

## تأثیر موانع منشوری شکل بر روی خصوصیات امواج عرضی در جریان کانال‌های باز

محمدحسین پورمحمدی\*<sup>۱</sup>، مهدی قمشی<sup>۲</sup>، سید حبیب موسوی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۹/۱۳ تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۴/۰۴

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری 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

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

### چکیده

با عبور آب از بین موانع (وجود درختان در رودخانه، پایه‌های پل و هر سازه هیدرولیکی دیگر) در پائین دست آن‌ها جریان‌های حلقوی ایجاد شده و از تداخل این جریان‌های حلقوی تشکیل شده، امواج سطحی که راستای انتشارشان عمود بر جهت جریان آب است، تشکیل می‌شود. در این تحقیق تأثیر شکل موانع بر روی تشکیل امواج عرضی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور از موانع استوانه‌ای و مثلثی استفاده شد. برای مانع مثلثی دو حالت برخورد جریان به رأس و ضلع مثلث در نظر گرفته شد. دبی‌های ۵، ۱۵ و ۲۵ لیتر بر ثانیه و کارگذاری موانع به صورت موازی با آرایش 60 × 60، 60 × 120، 120 × 120 و 180 × 180 (میلی‌متر در میلی‌متر)، در نظر گرفته شد. در مجموع ۳۶ آزمایش صورت پذیرفت. نتایج حاصل نشان داد که شکل موانع تأثیر زیادی بر روی تشکیل امواج عرضی دارد. بیشترین میزان دامنه نسبی ( $A/H$ ) ( $A$ : بیشینه دامنه امواج و  $H$ : عمق متوسط جریان) برای موانع استوانه‌ای برای آرایش 60 × 120 (mm × mm) در دبی ۵ لیتر بر ثانیه و به میزان ۶۱/۱۰ درصد و کمترین میزان  $A/H$  برای موانع مثلثی در شرایط برخورد جریان به رأس مثلث برای آرایش 60 × 120 (mm × mm) در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه و به میزان ۳/۴۶ درصد حاصل شد. همچنین روابطی به منظور تخمین عدد استراهل به صورت تابعی از  $P/D$ ،  $T/D$  و  $N$  (فاصله بین ردیف‌ها و  $D$ : قطر موانع و  $N$ : تعداد موانع در یک ردیف) در شکل‌های مورد نظر با استفاده از نرم‌افزار SPSS ارائه گردید.

واژه‌های کلیدی: امواج عرضی، تراکم موانع، تواتر امواج، عدد استراهل

## Impact of Prismatic-Shaped Obstacle on the Characteristics of Transverse Waves

MH Purmohammadi<sup>1\*</sup>, M Ghomeshi<sup>2</sup>, SH Musavi<sup>2</sup>

Received: 4 December 2013 Accepted: 25 June 2014

<sup>1</sup>- Ph.D. 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

\*Corresponding Author, Email: Purmohammadi@gmail.com

### Abstract

By passing water flow through obstacles (trees in rivers, piers of bridge and any hydraulic structure), vortex flows emerge at the downstream of them and by overlapping of these emerged vortexes, shallow waves with propagation direction perpendicular to the water flow direction are formed. In this study the impact of obstacles on the formation of transverse waves has been studied. For this purpose, cylindrical and triangular obstacles were used. For the triangular obstacle, two states of collision in corner and side of it were considered. Discharges of 5, 15 and 25 L s<sup>-1</sup> and placement of barriers in parallel position with the arrangement of 60×60, 60×120, 120×120, 180×180 (mm×mm), were considered. Totally, 36 series of experiments were carried out. The results showed that the barrier had much impact on the formation of transverse waves. The maximum amount of relative amplitude ( $A/H$ ) ( $A$ : The maximum wave amplitude,  $H$ : depth of flow) for the cylindrical obstacles with 60×120 (mm×mm) arrangement in the flow rate of 5 L s<sup>-1</sup> and the minimum amount of it for the triangular obstacles with flow hitting its corner and the flow rate of 15 L s<sup>-1</sup> at the arrangement of 60×120 (mm×mm) were achieved with the values of 61.1% and 3.46% , respectively. Also, in order to estimate the Strouhal number as a function of  $P/D$ ,  $T/D$  and  $N$  ( $P$ : distance between obstacles,  $D$ : diameter of obstacles and  $N$ : number of obstacles in each row) for desired shape, some relationships were developed using SPSS software.

**Keywords:** Density of obstacles, Frequency of waves, Strouhal number, Transverse waves

ایجاد می‌شوند که عدد رینولدز موانع در دو بازه  $40 < R_e < 3 \times 10^5$  و  $R_e > 3.5 \times 10^6$  قرار گرفته باشد. عدد رینولدز مطابق رابطه ۱ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R_e = \frac{UD}{\nu} \quad [۱]$$

که در این رابطه  $U$  سرعت متوسط جریان،  $D$  قطر موانع و  $\nu$  لزجت سینماتیک سیال است.

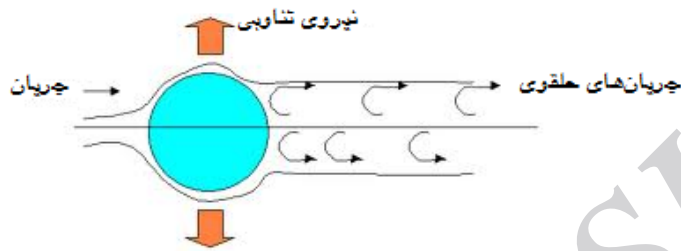
### مقدمه

با قرار گرفتن جسم در مسیر حرکت سیال، پدیده جدایی خطوط جریان رخ داده و در پایین دست موانع جریان‌های حلقوی تشکیل می‌شود. زمانی که جریان‌های حلقوی به طور متناوب در دو سمت موانع ایجاد می‌شوند، نیروهای تناوبی روی جسم ایجاد شده، که این نیروها متقابلاً از موانع به سیال وارد می‌گردد. بلوینس (۱۹۷۷) نشان داد که جریان‌های حلقوی زمانی

است که در نتیجه هم‌پوشانی جریان‌های حلقوی ناشی از موانع، امواج عمود بر جریان در سطح جریان و در امتداد عرض آبراهه تشکیل می‌شوند. امواج عمود بر جریان، امواج نوسانی (تناوبی) ایستا و عرضی هستند و با توجه به دامنه کم آن‌ها، خطی فرض می‌شوند.

اگر فرکانس نیروی تناوبی ناشی از جریان‌های حلقوی موانع با فرکانس طبیعی نوسان امواج آب برابر گردد، حالت تشدید به وجود آمده و امواج با بیشینه دامنه پدید می‌آیند.

در شکل ۱ نمای شماتیک تشکیل جریان‌های حلقوی در یک سمت مانع استوانه‌ای نشان داده شده



شکل ۱- جریان حلقوی با نیروی تناوبی در پایین دست یک مانع استوانه‌ای.

جریان‌های گازی مطابق شکل ۲ تعیین نمودند. متغیرهای  $P/D$  و  $T/D$  به ترتیب نسبت فاصله بین موانع متوالی در هر ردیف به قطر موانع و نسبت فاصله بین ردیف‌های موانع به قطر موانع را بیان می‌کنند. هر دو پارامتر مذکور، بدون بعد می‌باشند. محل تلاقی دو پارامتر بی‌بعد در هر یک از نواحی، مقدار تقریبی عدد استراغال را مشخص می‌نماید.

قمشی و همکاران (۲۰۰۷) در مطالعه‌ای بر روی تشکیل امواج عرضی روابطی به منظور تخمین عدد استراغال و دامنه نسبی امواج ارائه نمودند. ساها و همکاران (۲۰۰۹) جریان عبوری از یک مانع چهارگوش را در عدد رینولدز پایین به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. این تحقیق در عدد رینولدز ۱۰۰ تا ۳۲۵ انجام شد. این محققین مشاهده کردند که جریان در عدد رینولدز برابر با ۱۶۰ دوبعدی و در عدد رینولدز ۱۶۳/۵ سه‌بعدی می‌باشد و در عدد رینولدز برابر با ۱۷۵ بسیار متمایز می‌باشد و همچنین با افزایش عدد رینولدز طول موج تشکیل شده کاهش می‌یابد. جعفری و همکاران (۲۰۱۰) در تحقیقی آزمایشگاهی با استفاده از موانع با قطرهای مختلف (۵، ۱۲ و ۲۵ میلی‌متر)، ده نوع موج را در فلوم آزمایشگاهی مشاهده نمودند.

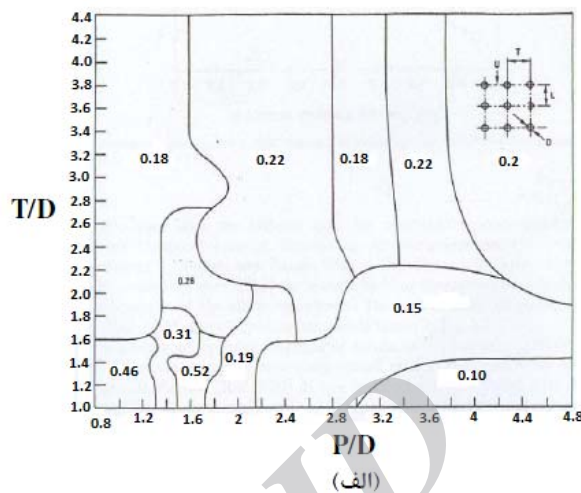
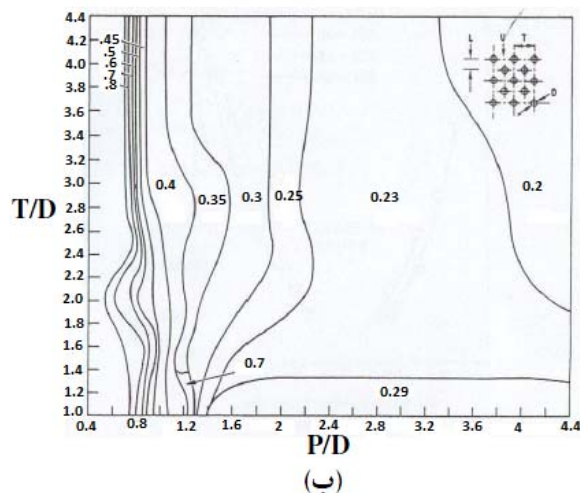
بیشتر یافته‌ها و تحقیقات در مورد گرداب‌های حاصل از عبور سیالات از پیرامون موانع موجود در مسیر جریان به گازها مربوط می‌شود. عمده تحقیقات در این زمینه توسط فیتزهاگ (۱۹۷۳)، بلوینز و برسلر (۱۹۹۳) و زوکاوسکاس و همکاران (۱۹۸۸) صورت گرفته است. در مقابل تحقیقاتی که به تشکیل گرداب و پدیده‌های مرتبط با آن در محیط آب پرداخته باشند بسیار کم است. اولین یافته‌ها به تحقیق کراس (۱۹۳۹) مربوط می‌شود. اسکوستر (۱۹۶۷) نوسانات ناشی از پایه‌های پل را بررسی کرده است. فالوی (۱۹۸۰) تولید موج توسط پایه‌های پل را در یک کانال نوزنقه‌ای بررسی کرده است. زیما و اکرم (۲۰۰۲) فرمولی برای شبیه‌سازی دامنه نسبی امواج ( $A/H$ ) ارائه کرده‌اند.

دالریمل و دین (۱۹۸۴) با استفاده از نظریه امواج کم دامنه نشان دادند که فرکانس امواج ( $f$ ) با طول موج ( $L$ )، دوره تناوب موج ( $T$ )، شتاب جاذبه زمین ( $g$ ) و عمق جریان ( $H$ ) ارتباط دارد:

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

که در این رابطه  $n$  شماره موج تولید شده و  $b$  عرض فلوم هست.

فیتزهاگ (۱۹۷۳) عدد استراغال را برای آرایش‌های موازی و زیگزگی برحسب  $T/D$  و  $P/D$  برای



شکل ۲- تعیین عدد استراهاال در جریان گازها: (الف) آرایش ردیفی موانع و (ب) آرایش زیگزاگ موانع (فیتز و هاگ ۱۹۷۳).

که در این رابطه  $S$ ، عدد استروهاال،  $N$  تعداد استوانه-ها در یک ردیف،  $K$  ثابت معادله است که مقدار آن برای آرایش ردیفی موانع ۲ و  $C$  ثابت معادله برای آرایش ردیفی موانع ۰/۴۳ هست.

کیوا و همکاران (۲۰۱۱) مطالعه‌ای آزمایشگاهی درباره تأثیر اندازه زبری یکنواخت ( $K$ ) بر روی ارتعاش ناشی از جریان‌های حلقوی ناشی از موانع استوانه‌ای که توسط کاغذ سنباده که با متوسط اندازه

ذرات و زبری مشخصی ( $0.28 \times 10^{-3} < \frac{K}{D} < 1.38 \times 10^{-2}$ ) پوشیده شده است، انجام دادند (که در آن  $D$ : قطر مانع استوانه‌ای هست). در این آزمایش‌ها، جریان زیربحرانی

و  $1.7 \times 10^4 < Re < 8.3 \times 10^4$  و  $4 < \frac{U}{f \times D} < 8$  هست که در آن  $f$ : فرکانس امواج است. این محققان نشان دادند که زبری استوانه باعث افزایش دامنه امواج عرضی و کاهش بیشینه ضریب درگ شده است و عدد استراهاال

با زبری افزایش یافته است و در نهایت نشان دادند که زبری یکنواخت به‌طور مطلوب باعث کاهش ارتعاش ناشی از جریان‌های حلقوی در محدوده عدد رینولدز

آزمایش‌ها شده است. لی و همکاران (۲۰۱۱) جریان عبوری از ۴ استوانه را در عدد رینولدز ۲۰۰ در جریان آرام به‌صورت عددی سه‌بعدی موردبررسی قرار دادند

و برای  $1.2 < \frac{T}{D} < 5$  الگوی جریان در برخورد با این

این محققین در مطالعه دیگری دامنه ده نوع موج عرضی را موردبررسی قرار داده و رابطه ۳ را برای محاسبه بیشینه دامنه نسبی امواج عرضی ناشی از جریان‌های حلقوی در جریان آزاد بر روی موانع ارائه نمودند.

$$S = 7.52 \frac{\left(\frac{D}{T}\right)^{0.498} \left(\frac{D}{P}\right)^{0.177}}{Re^{0.482} N^{0.87}} \quad [3]$$

عزیزی و قمشی (۲۰۱۰) در یک فلوم آزمایشگاهی، آزمایش‌هایی را جهت محاسبه عدد استروهاال در جریان آب با مجموعه موانع استوانه‌ای انجام دادند. در این آزمایش‌ها قطر موانع و دبی جریان ثابت بوده و چهار نوع موج عرضی در فلوم تشکیل شده است. آن‌ها روابطی را برای محاسبه عدد استروهاال به-صورت روابط ۴ و ۵ ارائه کردند:

$$S = \frac{K}{\left(\frac{T}{D}\right) \left(\frac{P}{D} N\right)^{\frac{1}{3}}} \quad P/D < 5 \quad [4]$$

$$S = C_3 \sqrt[3]{\frac{P}{D} \left(\frac{T}{D}\right)^2 N} \quad P/D > 5 \quad [5]$$

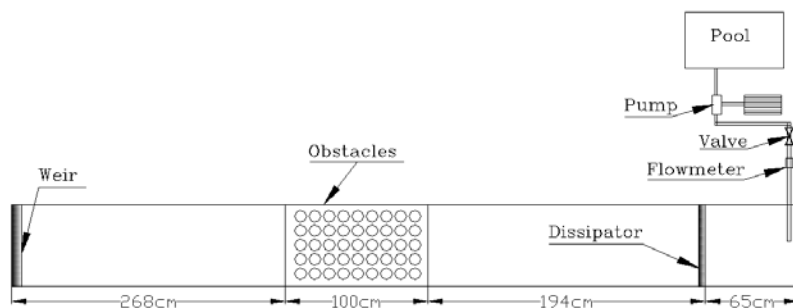
آزمایش‌ها، از یک استخر به‌وسیله پمپ تأمین می‌شد. به‌منظور اندازه‌گیری دبی‌های متغیر در آزمایش‌های انجام‌شده از یک فلومتر دیجیتالی استفاده گردید. برای نصب و باز و بستن موانع منشوری ابتدا سطح صفحات پلکسی گلاس با فواصل ۳ سانتی‌متر به‌صورت ضربدری (زیگزاگی) شبکه‌بندی شد، به‌گونه‌ای که فاصله نقاط متوالی از یکدیگر در هر ردیف ۳ سانتی‌متر و همچنین فاصله ردیف‌ها نیز از یکدیگر ۳ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. بعد از شبکه‌بندی و علامت‌گذاری تمام سطح صفحات پلکسی گلاس، با استفاده از دستگاه دریل پایه-دار تمام نقاط علامت‌گذاری شده با مته ۳ میلی‌متر به‌طور قائم سوراخ شدند. برای این‌که بتوان موانع منشوری چوبی پیچ‌دار را روی صفحات پلکسی گلاس شبکه‌بندی شده باز و بسته کرد، در مرحله بعد برای اتصال و پیچ کردن موانع منشوری بر روی سطح صفحه پلاکسی گلاس، نقاط سوراخ‌شده صفحات پلکسی گلاس با استفاده از قرار دادن مهره‌های ۴ میلی‌متری درون سوراخ‌ها برای پیچ کردن موانع روی صفحات آماده‌سازی شد. در کل بیش از ۷۹۰ محل روی صفحات پلکسی گلاس برای نصب موانع منشوری آماده‌سازی شد. جهت تنظیم ارتفاع آب، در پایین‌دست فلوم دریچه کشویی قرار داده شد. با استفاده از این دریچه کشویی، عمق و سرعت جریان تغییر داده‌شده و در هر آزمایش ارتفاع سرریز کشویی، از یک مقدار بیشینه (متناسب با عمق جریانی که امواج عمود بر جریان شکل می‌گردد) تا ارتفاع صفر تغییر می‌کرد و با تغییر عمق و سرعت جریان، امواج مختلف در عرض فلوم شکل می‌گرفت. در شکل ۳ شماتیکی از فلوم و تجهیزات مورد استفاده نشان داده‌شده است.

موانع را مورد بررسی و به سه دسته طبقه‌بندی کرده‌اند. کارمو و همکاران (۲۰۱۱) ارتعاش ناشی از جریان اطراف دو استوانه را در عدد رینولدز پایین به‌صورت عددی دوبعدی و سه‌بعدی مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیقات دو استوانه پشت سر هم بافاصله مرکز تا مرکز ۱/۵ تا ۸ میلی‌متر در آب قرار گرفتند و تحقیقات دوبعدی در عدد رینولدز ۱۵۰ و سه‌بعدی در ۳۰۰ انجام‌شده است و نتایج با یک استوانه انعطاف‌پذیر با مشخصات یکسان، با دو استوانه مذکور، مقایسه شده است.

پدیده امواج عرضی می‌تواند خسارات جبران‌ناپذیری را به بار آورد. به‌عنوان مثال در مورد پایه‌های پل چنانچه شرایط جریان رودخانه به‌گونه‌ای باشد که پدیده تداخل گردابه‌ها در محل پایه‌های پل اتفاق بیفتد، امواج عرضی ایجادشده ممکن است منجر به زیرآب رفتن ساحل رودخانه شود. لذا مطالعه در این خصوص از اهمیت بالایی برخوردار هست. هدف از تحقیق حاضر بررسی تأثیر شکل موانع بر روی چگونگی تشکیل و مشخصات امواج عرضی عمود بر جهت جریان در کانال‌های روباز با استفاده از مدل فیزیکی و ارائه روابطی به‌منظور تعیین فرکانس امواج حاصل از پدیده ارتعاش ناشی از جریان‌های حلقوی، در موانع با مقاطع منشوری در مجاری روباز هست.

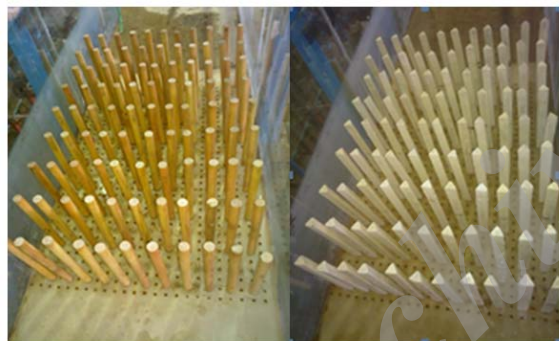
#### مواد و روش‌ها

فلوم مورد استفاده برای انجام آزمایش‌ها یک فلوم با مقطع مستطیلی به عرض کف ۷۲ سانتی‌متر، طول ۵۳۷ سانتی‌متر، ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر، طول مخزن آرام‌کننده جریان ۶۵ سانتی‌متر و جنس دیواره از شیشه و کف آن از ورق پلکسی گلاس بوده است. کارگذاری موانع در فاصله ۱۹۴ سانتی‌متری از آرام‌کننده و به‌طول ۱ متر صورت پذیرفت. آب موردنیاز برای انجام



شکل ۳- شماتیکی از فلووم و تجهیزات مورد استفاده.

بر مسیر جریان نصب شدند. قطر موانع استوانه‌ای و طول هر ضلع موانع مثلثی ۲۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. در شکل ۴ شماتیکی از موانع مورد استفاده و در شکل ۵ طرز قرارگیری موانع مثلثی و استوانه‌ای ارائه شده است.



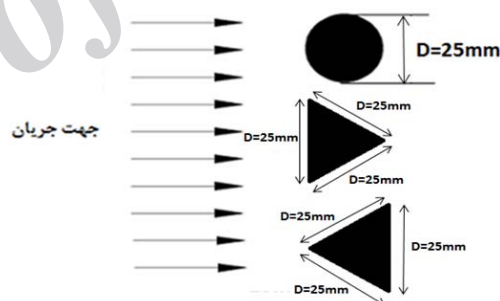
شکل ۵- طرز قرار گرفتن موانع مثلثی و استوانه‌ای.

بیشینه و کمینه دامنه در هر موج از روی خط‌کش‌هایی نصب شده برداشت می‌شد. به‌منظور تعیین فرکانس امواج، تعداد نوسانات صورت گرفته و زمان انجام نوسانات برداشت شد. سپس، با تقسیم تعداد نوسانات به زمان، فرکانس امواج برای هر حالت تعیین گردید. وایت (۱۹۷۹) با استفاده از فرکانس امواج، عدد بی‌بعد استراهل را به‌صورت رابطه ۶ تعریف نمود:

$$S = \frac{f_s D}{U} \quad [6]$$

که در این رابطه  $S$  عدد استراهل،  $f_s$  فرکانس امواج  $D$  قطر و یا طول ضلع موانع (شکل ۴) و  $U$

موانع مورد استفاده در این تحقیق به‌صورت استوانه‌ای ( $C$ ) و مثلث ( $t$ ) بوده است. در مورد موانع مثلثی دو زاویه برخورد با مانع به‌صورت برخورد جریان به رأس مثلث ( $t_1$ ) و برخورد جریان به ضلع مثلث ( $t_2$ ) در نظر گرفته شد. این موانع منشوری عمود



شکل ۴- شماتیکی از مقطع موانع مورد استفاده.

در انجام آزمایش‌ها آرایش موانع به‌صورت موازی و با فواصل مشخص  $T=60, 120, 180$  (mm) و  $P=60, 120, 180$  (mm) نصب گردیدند. همچنین دبی‌های مورد استفاده ۵، ۱۰ و ۱۵ لیتر بر ثانیه و کارگذاری موانع به‌صورت موازی با آرایش  $60 \times 60$ ،  $60 \times 120$ ،  $120 \times 120$  و  $180 \times 180$  میلی‌متر  $\times$  میلی‌متر در نظر گرفته شد، که اولین عدد مربوط به فاصله موانع در یک ردیف ( $T$ ) و دومین عدد مربوط به فاصله ردیف‌ها از یکدیگر ( $P$ ) هست. در مجموع ۳۶ آزمایش صورت پذیرفت. در هر آزمایش با پایین آوردن دریچه، انواع مختلف موج تشکیل شده و

در دو رابطه بالا،  $N$  تراکم موانع (تعداد موانع در هر ردیف)،  $\rho$  جرم مخصوص سیال و  $\mu$  لزجت دینامیکی سیال هست.

### نتایج و بحث

همان‌طور که عنوان شد هدف از تحقیق حاضر بررسی تأثیر شکل موانع بر روی تشکیل امواج عرضی هست. آزمایش‌ها در شرایط زیربحرانی و آشفته صورت پذیرفت. محدوده اعداد رینولدز و فرود در آزمایش‌ها انجام‌شده در جدول ۱ ارائه‌شده است.

سرعت متوسط جریان (دبی بر سطح مقطع جریان) هست.

به‌منظور انجام تحلیل ابعادی از روش  $\pi$  باکینگهام استفاده گردید. پارامترهای مؤثر در تعیین عدد استراهل مطابق رابطه ۷ انتخاب گردید:

$$\phi_1(f_s, U, T, P, N, D, \mu, \rho) = 0 \quad [7]$$

پس از انجام تحلیل ابعادی، اعداد بدون بعد مطابق رابطه ۸ حاصل شدند:

$$\phi_2\left(\frac{f_s D}{U}, \frac{\rho U D}{\mu}, \frac{T}{D}, \frac{P}{D}, N\right) = 0 \quad [8]$$

جدول ۱- محدوده اعداد رینولدز و فرود در انجام آزمایش‌ها.

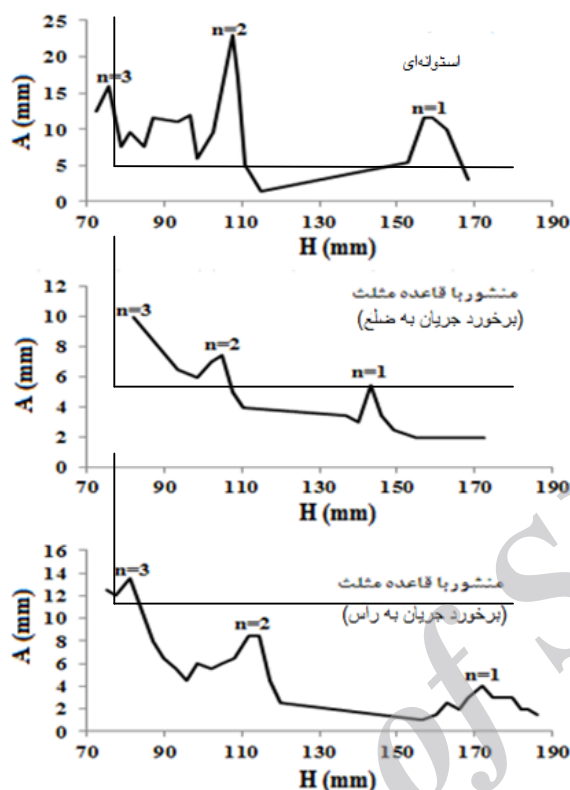
$f_s$ (Hz)	$A$ (mm)	$u$ ( $m s^{-1}$ )	پارامترها		مقادیر
			$F_r$	$R_e$	
۰/۴۰	۱	۰/۰۴	۰/۱۰	۵۶۳۰	کمینه
۲/۲۷	۶۱	۰/۳۳	۰/۵۰	۲۶۴۸۳	بیشینه

در شکل ۶ تغییرات دامنه امواج (A) برحسب عمق جریان (H) برای مقاطع با شکل‌های موردنظر ارائه‌شده است. به‌دلیل وجود آزمایش‌ها متعدد از ارائه کلیه شکل‌ها خودداری شده است. شکل ۶ برای دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه و آرایش (mm×mm) 120×120 هست. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، روند تغییرات دامنه امواج با عمق جریان مشابه هست. بدین‌صورت که با کاهش عمق در هر شکل مانع، دامنه امواج افزایش‌یافته و بعد از رسیدن به یک مقدار بیشینه دوباره کاهش می‌یابد. در شکل ۷ برخی از انواع امواج عرضی به‌صورت شماتیک ارائه‌شده است.

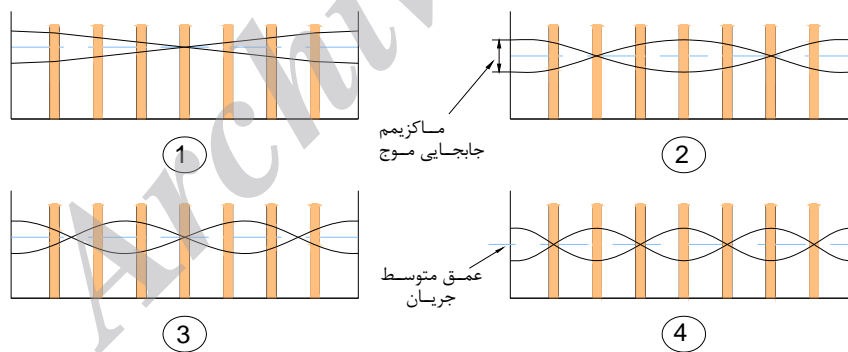
به‌منظور مقایسه بهتر نتایج حاصل از آزمایش‌ها مقدار  $A/H$  در جدول ۲ ارائه‌شده است (در مواردی که هیچ موجی تشکیل نشده، در ستون مربوطه با خط‌چین مشخص‌شده است). با توجه به جدول ۲ مشاهده می‌شود که در آرایش (mm×mm) 60×60 بیشینه و کمینه  $A/H$  به‌ترتیب در موانع C و  $t_1$  به‌میزان

۵۵/۵۰ و ۷/۱۶ درصد شکل گرفت. همچنین در این آرایش برای کلیه دبی‌ها در مانع  $t_2$  هیچ‌گونه موجی شکل نگرفت. در آرایش (mm×mm) 60×120 بیشینه و کمینه  $A/H$  به‌ترتیب در موانع C و  $t_2$  به‌میزان ۶۱/۱۰ و ۳/۴۶ درصد شکل گرفت. در آرایش (mm×mm) 120×120 بیشینه و کمینه  $A/H$  به‌ترتیب در موانع C و  $t_1$  به‌میزان ۳۰/۶۶ و ۷/۷۲ درصد شکل گرفت. در آرایش (mm×mm) 180×180 بیشینه

و کمینه  $A/H$  در مانع استوانه‌ای به‌میزان ۱۸/۲۶ در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه و ۶/۲ در دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه هست. در این آرایش برای مانع  $t_1$  برای کلیه دبی‌ها هیچ‌گونه موجی شکل نگرفت. همچنین با افزایش دبی از ۵ تا ۱۵ لیتر بر ثانیه میزان  $A/H$  برای شکل-های متفاوت موانع در آرایش‌های متفاوت، کاهش یافت.



شکل ۶- تغییرات امواج (A) در مقابل عمق جریان (H) برای دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه و آرایش (mm×mm) 120×120.



شکل ۷- شماتیک برخی از امواج تشکیل یافته در عرض فلووم (امواج شماره ۱، ۲، ۳، ۴).

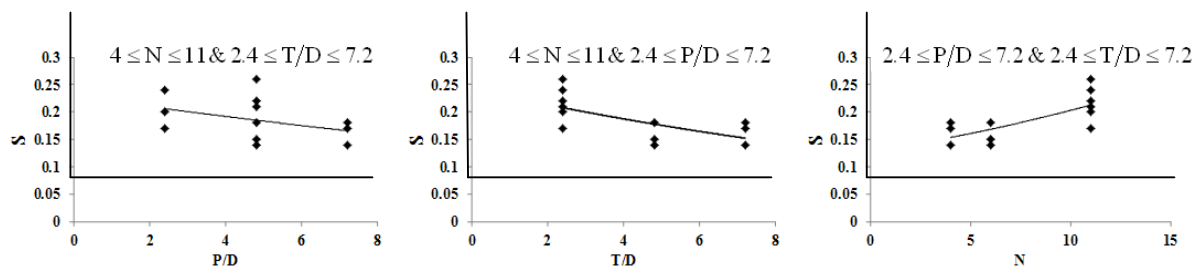
به منظور بررسی تأثیر پارامترهای  $P/D, T/D$  و  $N$  در محدوده‌های موردنظر، مشابه هست. به این صورت که با افزایش  $P/D$  و  $N/D$  عدد استراها کاهش یافته و با افزایش  $N$  عدد استراها افزایش می‌یابد.

به منظور بررسی تأثیر پارامترهای  $P/D, T/D$  و  $N$  بر روی عدد استراها، شکل‌های ۸ تا ۱۰ رسم شد. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود روند تغییرات عدد استراها در مقابل تغییرات پارامترهای

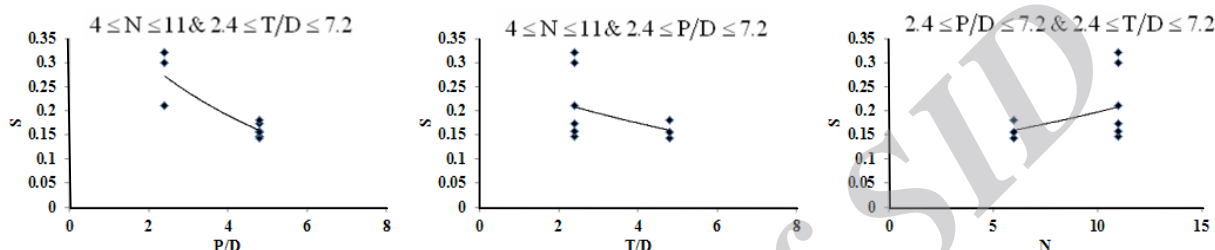


جدول ۲- خلاصه نتایج حاصل از انجام آزمایش‌ها.

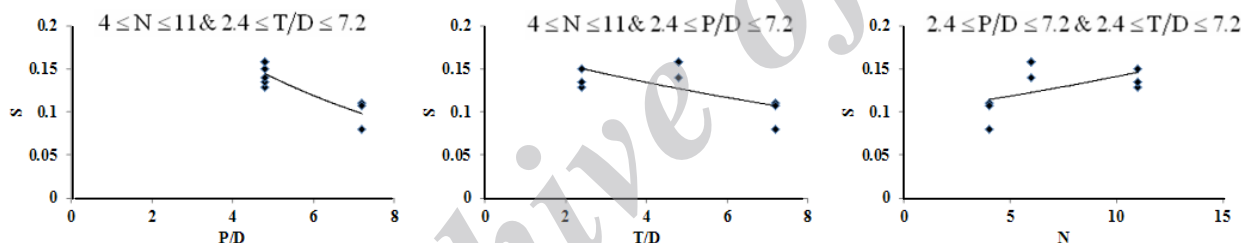
NO	شکل	T(mm)	P(mm)	D(mm)	P/D(-)	T/D(-)	$Q(1.8^{-1})$	A/H	N
۱	C	۶۰	۶۰	۶۰	۲/۴	۲/۴	۵	۵۵/۵۰	۴
۲	T <sub>1</sub>	۶۰	۶۰	۶۰	۲/۴	۲/۴	۵	۳۹/۳۷	۵
۳	T <sub>2</sub>	۶۰	۶۰	۶۰	۲/۴	۲/۴	۵	.....	.....
۴	C	۶۰	۶۰	۶۰	۲/۴	۲/۴	۱۵	۳۷/۵۰	۵
۵	T <sub>1</sub>	۶۰	۶۰	۶۰	۲/۴	۲/۴	۱۵	۱۶/۱۴	۳
۶	T <sub>2</sub>	۶۰	۶۰	۶۰	۲/۴	۲/۴	۱۵	.....	.....
۷	C	۶۰	۶۰	۶۰	۲/۴	۲/۴	۲۵	۲۹/۲۰	۲
۸	T <sub>1</sub>	۶۰	۶۰	۶۰	۲/۴	۲/۴	۲۵	۷/۱۶	۳
۹	T <sub>2</sub>	۶۰	۶۰	۶۰	۲/۴	۲/۴	۲۵	.....	.....
۱۰	C	۶۰	۱۲۰	۱۲۰	۲/۴	۴/۸	۵	۶۱/۱۰	۱
۱۱	T <sub>1</sub>	۶۰	۱۲۰	۱۲۰	۲/۴	۴/۸	۵	۱۲/۱۵	۲
۱۲	T <sub>2</sub>	۶۰	۱۲۰	۱۲۰	۲/۴	۴/۸	۵	۴/۶۰	۱
۱۳	C	۶۰	۱۲۰	۱۲۰	۲/۴	۴/۸	۱۵	۲۵/۶۰	۲
۱۴	T <sub>1</sub>	۶۰	۱۲۰	۱۲۰	۲/۴	۴/۸	۱۵	۱۰/۵۳	۲
۱۵	T <sub>2</sub>	۶۰	۱۲۰	۱۲۰	۲/۴	۴/۸	۱۵	۳/۴۶	۱
۱۶	C	۶۰	۱۲۰	۱۲۰	۲/۴	۴/۸	۲۵	۲۱/۳۴	۲
۱۷	T <sub>1</sub>	۶۰	۱۲۰	۱۲۰	۲/۴	۴/۸	۲۵	۸/۳۹	۲
۱۸	T <sub>2</sub>	۶۰	۱۲۰	۱۲۰	۲/۴	۴/۸	۲۵	۳/۴۸	۱
۱۹	C	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰	۴/۸	۴/۸	۵	۳۰/۶۶	۳
۲۰	T <sub>1</sub>	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰	۴/۸	۴/۸	۵	۱۳/۱۴	۳
۲۱	T <sub>2</sub>	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰	۴/۸	۴/۸	۵	۷/۹۱	۲
۲۲	C	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰	۴/۸	۴/۸	۱۵	۲۱/۴۰	۲
۲۳	T <sub>1</sub>	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰	۴/۸	۴/۸	۱۵	۱۶/۶۰	۳
۲۴	T <sub>2</sub>	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰	۴/۸	۴/۸	۱۵	۱۲/۱۹	۳
۲۵	C	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰	۴/۸	۴/۸	۲۵	۲۲	۲
۲۶	T <sub>1</sub>	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰	۴/۸	۴/۸	۲۵	۷/۷۲	۳
۲۷	T <sub>2</sub>	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰	۴/۸	۴/۸	۲۵	۱۳/۴۹	۳
۲۸	C	۱۸۰	۱۸۰	۱۸۰	۷/۲	۷/۲	۵	۱۳/۶۰	۲
۲۹	T <sub>1</sub>	۱۸۰	۱۸۰	۱۸۰	۷/۲	۷/۲	۵	.....	.....
۳۰	T <sub>2</sub>	۱۸۰	۱۸۰	۱۸۰	۷/۲	۷/۲	۵	۱۱/۳۷	۲
۳۱	C	۱۸۰	۱۸۰	۱۸۰	۷/۲	۷/۲	۱۵	۱۸/۲۶	۲
۳۲	T <sub>1</sub>	۱۸۰	۱۸۰	۱۸۰	۷/۲	۷/۲	۱۵	.....	.....
۳۳	T <sub>2</sub>	۱۸۰	۱۸۰	۱۸۰	۷/۲	۷/۲	۱۵	۱۶/۸۷	۳
۳۴	C	۱۸۰	۱۸۰	۱۸۰	۷/۲	۷/۲	۲۵	۶/۲۰	۳
۳۵	T <sub>1</sub>	۱۸۰	۱۸۰	۱۸۰	۷/۲	۷/۲	۲۵	.....	.....
۳۶	T <sub>2</sub>	۱۸۰	۱۸۰	۱۸۰	۷/۲	۷/۲	۲۵	۱۱/۰۶	۲



شکل ۸- روند تغییرات عدد استراغال در مقابل تغییرات  $P/D, T/D$  و  $N$  (مانع C).



شکل ۹- روند تغییرات عدد استراغال در مقابل تغییرات  $P/D, T/D$  و  $N$  (مانع  $t_1$ ).



شکل ۱۰- روند تغییرات عدد استراغال در مقابل تغییرات  $P/D, T/D$  و  $N$  (مانع  $t_2$ ).

به اعداد رینولدز و فرود در حالت زیربحرانی و آشفته قابل استفاده می‌باشند.

$$S = \frac{(P/D)^{0.20}}{N^{0.44}(T/D)^{0.84}} \quad C \quad [10]$$

$$S = \frac{1}{N^{0.18}(P/D)^{0.79}(T/D)^{0.15}} \quad t_1 \quad [11]$$

$$S = \frac{1}{N^{0.10}(P/D)^{1.2}(T/D)^{0.08}} \quad t_2 \quad [12]$$

محدوده اعتبار روابط فوق به صورت:

$$(4 \leq N \leq 11 \& 2.4 \leq P/D \leq 7.2 \& 2.4 \leq T/D \leq 7.2)$$

هست. با توجه به روابط فوق مشاهده می‌شود که

برای تخمین عدد استراغال، با استفاده از رابطه ۸ می-

توان عدد استراغال را به صورت تابعی از  $N$ ،  $\frac{P}{D}$  و

$\frac{T}{D}$  به صورت رابطه ۹ بیان نمود:

$$S = \left(\frac{T}{D}\right)^a \left(\frac{P}{D}\right)^b (N)^c \quad [9]$$

با استفاده از نرم‌افزار SPSS و اطلاعات موجود

اقدام به تعیین مقادیر ثابت در رابطه ۹ گردید. لازم به

ذکر است روابطی با در نظر گرفتن اعداد رینولدز و

فرود به صورت متغیر مستقل نیز استخراج گردید که

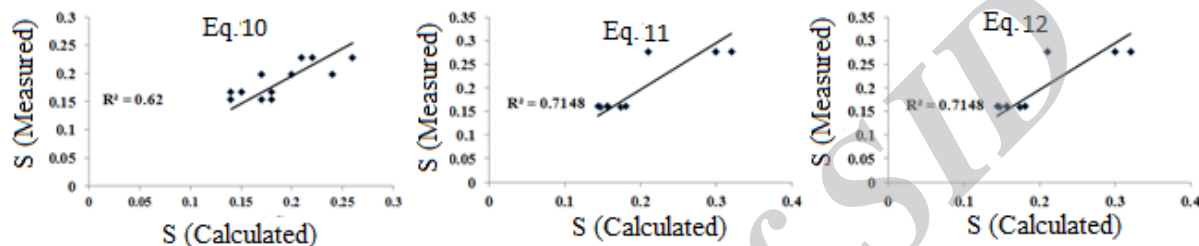
نتایج حاصل از دقت سنجی آن‌ها نشان داد، که از دقت

بالایی برخوردار نمی‌باشند. لذا روابط حاصله با توجه

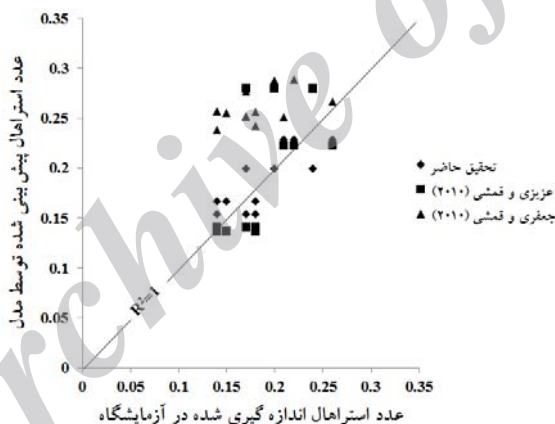
حال آنکه برای موانع حالت  $t_1$  و  $t_2$  این نسبت به صورت عکس هست.

به منظور بررسی میزان دقت روابط ۱۰ تا ۱۲، شکل ۱۱ ترسیم گردید. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که این روابط دقت قابل قبولی در پیش‌بینی عدد استراغال برای موانع با شکل‌های موردنظر را دارا می‌باشند.

پارامترهای  $T/D$  و  $N$  در ایجاد فرکانس برای موانع حالت  $C$  با توان‌های بیشتر و برای موانع حالت  $t_1$  و  $t_2$  با توان‌های کمتری می‌باشند. همچنین در موانع حالت  $C$  عدد استراغال با پارامتر  $P/D$  نسبت مستقیم دارد (عزیزی و قمشی ۱۳۸۹، جعفری و همکاران ۱۳۹۰).



شکل ۱۱- الگوی پراکنش مقادیر مشاهداتی و محاسبه‌شده عدد استراغال.



شکل ۱۲- مقایسه مقادیر تجربی و پیش‌بینی‌شده عدد استراغال برای موانع استوانه‌ای.

شکل ۱۲ ارائه‌شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود رابطه عزیزی و قمشی (۲۰۱۰) از دقت بیشتری در خصوص پیش‌بینی عدد استراغال در تحقیق حاضر برخوردار هست.

شکل موانع تأثیر زیادی بر روی تشکیل امواج عرضی،  $A/H$  و عدد استراغال دارد. بیشترین میزان  $A/H$  مربوط به موانع حالت  $C$  برای آرایش  $60 \times 120$  (mm $\times$ mm) در دبی ۵ لیتر بر ثانیه و به میزان  $61/10$  درصد و کمترین میزان  $A/H$  مربوط به موانع حالت  $t_2$

عدد استراغال در پدیده‌های متناوب گردابه‌ها، به‌عنوان اندازه فرکانس بی‌بعد نوسان‌های این پدیده در نظر گرفته می‌شود. در واقع عدد استراغال، رفتار وابسته به زمان این پدیده را توصیف می‌کند و برای پیش‌بینی بسامد نوسان‌های گردابی می‌توان از رابطه عدد استراغال که در این مقاله ارائه‌شده استفاده کرد.

همچنین یک مقایسه بین مدل حاصل برای موانع استوانه‌ای به منظور تخمین عدد استراغال با روابط عزیزی و قمشی (۲۰۱۰) و جعفری و قمشی (۲۰۱۰) در

در خصوص طراحی سازه‌های آبی که دارای پایه-هایی عمود بر جهت جریان می‌باشند بهتر است در ابتدا با توجه به دبی و روابط موجود شکل و تراکم پایه‌ها را به صورتی که کمترین دامنه موج ایجاد شود، مشخص نموده سپس با استفاده از نتایج حاصل در این خصوص تصمیم‌گیری نمایند.

در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه و به‌میزان  $3/46$  درصد حاصل شد. همچنین با استفاده از اطلاعات موجود و استخراج روابط تجربی بر مبنای این اطلاعات مشخص گردید عدد استراهاال با پارامتر  $P/D$  در موانع حالت  $C$  نسبت مستقیم و در دو حالت  $t_1$  و  $t_1$  نسبت عکس دارد.

#### منابع مورد استفاده

- جعفری ا، قمشی م، بینا م و کاشفی پور م، ۱۳۹۰. معادله‌ای جدید جهت به‌دست آوردن عدد استروهاال موج ناشی از عبور آب از موانع استوانه‌ای. مجله علمی کشاورزی (علوم و مهندسی آبیاری)، جلد ۳۴، شماره ۱، صفحه‌های ۴۵ تا ۵۴.
- عزیزی ر و قمشی م، ۱۳۸۹. رابطه فرکانس امواج عمود بر جریان در مجاری روباز با مشخصات جریان و موانع. مجله تحقیقات منابع آب ایران، جلد ۶، شماره ۲، صفحه‌های ۵۷ تا ۶۵.
- Azizi R and Ghomeshi M, 2010. Computing Strouhal Number in transverse wave generation by vortex shedding in open channels. Proceedings of IAHR-APD Congress, The University Auckland, New Zealand.
- Blevins RD, 1977. Flow-Induced Vibration. VNR, London, Toronto, Melbourne.
- Blevins RD and Bressler MM, 1993. Experiments on acoustic resonance in heat exchanger tube bundles. Journal of Sound and Vibration 164(3): 503-533.
- Crassé, 1939. About a phenomenon of oscillation of water causes Plan Part 1 of Ecolement around obstacles shaped batteries bridge. Coptic records of meetings of the Academic of Sciences, 209, in French.
- Carmo BS, Sherwina SJ, Bearmana PW and Willdenb RHJ, 2011. Flow-Induced vibration of a circular cylinder subjected to wake interference at low Reynolds number. Journal of Fluids and Structures 27(4): 503-522.
- Dalrymple RA and Dean RG, 1984. Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists. World scientific, London.
- Fitz-Hugh JS, 1973. Flow induced vibration in heat exchange. Pp. 1-17. Proceedings of UKAEA/NPL International Symposium on Vibration Problems in Industry, Keswick, England.
- Falvey HT, 1980. Bureau of Reclamation Experience with Flow-Induced Vibration. Practical Experiences with Flow Induced Vibrations. E. Naudascher and Rockwell, eds., Springer, New York.
- Ghomeshi M, Mortazavi-Dorcheh SA and Falconer R, 2007. Wave formation by vortex shedding in open channel. Journal of Applied Sciences 7 (24): 3927-3934.
- Jafari A, Ghomeshi M, Bina M and Kashefipour SM, 2010. Experimental study on ten modes of transverse waves due to vertical cylinders in open channels. Journal of Food. Agriculture & Environment 8(2) : 949-955.
- Kiua KY, Stappenbelta B and Thiagarajan KP, 2011. Effects of uniform surface roughness on vortex-induced vibration of towed vertical cylinders. Journal of Sound and Vibration 330(20): 4753-4763.
- Lee JH and Bernitsas MM, 2011. High-damping, high-Reynolds VIV tests for energy harnessing using the VIVACE converter. Ocean Engineering 38(16): 1697-1712.
- Sahu AK, Chhabra RP and Eswaran V, 2009. Two-dimensional unsteady laminar flow of a power law fluid across a square cylinder. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics 160(2): 157-167.
- Schuster JC, 1967. Canal Capacity Studies, Wave Formation by Bridge Piers. Hydraulics Branch Rep. HYD- 485. Bureau of Reclamation, USA.
- White FM, 1979. Fluid Mechanics. McGraw-Hill. New York.
- Zima L and Ackermann NL, 2002. Wave generation in open channels by vortex shedding from channel obstructions. Journal of Hydraulic Engineering ASCE 128(6): 596-603.
- Zukauskas A, Ulinskas R and Katinas V, 1988. Flow Dynamics and Flow Induced Vibrations of Tube Banks. Experimental and Applied Heat Transfer Guide Books.