول موج، دوره تناوب موج، شتاب جاذبه زمین و عمق جریان با یکدیگر ارتباط دارند و فرکانس موج عکس دوره تناوب است و همچنین رابطه‌ای برای تخمین فرکانس موج به صورت زیر پیشنهاد کردند:

می‌رسد. فشار بالای سیال در نزدیکی مرز جسم جامد سبب تشکیل لایه مرزی<sup>۲</sup> در طرفین جسم جامد می‌شود (طاهریان و همکاران ۱۳۹۳).

با رشد لایه مرزی و پس از طی مسافتی در روی مرز جسم جامد در اثر گرداب‌ها فشار پدیده جدشدگی<sup>۳</sup> خطوط جریان رخ می‌دهد. در پایین دست خطوط جریانی که از مرز جدا می‌شوند دنباله<sup>۴</sup> (شکل ۱) و گردابه<sup>۵</sup> به وجود می‌آید (انتظاری ۱۳۸۱). زمانی که گرداب‌ها به طور متناوب در دو سمت مانع ایجاد می‌شود، نیروهای تناوبی روی مانع ایجاد شده که این نیروها متقابلاً از مانع به سیال وارد می‌گردد. در شرایط خاصی که فرکانس نیروی گردابه با فرکانس طبیعی نوسان سازه با یکدیگر برابر می‌گردد، حالت تشدید<sup>۶</sup> به وجود آمده و نوسان‌های شدید امکان خرابی سازه را به وجود می‌آورد. در این هنگام، امواج با بیشترین دامنه در عرض فلوم شکل می‌گیرد (جعفری و همکاران ۱۳۸۹).



شکل ۱- نحوه پیدایش دنباله (البرن و همکاران ۲۰۰۲).

عدد موج نسبتی است که تعداد نقاط پیک در واحد طول را بیان می‌کند، شکل ۲ موج نوع ۱ و ۲ را نشان می‌دهد. در این شکل موج نوع یک دارای یک گره می‌باشد. در موج نوع دو جریان به شکل یک موج سینوسی و ایستا نوسان می‌کند و دارای دو گره می‌باشد. هر دو نوع موج ایستا می‌باشند بدین معنا که

<sup>۲</sup> Boundary layer

<sup>۳</sup> Separation

<sup>۴</sup> Wake

<sup>۵</sup> Vortex

<sup>۶</sup> Resonance

بار معلق استفاده نمود و از خاصیت مخرب آن همچون تغییر شکل بستر جریان، جلوگیری کرد (پورمحمدی ۱۳۹۳).

در این پژوهش، هدف مقایسه فرکانس تشدید و شدت دامنه امواج در حالت مستغرق و آزاد (غیرمستغرق) است، بدین منظور از موانع استوانه‌ای و منشوری با مقطع مثلث در دو حالت برخورد جریان به رأس و ضلع موانع و در فواصل و آرایش‌های متفاوت استفاده شده است.

### مواد و روش‌ها

این پژوهش در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی دانشکده علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز صورت گرفته است.

فلوم به‌کار گرفته شده در این پژوهش، فلومی مستطیلی به‌عرض ۷۲/۵ سانتی‌متر و طول ۶ متر است (شکل ۴). کف فلوم به‌منظور مستغرق سازی موانع بالا آمده است. جهت پمپاژ و تأمین آب به‌داخل فلوم تمهیدات لازم صورت گرفت. از آنجاکه فلوم به‌کار گرفته شده توانایی عبور بیشینه دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه را داشته و دبی‌های کمتر توسط محققان پیشین (پورمحمدی ۱۳۹۳) بررسی شده، دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه تنظیم و وارد فلوم شد. جریان ورودی نخست وارد مخزن آرام‌کننده جریان در ابتدای فلوم شده و پس از برخورد با موانع موجود در مسیرش از حوضچه خروجی بیرون رفته و به استخر آب بازگشته است. دریچه موجود در انتهای فلوم جهت تغییر ارتفاع، بالا و پایین می‌رفت. جهت ایجاد امواج عرضی، در کانال از ۸ ردیف مانع چوبی به ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر با مقطع مثلثی و دایره در فواصل ۱۲۰ در ۱۲۰ و ۱۸۰ در ۱۸۰ میلی‌متر و چینش‌های موازی و زیگزاگ استفاده شده است. قطر و ضلع موانع ۲۵ میلی‌متر بوده است. موانع منشوری با مقطع مثلث در دو حالت برخورد جریان با

$$f = \left( \frac{gn}{4\pi b} \tanh \frac{n\pi h}{b} \right)^{\frac{1}{2}} \quad [2]$$

در این رابطه  $f$  فرکانس طبیعی امواج،  $n$  نوع موج،  $g$  شتاب گرانش،  $h$  عمق متوسط جریان،  $b$  عرض فلوم آزمایشگاهی می‌باشد. برای انجام محاسبات مربوط به فرکانس امواج عدد بی‌بعد استروهل به‌شکل رابطه زیر تعریف می‌شود (قمشی و همکاران ۲۰۰۷):

$$St = \frac{fs \times D}{U} \quad [3]$$

در این رابطه عدد استروهل با  $St$ ، فرکانس با  $fs$  قطر موانع با  $D$  و سرعت جریان با  $U$  نشان داده شده است.

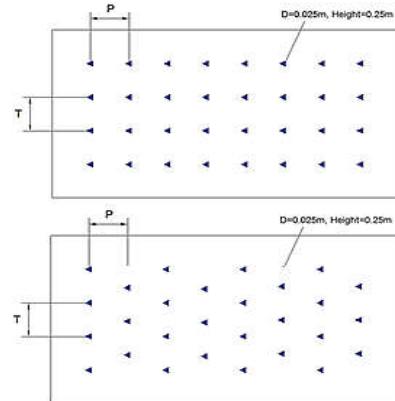
زیما و آکرمن (۲۰۰۲) تحقیقاتی را در دبی ثابت و با موانع استوانه‌ای ۱۲/۷ و ۲۵/۴ میلی‌متر، در آب انجام دادند و امواج نوع یک و در برخی آزمایش‌ها نوع دو را مشاهده کردند. آن‌ها رابطه‌ای بین نسبت بیشترین دامنه به ارتفاع آب با عدد استروهل ارائه دادند. عزیزی و قمشی (۱۳۸۹)، مطالعات خود را با موانع استوانه‌ای با قطر ۲۵ میلی‌متر و در دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه انجام دادند و امواج نوع یک، دو، سه و چهار را مشاهده نمودند و روابطی را برای تعیین عدد استروهل ( $St$ ) برای سیال آب ارائه نمودند. جعفری و همکاران (۲۰۱۰a,b) در تحقیق آزمایشگاهی با انجام ۳۸ آزمایش ده نوع موج عرضی را در فلوم آزمایشگاهی مشاهده نمودند. پورمحمدی (۱۳۹۳) با انجام تحقیق آزمایشگاهی، چهار نوع موج را در حالت آزاد برای موانع منشوری در آرایش‌های مختلف در فلوم آزمایشگاهی مشاهده نمود. وی همچنین روابطی بین عدد استروهل و نسبت دامنه به ارتفاع آب در حالت تشدید پیشنهاد نمود.

با توجه به محل‌های مستعد و عوامل ایجاد امواج عرضی و با شناخت این موج و پیش‌بینی زمان، مکان و میزان تشکیل آن، می‌توان از قدرت آن جهت استحصال انرژی الکتریکی و یا کمک به تهنشین شدن

سوم، چیدمان موانع در ستون چهارم، تعداد موانع در هر ردیف (N) در ستون پنجم و علامت اختصاری هر آرایش در ستون آخر آمده است.

پس از ورود آب به فلوم، دامنه و زمان ده نوسان آب در ارتفاع‌های مختلف (بیشینه ۲۵ سانتی‌متر) با تغییر ارتفاع دریچه اندازه‌گیری و ثبت شد. بیشترین دامنه، مربوط به حالتی که فرکانس امواج با فرکانس طبیعی مانع برابر شده باشد و حالت تشدید پدید آید مشخص شد. از این رو فرکانس و دامنه تشدید در حالت آزاد برای دو نوع موج ۱ و ۲ به دست آمد. پس از به-دست آوردن بیشترین دامنه، در هر مرحله دریچه برای هر نوع موج در حالت بیشترین دامنه قرار داده شد، سپس موانع را مستغرق کرده و بیشترین دامنه و فرکانس (معکوس میانگین زمان ده نوسان آب) در حالت مستغرق به دست آورده شد تا به‌عنوان دامنه و فرکانس تشدید در حالت مستغرق ثبت گردد.

ضلع و رأس قرار گرفتند. شکل ۳ چینش موانع در دو حالت موازی و زیگزاگ را نشان می‌دهد.



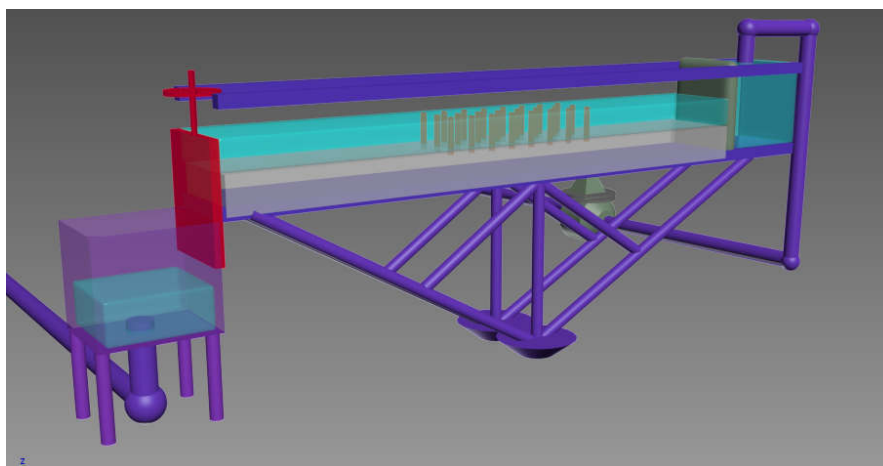
شکل ۳- چینش موانع، حالت موازی در بالا، حالت زیگزاگ در پایین.

آرایش‌های مختلف موانع در جدول ۱ آمده است.

در این جدول از چپ به راست، شکل موانع و حالت برخورد جریان به موانع در ستون اول و دوم، فاصله موانع از هم (T×P) برحسب میلی‌متر در ستون

جدول ۱- آرایش موانع.

شکل مانع	حالت برخورد جریان به موانع	T×P (mm×mm)	چینش	N	علامت اختصاری
منشوری با مقطع مثلثی	برخورد به رأس مانع منشوری	۱۲۰×۱۲۰	موازی	۶	e120i
		۱۸۰×۱۸۰	زیگزاگ	۵/۵	e120s
			موازی	۴	e180i
	برخورد به ضلع مانع منشوری	۱۲۰×۱۲۰	زیگزاگ	۳/۵	e180s
			موازی	۶	f120i
		۱۸۰×۱۸۰	زیگزاگ	۵/۵	f120s
موازی	۴		f180i		
استوانه	-	۱۲۰×۱۲۰	زیگزاگ	۵/۵	120s
			موازی	۶	120i
		۱۸۰×۱۸۰	زیگزاگ	۳/۵	180s
	موازی		۴	180i	
	زیگزاگ		۳/۵	180s	



شکل ۴- فلوم آزمایشگاهی.



شکل ۵- جریان مستغرق در راست و آزاد در چپ.

از آنجایی که پارامترهای بی‌بعد دیگر به دست آمده مشابه پارامترهای بالا بوده در رابطه ۵ آورده نشده است. همچنین دبی جریان ثابت ۲۰ لیتر بر ثانیه است از رابطه حذف می‌گردد، با بررسی نتایج در هنگام تشدید عدد فرود  $(U/\sqrt{gh})$  در حالت مستغرق و آزاد تفاوت چندانی نداشته و در محاسبات بی‌تأثیر بوده است، از این رو از رابطه حذف گردیده است. با توجه به رابطه ۱، نسبت طول موج به عرض فلوم  $(\lambda/b)$  در نوع موج تأثیر دارد و نیازی به استفاده مجدد از آن نیست. حالت تشدید فرکانس موج با فرکانس مانع برابر است در نتیجه نسبت  $f_s/f$  برابر با یک می‌شود و در رابطه بی‌تأثیر است. در این پژوهش  $P$  و  $T$  با هم برابرند، از این رو به‌کارگیری یکی از آنها کافی است. بر اساس این مطالب رابطه به شکل زیر خلاصه می‌شود:

$$St = \theta(T/D, A/H, n, N) \quad [۶]$$

شکل ۵، جریان مستغرق و آزاد در فلوم را نشان

می‌دهد.

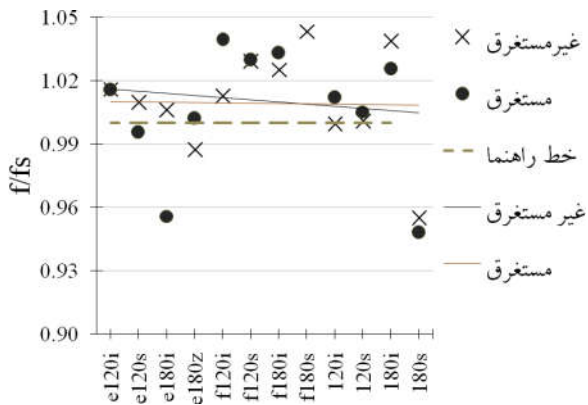
برای نشان دادن فرکانس موانع می‌توان از عدد بی‌بعد استروهل استفاده کرد. برای تعیین روابطی جهت محاسبه عدد استروهل، تابعی بین عدد استروهل و مشخصات جریان تعریف می‌شود:

$$\Theta(St, N, D, A, H, T, P, n, f, f_s, \lambda, b, U, g, Q) = 0 \quad [۴]$$

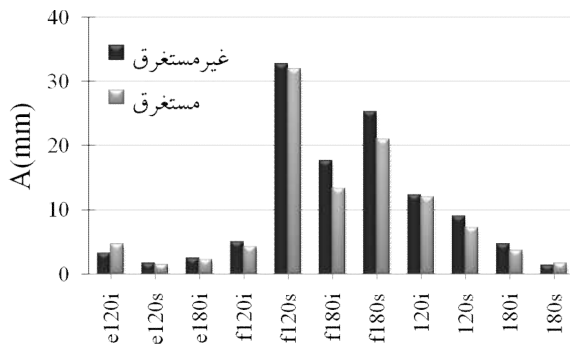
$H$  عمق،  $Q$  دبی جریان،  $g$  شتاب ثقل،  $U$  سرعت جریان،  $\lambda$  طول موج،  $f$  فرکانس موج،  $f_s$  فرکانس گرداب ناشی از موانع،  $D$  قطر موانع،  $A$  دامنه موج عمود بر جریان،  $St$  عدد استروهل،  $n$  نوع موج،  $P$  فاصله بین ردیف‌های موانع،  $T$  فاصله بین موانع در یک ردیف،  $N$  تعداد موانع در یک ردیف و  $b$  عرض فلوم می‌باشد. رابطه بی‌بعد به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$St = \theta(T/D, A/H, f_s/f, P/D, n, N, \lambda/b, U/\sqrt{gh}) \quad [۵]$$

شکل ۸ و ۹ به ترتیب نشان‌گر دامنه تشدید در موج نوع یک و دو است.



شکل ۷- نسبت فرکانس طبیعی امواج به فرکانس موانع بر اساس آرایش موانع در جریان نوع دو ( $n=2$ ).

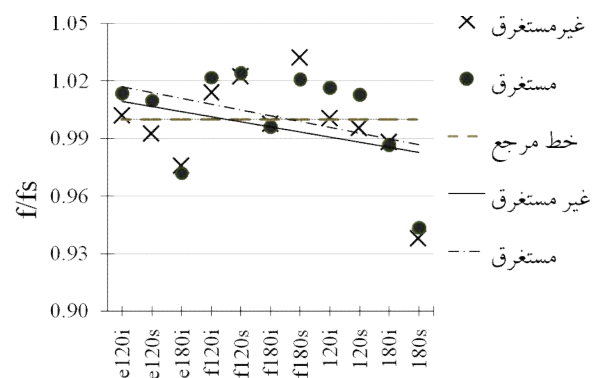


شکل ۸- دامنه موج برای انواع موانع در جریان نوع یک ( $n=1$ ).

بیشترین دامنه جریان در موج نوع دو در چینش‌ها با موانع استوانه‌ای به ترتیب در حالت آزاد (غیرمستغرق) و مستغرق  $8/2$  و  $4/3$  میلی‌متر بیشتر از حالت برخورد جریان به ضلع موانع با مقطع مثلث و  $13/6$  و  $8/3$  میلی‌متر بیشتر از موانع با مقطع مثلث در حالت برخورد جریان به رأس می‌باشد (شکل ۹).

## نتایج و بحث

در هنگام تشکیل امواج با بیشترین دامنه، تشدید صورت گرفته است و از دید فیزیکی فرکانس ناشی از گرداب موانع  $f_s$  با فرکانس امواج آب  $f$  برابر است. جهت تعیین فرکانس امواج عمود بر جریان از داده‌های آزمایشگاهی استفاده شد. فرکانس طبیعی امواج آب به کمک رابطه ۲ به دست آمد.



شکل ۶- نسبت فرکانس طبیعی امواج به فرکانس موانع بر اساس آرایش موانع در جریان نوع یک ( $n=1$ ).

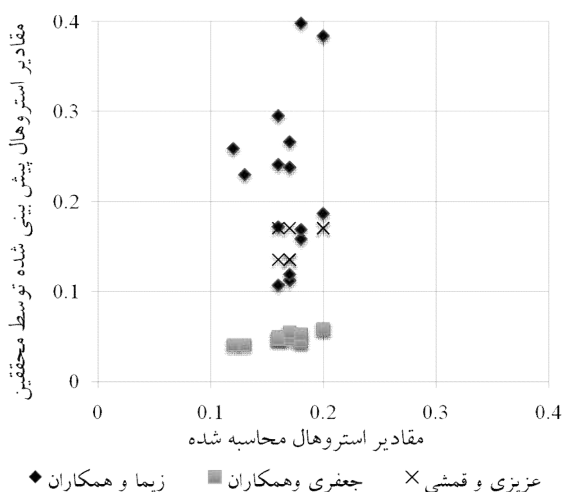
شکل ۶ نسبت فرکانس امواج بر فرکانس گرداب ناشی از موانع بر اساس آرایش موانع (جدول ۱) را در حالت تشدید برای موج نوع یک به صورت نقطه‌ای نشان می‌دهد. این نسبت به طور میانگین  $1/67\%$  در حالت آزاد و  $2/01\%$  در حالت مستغرق با خط مرجع (حالت ایده‌آل) اختلاف دارد. در شکل ۷ این اختلاف  $2/01\%$  در حالت آزاد و  $2/6\%$  در حالت مستغرق برای موج نوع دو می‌باشد.

در این پژوهش میانگین دامنه تشدید در موج نوع یک به ترتیب برای حالت آزاد (غیرمستغرق) و مستغرق در برخورد جریان به ضلع موانع با مقطع مثلث  $13/3$  و  $11/5$  میلی‌متر بیشتر از حالت برخورد جریان به موانع استوانه‌ای و  $17/7$  و  $14/8$  میلی‌متر بیشتر از حالت برخورد جریان به رأس موانع با مقطع مثلثی است.

برخورد جریان به رأس موانع منشوری ۰/۷۹ و ۱/۳۶، برای حالت برخورد جریان به ضلع موانع منشوری ۰/۷۹ و ۱/۲۲ و برای موانع استوانه‌ای ۰/۸۸ و ۱/۳۵ است. فرکانس موانع در موج نوع یک در حالت غیرمستغرق ۰/۷٪ بیشتر از حالت مستغرق است. این فرکانس در هر دو حالت موج نوع دو باهم برابر است.

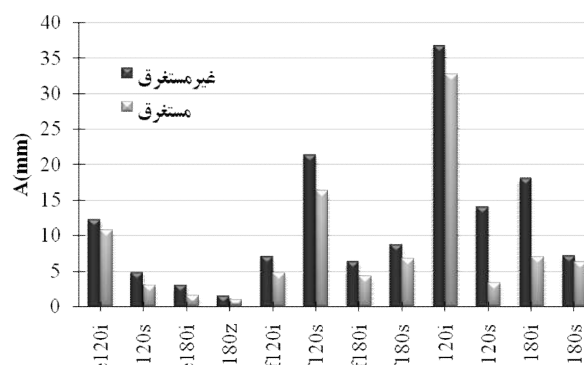
با به‌کارگیری این نتایج، روابط سایر محققان مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۱۲ نتایج به‌دست‌آمده با نتایج حاصل از روابط زیما و آکرمن (۲۰۰۲)، عزیزی و قمشی (۱۳۸۹)، جعفری و همکاران (۱۳۹۰) برای موانع استوانه‌ای و پورمحمدی (۱۳۹۳) برای موانع منشوری مقایسه شده است.

همان‌طور که شکل ۱۲ نشان می‌دهد، نزدیک‌ترین تخمین به مقادیر استروهاال به‌دست‌آمده از داده‌های آزمایشگاهی مربوط به موانع استوانه‌ای، مربوط به روابط زیما و آکرمن (۲۰۰۲) است.

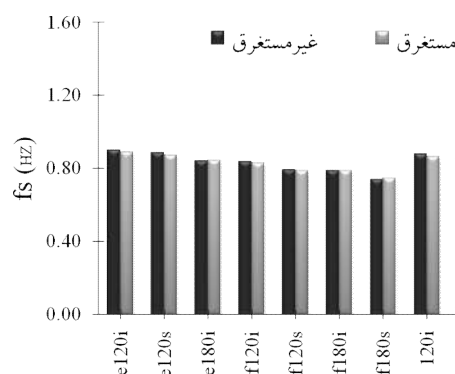


شکل ۱۲- مقایسه عدد استروهاال محاسبه شده با عدد استروهاال به‌دست‌آمده از روابط دیگر محققین.

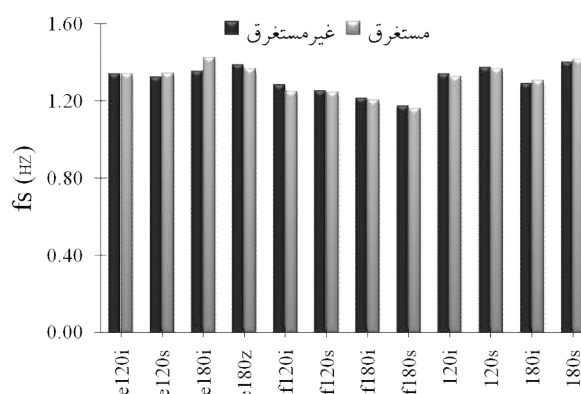
شکل ۱۳ نشان می‌دهد رابطه پورمحمدی (۱۳۹۳) که برای موانع منشوری به‌کار رفت نزدیک‌ترین تخمین را نسبت به حالات قبل دارد.



شکل ۹- دامنه موج برای انواع موانع در جریان نوع دو (n=2).



شکل ۱۰- فرکانس گرداب ناشی از موانع برحسب هرتز در نوع یک جریان.



شکل ۱۱- فرکانس گرداب ناشی از موانع برحسب هرتز در نوع دو جریان.

شکل‌های ۱۰ و ۱۱ فرکانس گرداب ناشی از موانع در حالت آزاد و مستغرق را نشان می‌دهد. با توجه به نمودارها، میانگین فرکانس گرداب ناشی از موانع در موج نوع یک و دو به‌ترتیب برای حالت



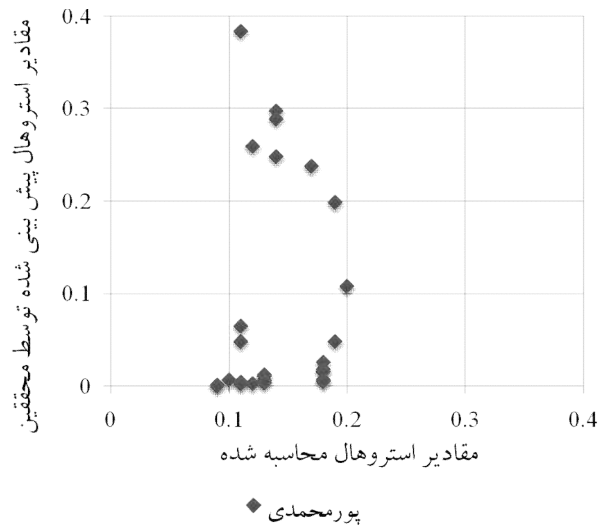
و موانع استوانه‌ای ۹ با به‌کارگیری نرم‌افزار Excel و SPSS به‌دست‌آمده است.

$$St = 0.111 \left( \frac{T}{D} \right)^{-0.554} \left( \frac{A}{H} \right)^{-0.11} n^{0.115} N^{0.569} \quad [۷]$$

$$St = 0.172 \left( \frac{T}{D} \right)^{-0.023} \left( \frac{A}{H} \right)^{0.002} n^{0.01} N^{0.054} \quad [۸]$$

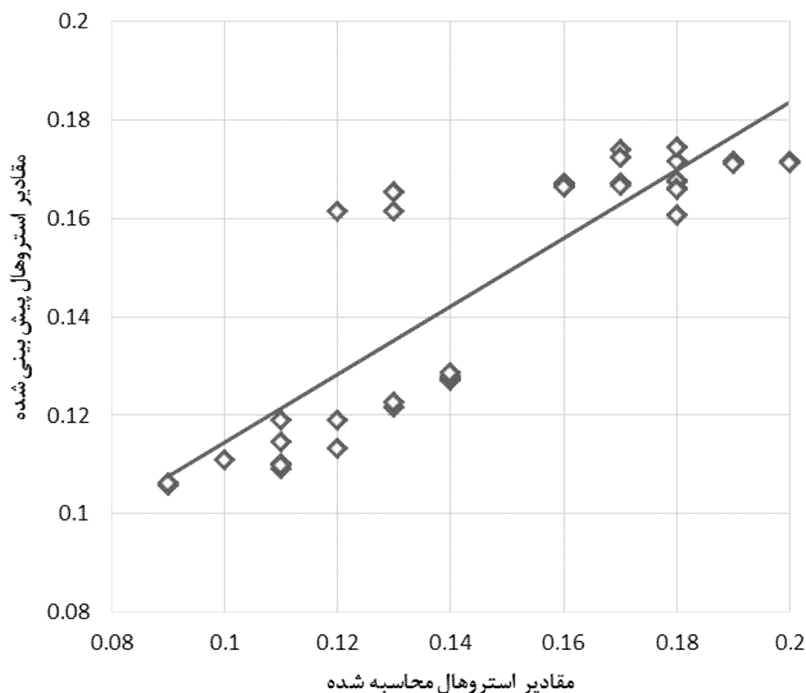
$$St = 0.175 \left( \frac{T}{D} \right)^{-0.055} \left( \frac{A}{H} \right)^{0.002} n^{0.043} N^{0.024} \quad [۹]$$

روابط به‌دست‌آمده نشان‌گر اهمیت هر یک از پارامترها در رابطه عدد استروهاال که خود با فرکانس جریان متناسب است، می‌باشد. به‌منظور بررسی میزان دقت معادلات بالا، عدد استروهاال حاصل از روابط بالا با عدد استروهاال محاسبه از داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده و در شکل ۱۴ آمده است. استروهاال به‌دست‌آمده از نتایج آزمایشگاهی به‌طور میانگین ۹۱/۶۴٪ با استروهاال محاسبه شده از روابط ۷ تا ۹ تطابق دارد.



شکل ۱۳- مقایسه عدد استروهاال محاسبه شده با عدد استروهاال به‌دست‌آمده از پورمحمدی.

به‌منظور پیش‌بینی عدد استروهاال نسبی در حالت تشدید با استفاده از اطلاعات موجود و نرم‌افزارهای آماری، توان‌ها و ضرایب رابطه ۶ استخراج شده است. روابط ۷ تا ۹ برای موانع با مقطع مثلثی در دو حالت برخورد جریان به ضلع ۷ و رأس ۸



شکل ۱۴- نمودار برازش عدد استروهاال محاسبه شده در آزمایشگاه با عدد استروهاال پیش‌بینی شده از روابط به‌دست‌آمده.

## نتیجه‌گیری کلی

در نتیجه هم فرکانس شدن و هماهنگ شدن امواج آب و گرداب ناشی از موانع در فرکانس‌های خاص، امواج با بیشترین دامنه در فلوم شکل گرفته و پدیده تشدید رخ داده است.

در این پژوهش با مقایسه حالت مستغرق و آزاد (غیرمستغرق) در آرایش‌های مختلف در دو نوع از جریان مشخص شد که در حالت آزاد نسبت به حالت مستغرق امواج با دامنه بیشتر شکل گرفته و نسبت فرکانس امواج آب به فرکانس گرداب ناشی از موانع  $(f/f_s)$  به یک نزدیک‌تر بوده است. این نسبت در همه حالات بین  $0.6 \pm 1$  قرار داشته است. با توجه به نتایج، بیشترین دامنه در نوع یک جریان در موانع منشوری با

مقطع مثلث و در حالت برخورد جریان به ضلع موانع در نوع دو جریان در آرایش‌های مربوط به موانع استوانه‌ای رخ داده است. در هر دو نوع جریان، وجود موانع با مقطع مثلثی در حالت برخورد به رأس کمترین دامنه را ایجاد کرده است و پدیده تشدید در این حالات نیروی کمتری به دیواره‌ی فلوم وارد کرده است.

از نتایج مشخص است که در همه موانع در هر دو حالت آزاد و مستغرق در بیشتر حالات با افزایش دامنه، فرکانس موانع کمتر بوده است. در پایان عدد استروهل به‌عنوان نماینده فرکانس و سرعت جریان انتخاب گشته است و به‌کمک روش‌ها و نرم‌افزارهای آماری معادله‌هایی جهت به‌دست آوردن آن برای شکل‌های مختلف موانع پیشنهاد شد.

## منابع مورد استفاده

- انتظاری ع، ۱۳۸۱، مکانیک سیالات (ترجمه)، نشر نو پردازان، تهران.
- پورمحمدی م، ۱۳۹۳. بررسی آزمایشگاهی امواج عمود بر جریان ناشی از کشش ورتکس پشت موانع منشوری شکل در کانال‌های روباز. رساله دکتری تخصصی سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- جعفری ا، قمشی م و بینا م، ۱۳۸۹. بررسی فرکانس ورتکس ناشی از برخورد جریان با موانع در مجاری روباز. صفحه‌های ۱ تا ۱۰، اولین همایش ملی توسعه و منابع آب، ۲۵ آبان ماه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز، اهواز.
- جعفری ا، قمشی م، بینا م و کاشفی پور م، ۱۳۹۰. معادله‌ای جدید جهت به دست آوردن عدد استروهل موج ناشی از عبور آب از موانع استوانه‌ای. علوم و مهندسی آبیاری (مجله علمی کشاورزی)، جلد ۳۴، شماره ۱، صفحه‌های ۴۵ تا ۵۴.
- طاهریان ف، قمشی م، جاسمی زرگانی س و پوستی زاده ن، ۱۳۹۳. بررسی تأثیر امواج عرضی نوع ۱ و ۲ بر غلظت رسوبات معلق پایین‌دست موانع در مجاری روباز. نشریه دانش آب و خاک، جلد ۲۴، شماره ۳، صفحه‌های ۱۳۳ تا ۱۴۳.
- عزیزی ر و قمشی م، ۱۳۸۹. رابطه فرکانس امواج عمود بر جریان در مجاری روباز با مشخصات جریان و موانع. تحقیقات منابع آب ایران، سال ۶، شماره ۲، صفحه‌های ۵۷ تا ۶۵.
- Ahlborn B, Mae LS and Bernd RN, 2002. On drag Strouhal number and Vortex-street structure. Fluid Dynamic Research 30: 379-399.
- Blevins R D, 1977. Flow-induced Vibration. VNR Pub, New York.
- Dean G D and Dalrymple R A, 1984. Water wave mechanics for engineers and scientists. World Scientific Pub. London.
- Fitz-hugh J S, 1973. Flow induced vibration in heat exchangers Rep. No.RS57. AERE-P7238. Oxford Univ. Press. New York.
- Ghomeshi M, Mortazavi S and Falcorer R, 2007. Amplitude of wave formation by vortex shedding in open channels. Journal of Applied Science 7: 3927-3924.
- Jafari A, Ghomeshi M, Bina M and Kashefipour M, 2010(a). Experimental study on ten modes of transverse waves due to vertical cylinder in open channels. Journal of Food, Agriculture and Environment 8: 949-955.

- Jafari A, Ghomeshi M and Bina M and Kashefipour M, 2010(b). Physical modeling study of free and submerged flow on the obstructions in rivers with ten mods of transverse waves. Pp 1-10. 8th International River Engineering Conference, 26-28 Jan, Shahid Chamran University, Ahvaz.
- Schuster JC, 1967. Canal capacity studies wave formation by bridge piers. Denver Pub. California, U.S.
- Zima L and Ackermann N, 2002. Wave generation in open channels by vortex shedding from channel obstructions. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE 6: 596-603.
- Zukauskas A, Ulinskas R and Katinas V, 1988. Flow Dynamics and flow-Induced Vibrations of Tube Banks, Hemisphere Pub, New York.